Ressortforschungsberichte zur kerntechnischen Sicherheit und zum Strahlenschutz

Bestimmung der Exposition der allgemeinen Bevölkerung durch neue Mobilfunktechniken – Vorhaben 3611S80002

Auftragnehmer: IMST GmbH, Kamp-Lintfort

Chr. Bornkessel M. Schubert M. Wuschek

Das Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) und im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) durchgeführt.



Dieser Band enthält einen Ergebnisbericht eines vom Bundesamt für Strahlenschutz im Rahmen der Ressortforschung des BMU (UFOPLAN) in Auftrag gegebenen Untersuchungsvorhabens. Verantwortlich für den Inhalt sind allein die Autoren. Das BfS übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter. Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit seiner Zustimmung ganz oder teilweise vervielfältigt werden.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der des BfS übereinstimmen.

BfS-RESFOR-79/13

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN: urn:nbn:de: 0221-2013041610546

Salzgitter, April 2013





Bestimmung der Exposition der allgemeinen Bevölkerung durch neue Mobilfunktechniken

Abschlussbericht

erstellt für das Bundesamt für Strahlenschutz

9. Januar 2013

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.

Kurzzusammenfassung

Vorliegendes Forschungsvorhaben befasst sich primär mit der messtechnischen Erfassung und Analyse von Immissionen im Umfeld von LTE- und TETRA BOS-Basisstationen.

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 "aktuellen", d.h. raum- und zeitgemittelten Immissionen waren feldstärkebezogen um Faktoren zwischen 3,1 und 17,2 niedriger. 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 %). Die "aktuellen" Immissionen waren feldstärkebezogen um Faktoren zwischen 2,1 und 4,4 niedriger. LTE- und TETRA BOS-Immissionen sind von ihrer Größenordnung und ihrer örtlichen Verteilung vergleichbar zu den Immissionen durch GSM-und UMTS-Mobilfunkanlagen.

Als Fazit ist 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. Im Mittel wurde leistungsbezogen ein Anteil von 22 % für LTE und 30 % für TETRA BOS an der gesamten Hochfrequenzimmission gemessen. Diese Angaben sind vor allem für die unmittelbare Umgebung der ausgewählten Anlagen repräsentativ und sollten nicht als flächen- bzw. bevölkerungsgemittelte Immissionszunahme interpretiert werden.

Abstract

The aim of the presented research project is primarily the measurement and analysis of the general public's exposure in the vicinity of LTE and TETRA BOS base stations.

Concerning LTE-measurements at 102 systematically and 75 randomly chosen measurement points, exposures extrapolated to the maximal operational state of the station were found to be between 0.002 and 7.28 % of the ICNIRP 1998 field strength reference levels (median 0.70 %). The instantaneous exposure was smaller by field strength factors between 3.1 and 17.2. TETRA BOS exposure measurements at 40 systematically and 40 randomly chosen points resulted in extrapolated exposures between 0.03 and 4.63 % of the field strength limit (median 0.46 %). The instantaneous exposure was smaller by field strength factors between 2.1 and 4.4. The LTE and TETRA BOS exposure is very similar to the exposure around GSM and UMTS base stations with regard to order of magnitude and spatial distribution.

It can be concluded, that the base stations of the novel cellular mobile radio techniques LTE and TETRA BOS cause an exposure increase to the general public. The overall exposure to fixed radio transmitters, however, is still low (median smaller than 2 %of the field strength limit). At the investigated base stations the power related mobile phone exposure increase was 37 % for LTE and 47 % for TETRA BOS, both related to maximal operational state of the station. On average a 22 % contribution of LTE and 30 % of TETRA BOS to the overall RF exposure was measured. These values are representative primarily for the direct vicinity of the chosen stations and should not be interpreted as area or population averaged exposure increase.

Zusammenfassung

Gegenstand vorliegenden Forschungsvorhabens ist die messtechnische Erfassung und Analyse von Immissionen durch die neuen Mobilfunktechniken LTE und TETRA BOS. Dabei stehen die Basisstationen im Vordergrund der Untersuchungen.

Die Messung von LTE-Immissionen kann prinzipiell frequenzselektiv und codeselektiv erfolgen. Wohingegen die frequenzselektive Messung mit üblichen Spektrumanalysatoren durchgeführt werden kann, sind für die codeselektive Messung spezielle Messgeräte erforderlich. Diese erfassen die Immission der LTE-Basisstation zell- bzw. sektorspezifisch und umgehen damit die Probleme von frequenzselektiven Messungen, die die Immissionsbeiträge verschiedener Zellen bzw. Basisstationen aufgrund des Gleichwellennetzes nicht separieren können. Es existieren derzeit zwei codeselektive EMF-Messgeräte auf dem Markt, die vergleichsweise neu sind. Diese wurden im Rahmen dieses Projektes miteinander und im Vergleich zu frequenzselektiven Verfahren im Labor und im Feld ausführlich getestet. Codeund frequenzselektive Verfahren liefern bei gleichen Randbedingungen übereinstimmende und reproduzierbare Messergebnisse und sind daher für Immissionsmessungen an LTE-Basisstationen grundsätzlich geeignet. Wohingegen 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.

Die LTE-Messungen erfolgten mit der "Schwenkmethode" in 11 verschiedenen Szenarien an 102 systematisch und 75 zufällig ausgewählten Messpunkten. Die systematischen Messpunkte weisen verschiedene, nach systematischen Gesichtspunkten ausgewählte Abstände, Orientierungen, Höhenunterschiede und Sichtverbindungen zur LTE-Anlage auf. Anhand von Immissionsmessungen entlang einer Linie oder in verschiedenen Stockwerken eines Gebäudes wird es möglich, die grundsätzliche Entfernungs- bzw. Höhenabhängigkeit der Immission analysieren zu können. Damit wird in gewissen Grenzen eine Übertragbarkeit auf ähnliche Szenarien ermöglicht. Die Koordinaten der zufällig ausgewählten Messpunkte wurden hingegen mit einem Zufallszahlengenerator ausgewürfelt und repräsentieren eher eine flächengemittelte Immission im Umfeld von LTE-Anlagen.

Die auf maximale Anlagenauslastung extrapolierten LTE-Immissionen erreichten je nach Szenario Werte zwischen 0,002 und 7,28 % des Feldstärkegrenzwertes der 26. BImSchV bei einem Median von 0,70 %. Die "aktuellen", d.h. raum- und zeitgemittelten Immissionen lagen um feldstärkebezogene Faktoren von 3,1 bis 17,2 unter den räumlich maximierten und auf maximale Anlagenauslastung extrapolierten Immissionen.

Bei der Untersuchung von Einflussfaktoren für die Größe der Immission hat sich herausgestellt, dass der *Abstand* im unmittelbaren Umfeld einer 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 sehr stark durch die Nebenzipfel und Einzüge des stark bündelnden vertikalen Antennendiagramms geprägt ist und daher einen sehr unregelmäßigen Charakter aufweist. Einen eindeutigen Einfluss üben 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 *Verti*- kalwinkels ist ebenfalls deutlich nachweisbar: Messpunkte, die in oder nahe der Hauptstrahlrichtung des vertikalen Antennendiagramms liegen, erfahren eine größere Immission als Messpunkte außerhalb der Hauptstrahlrichtung. Die unterschiedlichen vertikalen Antennendiagramme sind neben dem niedrigeren Grenzwert bei LTE-800 Ursache dafür, dass bei LTE-800 im Durchschnitt etwas höhere Immissionen gemessen wurden als bei LTE-1800.

Die gemessenen LTE-Immissionen sind von ihrer Größenordnung und ihrer örtlichen Verteilung vergleichbar zu den Immissionen durch GSM- und UMTS-Mobilfunkanlagen. An allen LTE-Standorten waren auch GSM- und UMTS-Mobilfunkanlagen installiert; ihre Immissionen wurden ebenfalls messtechnisch erfasst. An den untersuchten Mobilfunkanlagen ergab sich im Mittel ein leistungsbezogener Immissionszuwachs von 37 % durch LTE. Im Einzelfall kann vor allem die Zunahme von Sendeleistung und Anzahl der LTE-Systeme einen Anhaltspunkt für die Höhe des zu erwartenden Immissionszuwachses geben.

An 10 Szenarien mit insgesamt 50 Zufallsmesspunkten wurde - zusätzlich zur LTE-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 % an der gesamten Hochfrequenzimmission. Immissionen von anderen als Mobilfunksendeanlagen (z.B. Ton- und Fernsehrundfunk) trugen an den Messpunkten nur in untergeordnetem Maß zur Gesamtimmission bei.

LTE-800-Anlagen ("Digitale Dividende") werden in einem Frequenzbereich betrieben, der vormals für das Digitale Fernsehen (DVB-T) reserviert war. Messungen an 50 zufällig verteilten Punkten in den Regionen Nürnberg und München ergaben, dass bei maximaler Anlagenauslastung die aktuellen LTE-Immissionen im Mittel um etwa 1,4 dB größer sind, als es vorher die DVB-T-Immissionen im Frequenzbereich der "Digitalen Dividende" waren. Der Grund hierfür ist in der größeren Anzahl an Senderstandorten (kleinere Zellradien sowie 3 Netzbetreiber parallel) sowie in den niedriger montierten Sendeantennen bei LTE zu sehen. Bei in der Praxis zu erwartenden LTE-Anlagenauslastungen wird der Unterschiedsfaktor geringer bzw. sogar negativ und liegt je nach momentaner LTE-Auslastung etwa zwischen 1,4 und -4,6 dB.

Langzeitmessungen über 24 Stunden an einer ländlichen LTE-800-Anlage und einer städtischen LTE-1800-Anlage zeigen durch Verkehrslast verursachte Immissionsschwankungen an der LTE-800-Anlage. Hier wird also derzeit offensichtlich signifikanter Datenverkehr abgewickelt. An der LTE-1800-Anlage hingegen waren keine Immissionsschwankungen zu erkennen, jedoch einige betreiberseitige Wartungseingriffe in die Station.

Detaillierte Untersuchungen zu den verkehrslastabhängigen Immissionsschwankungen an einer LTE-1800-Anlage haben gezeigt, dass ein *einzelner* Nutzer durch typische Internetnutzungen (Browsen, SD-Video Download) nur zu einer vergleichsweise geringen Änderung der zeitgemittelten Immission (0,8 bis 1,9 dB) durch die Basisstation führt. Der Momentanwert der Immission kann zwar um über 10 dB ansteigen, allerdings erfolgt dies nur kurzzeitig.

Immissionsuntersuchungen in Femtozellen wurden mangels Verfügbarkeit von LTE-Femtozellen in 4 UMTS-Femtozellen durchgeführt. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass deren Immissionen aufgrund vergleichbarer Sendeleistungen typisch nicht signifikant höher ausfallen als die von im Umfeld betriebenen WLAN/DECT-Systemen. Das Immissionsverhältnis zu externen Quellen (z.B. Mobilfunkanlagen) ist weitgehend davon abhängig, ob bzw. wo im Umfeld Mobilfunksender vorhanden sind. An einem LTE-Router und einem LTE-Surfstick wurden SAR-Messungen durchgeführt. Die empfohlenen SAR-Grenzwerte werden für alle untersuchten Positionen und Funkdienste sowohl für den Router (direkter Kontakt), als auch für den Surfstick (25 mm Abstand zum Körper) eingehalten. Die höchste gemessene LTE-Exposition für den Router beträgt 0,75 W/kg (bzw. 37,5 % bezüglich des SAR-Grenzwertes); beim Surfstick werden maximal 0,28 W/kg (bzw.14,2 %) erreicht. Der maximal gemessene SAR-Wert der Funkdienste GSM-900, GSM-1800 und UMTS beträgt beim Surfstick 0,27 W/kg (bzw. 13,6 %).

Die TETRA BOS-Messungen erfolgten ebenfalls mit der "Schwenkmethode" in 5 verschiedenen Messszenarien an 40 systematischen und 40 zufällig ausgewählten Messpunkten. Die auf maximale Anlagenauslastung extrapolierten TETRA BOS-Immissionen erreichten je nach Szenario Werte zwischen 0,03 und 4,63 % des Feldstärkegrenzwertes der 26. BImSchV bei einem Median von 0,46 %. Die "aktuellen", d.h. raum- und zeitgemittelten Immissionen lagen um feldstärkebezogene Faktoren von 2,1 bis 4,4 unter den räumlich maximierten und auf maximale Anlagenauslastung extrapolierten Immissionen.

Die gemessenen TETRA BOS-Immissionen sind bezüglich ihrer Größenordnung und örtlichen Verteilung mit den Immissionen durch LTE-, GSM- und UMTS-Mobilfunkanlagen vergleichbar. Fasst man alle Messpunkte zusammen, an denen neben TETRA BOS auch die Immissionen durch andere Mobilfunkanlagen vom selben Standort gemessen wurden, ergibt sich im Mittel ein leistungsbezogener Zuwachs der Immission durch TETRA BOS von 47 %. Dabei gibt es jedoch einen deutlichen Unterschied zwischen den städtischen und den ländlichen Szenarien: Während in den untersuchten städtischen Szenarien der mittlere Zuwachs aufgrund der stellenweise sehr großen Kanalzahl bzw. beantragten Sendeleistungen bei 144 % lag, betrug er in den ländlichen Szenarien 3 %. Hierbei ist aber anzumerken, dass diese Werte lediglich für das direkte Umfeld der untersuchten TETRA BOS-Anlagen, jedoch nicht für eine flächen- bzw. bevölkerungsgemittelte Immissionszunahme gelten.

An 4 Szenarien mit insgesamt 20 Zufallsmesspunkten wurde - zusätzlich zur 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 TETRA BOS-Immissionen leistungsbezogen ein Anteil von 30 % an der gesamten Hochfrequenzimmission. Immissionen von anderen als Mobilfunksendeanlagen (z.B. Ton und Fernsehrundfunk) trugen an den Messpunkten nur in untergeordnetem Maß zur Gesamtimmission bei.

Langzeitmessungen über 24 Stunden an einer ländlichen und einer städtischen TETRA BOS-Anlage zeigen einen zeitlich nahezu konstanten Immissionsverlauf, der im Wesentlichen durch den zeitkonstanten Signalisierungsträger verursacht wird. Dieser erzeugt eine permanente Immission, wohingegen bei den Analog BOS-Anlagen nur dann eine Immission erzeugt wird, wenn ein Sprachsignal übertragen wird.

Als Fazit ist festzustellen, dass mit den Basisstationen der neuen Mobilfunktechniken LTE und TETRA BOS eine Immissionszunahme für die Bevölkerung verbunden ist; die Gesamtimmission 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. Im Mittel wurde leistungsbezogen ein Anteil von 22 % für LTE und 30 % für TETRA BOS an der gesamten Hochfrequenzimmission gemessen. Diese Angaben sind vor allem für die unmittelbare Umgebung der ausgewählten Anlagen repräsentativ und sollten nicht als flächen- bzw. bevölkerungsgemittelte Immissionszunahme interpretiert werden.

Summary

The aim of the presented research project is the measurement and analysis of the general public's exposure to novel cellular mobile radio techniques LTE and TETRA BOS. Major focus is put on the exposure to the base stations.

LTE exposure can be measured in general frequency selective as well as code selective. Frequency selective measurements can be performed with usual spectrum analysers, whereas special measurement equipment is necessary for code selective measurements. The latter assess the exposure of LTE stations cell specific, i.e. sector specific, avoiding the frequency selective measurement problem of not being able to separate the exposures of different cells and base stations because of the single frequency network structure of LTE. Presently there are two code selective EMF analysers on the market, which are rather new. Both analysers were extensively tested against each other and in comparison to frequency selective methods under laboratory and field conditions in the framework of this project. As a result, code and frequency selective methods give identical and reproducible results under same conditions. They are therefore basically suited for exposure measurements on LTE base stations.

Whereas frequency selective methods may potentially overestimate the exposure extrapolated to maximal operational state in dependence of the configuration of the synchronisation signals, code selective methods exhibit problems because of limited relative dynamic especially in situations with high traffic load of the base station: If the signal of one cell is dominating the exposure at the measurement point, the exposure of the other cells of the same station or of cells of neighbouring stations may not be decoded by the analyser.

Using the "sweeping method", LTE measurements were performed in 11 different scenarios at 102 systematically and 75 randomly chosen measurement points. The systematical points exhibit different systematically chosen distances, orientations, height differences and sight conditions to the LTE station. With exposure measurements along a line or in different floor levels of a building, the distance and height dependence of exposure can be analysed in general. This allows a transferability of the results to similar scenarios to a certain extent. The randomly chosen points, however, were chosen using a random number generator. They represent an area averaged exposure around LTE stations.

The LTE exposures, extrapolated to the maximal operational state of the station, were found to be between 0.002 and 7.28 % of the field strength limit of the ICNIRP 1998 reference levels. The median was 0.70 %. The instantaneous exposure was smaller than the maximal by field strength related factors between 3.1 and 17.2.

Concerning factors influencing the exposure, the distance was found not being suited to estimate the LTE exposure in the vicinity (up to several hundred meters, depending on the station's height and downtilt) of a station. As a reason, in this distance range the exposure is strongly affected by the side lobes and nulls of the vertical antenna diagram, thus exhibiting an irregular distribution. The sight conditions, however, have a clear influence on the exposure: Objects like buildings, but also trees and bushes between measurement point and LTE station cause an attenuation, clearly visible in the measurement results. Also the vertical angle is an influencing factor: Measurement points lying in or close to the main lobe of the vertical antenna diagram have on average a larger exposure than points outside the main lobe. In addition to the lower reference levels for LTE-800 this is the reason that on average

higher exposure related to the reference levels were measured around LTE-800 stations in comparison to LTE-1800 stations.

The measured LTE exposure is very similar to exposure around GSM and UMTS base stations with regard to order of magnitude and spatial distribution. At all LTE stations GSM and UMTS systems were installed simultaneously and their exposure was also assessed in this study. At the stations investigated, the power related LTE exposure increase was on average 37 %. On an individual basis, especially the transmit power increase and the number of LTE systems may be an indication for the exposure increase to be expected.

At 10 scenarios with 50 randomly chosen points the overall RF exposure in the frequency range from 100 kHz to 3 GHz (including LTE) was measured. The LTE exposure contributed power related on average with about 22 % to the overall RF exposure. Exposures to non mobile radio related source (i.e. radio and TV stations) contributed only to a small amount to the overall RF exposure.

LTE-800 stations in the frequency band of the "Digital Dividend" are operated at frequencies, which were reserved previously for digital broadcasting (DVB-T). Measurements at 50 randomly chosen points in the areas of Nuremberg and Munich showed the maximal LTE exposure to be on average 1.4 dB higher than the recent DVB-T exposure in the identical frequency band. The reasons for this increase can be seen in the higher number of LTE stations (small cell sizes and 3 network operators simultaneously) as well as in the lower installation height of the LTE stations in comparison to DVB-T stations. Regarding typical traffic load of the LTE sites to be expected in practice, the exposure difference becomes smaller and is in the range between 1.4 and -4.6 dB, depending on the actual LTE traffic (i.e. the typical LTE-800 exposure can also be below the recent DVB-T exposure).

Long term measurements over 24 hours on a rural LTE-800 station show exposure variations caused by traffic load. On an investigated urban LTE-1800 station no traffic caused exposure variation could be seen, but maintenance work of the network operator.

Detailed investigations on the traffic dependent exposure variations at an LTE-1800 station, artificially stimulated with an LTE user terminal, showed that one single user with typical internet activity (browsing, SD video download) leads on average to only small LTE station exposure increases in the order of 0.8 to 1.9 dB. The instantaneous base station exposure may increase by more than 10 dB, but this is limited to very short time intervals only.

Because LTE femtocells are presently not available, exposure investigations were carried out in 4 UMTS femtocell scenarios. In summary the exposures were found to be in the same order of magnitude as exposure to WLAN/DECT systems operated nearby with comparable transmit powers. The exposure relation to external sources (e.g. mobile radio stations) depends strongly on the existence and position of those sources in the vicinity.

Finally, SAR measurements were carried out on an LTE router and surfstick. The recommended ICNIRP 1998 SAR10g basic restrictions are met for all investigated device positions and radio services for the LTE router (body contact) as well as for the LTE surfstick (25 mm distance to the body). The highest SAR value was found to be 0.75 W/kg (37.5 % of the basic restriction) for the router and 0.28 W/kg (14.2 %) for the surfstick. The maximal SAR for the other radio services GSM-900, GSM-1800 and UMTS was 0.27 W/kg (13.6 %) for the surfstick. TETRA BOS exposure measurements were performed with the "sweeping method" as well in 5 different scenarios at 40 systematically and 40 randomly chosen points. The TETRA BOS exposures, extrapolated to the maximal operational state of the station, were found to be between 0.03 and 4.63 % of the field strength limit of the ICNIRP 1998 reference levels. The median was 0.46 %. The instantaneous exposure was smaller than the maximal by field strength related factors between 2.1 and 4.4.

The measured TETRA BOS exposure is very similar to exposure around LTE, GSM and UMTS base stations with regard to order of magnitude and spatial distribution. On average, the power related TETRA BOS exposure increase was 47 %. There is, however, a strong difference between urban and rural measurement scenarios: Whereas in the investigated urban scenarios the average exposure increase was about 144 % (based on high channel numbers and claimed transmit power), the increase was only about 3 % in rural scenarios. It has to be noted, that these values are valid only in the direct vicinity of TETRA BOS stations, but not as an area or population averaged exposure increase.

At 4 scenarios with 20 randomly chosen points the overall RF exposure in the frequency range from 100 kHz to 3 GHz (including TETRA BOS) was measured. The TETRA BOS exposure contributed power related on average with about 30 % to the overall RF exposure. Exposures to non mobile radio related source (i.e. radio and TV stations) contributed only to a small amount to the overall RF exposure.

Long term measurements over 24 hours on a rural and urban TETRA BOS station show a nearly time constant exposure level, which is caused by the time constant signalisation (MCCH). The MCCH channel produces a permanent exposure in contrast to analogue BOS stations, where an exposure only exists during intervals of transmitting a voice signal.

It can be concluded, that the base stations of the novel cellular mobile radio techniques LTE and TETRA BOS cause an exposure increase to the general public. The overall exposure to fixed radio transmitters, however, is still low (median smaller than 2 %of the field strength limit). At the investigated base stations the power related mobile phone exposure increase was 37 % for LTE and 47 % for TETRA BOS, both related to maximal operational state of the station. On average a 22 % contribution of LTE and 30 % of TETRA BOS to the overall RF exposure was measured. These values are representative primarily for the direct vicinity of the chosen stations and should not be interpreted as area or population averaged exposure increase.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	12
1.1	Zielsetzung des Forschungsvorhabens	12
1.2	Einordnung des vorliegenden Abschlussberichtes	12
2	Untersuchung von codeselektiven Messtechniken zur	
	Erfassung von LTE-Immissionen	13
2.1	Rohde & Schwarz	13
2.2	Narda	14
2.3	Vergleichsmessungen	16
2.3.1	Feldtests	16
2.3.2	Labortests	23
2.3.3	Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse	29
2.4	Erprobungsmessungen im Feld	30
2.4.1	Verwendung verschiedener Messantennen	31
2.4.2	Vergleich der Messmethoden	33
2.4.3	Auswirkung der beschränkten Dynamik der codeselektiven Messtechnil der Provie	k in
211	Codosoloktivo Mossung von PS im Vorgloich zu P.SS hzw. S.SS	40
2.4.4	Schlussfolgerungen aus den Erprobungsmessungen im Feld	42 16
2.4.0	Bostimmung und Analyse von LTE Immissionen	0 <i>ب</i>
3		40
3.1	Messergebnisse in 11 verschiedenen Szenarien	48
3.1.1	Niedrig montierte Station im städtischen Umfeld	53
3.1.2	Hoch montierte Station im städtischen Umfeld	61
3.1.3	LTE-Anlage auf einem Gebäudedach und Ermittlung der Immission im selben Gebäude (Dämpfungsverlauf)	68
3.1.4	LTE-Anlage auf einem Gebäudedach und Ermittlung der Immission im gegenüberliegenden Gebäude (Höhenabhängigkeit)	76
3.1.5	Indoor-Versorgung	83
3.1.6	Niedrig montierter Dachstandort im ländlichen Umfeld (Ortsrand)	91
3.1.7	Niedrig montierter Dachstandort im ländlichen Umfeld (Ortsmitte)	98
3.1.8	Sehr niedrig montierter Dachstandort im ländlichen Umfeld (Wohngebie	t) 105
3.1.9	Hoher Maststandort im ländlichen Umfeld (Ortsmitte)	113
3.1.10	Hoher Maststandort im ländlichen Umfeld (Ortsrand)	117
3.1.11	Hoher freistehender Maststandort im ländlichen Umfeld	124
3.2	Untersuchung von Einflussfaktoren für die Größe der Immission.	129
3.2.1	Allgemeine Eigenschaften der Messergebnisse	131
3.2.2	Lateraler Abstand des Messpunktes zur Sendeanlage	134
3.2.3	Einfluss des Vertikalwinkels	135
3.2.4	Einfluss der Sichtverhältnisse	136
3.2.5	Einfluss des Frequenzbereichs	136
3.3	Vergleich von LTE-Immissionen zu anderen Funkdiensten	138

3.3.1	Vergleich von LTE- und GSM-/UMTS-Immissionen	138			
3.3.2	Anteil der LTE-Immission an der Gesamtimmission	142			
3.3.3	Umwidmung eines Teils des DVB-T-Frequenzbereichs für LTE-800	143			
3.4	Langzeitmessungen	48			
3.4.1	Städtisches Szenario	148			
3.4.2	Ländliches Szenario	150			
3.5	Momentanimmission bei unterschiedlichen Auslastungszuständen o LTE-Basisstation	der 152			
36	Immission durch Basisstationen von Femtozellen	156			
261		156			
262	UMTS-Eomtozollo im Büroumfold	150			
262	UMTS-Fomtozollon in Tolofonlädon	162			
3.0.3	7usammenfassung	168			
37	Exposition durch TE-Endgeräte	171			
3.1 2.7.1		171			
3.7.1	Vorgenensweise	171 171			
л	Restimmung und Analyse von TETPA ROS Immissionen 1	79			
-	Messenschniege in Evenesciedenen Constraint	10			
4.1	Messergebnisse in 5 verschiedenen Szenarien	1/0			
4.1.1	Anlage auf einem Mast im stadtischen Umfeld	181			
4.1.2	Anlage auf einem Gebaudedach im Stadtischen Umfeld.	190			
4.1.3	Anlage auf einem Wesserturm im ländlichen Umfeld	190			
4.1.4	Anlage auf einem wassertunn im lanunchen Onneid	204			
4.1.5	Anage auf einem neistenenden mast im landinchen Onneid	203			
4.2	Allegeneine Sizeneeheften der Messenrehnisse	213			
4.2.1	Aligemeine Eigenschaften der Messergebnisse	215			
4.2.2	Lateraler Abstand des Messpunktes zur Sendeanlage	211			
4.2.3 1 2 1	Einfluss des Verükaiwinkeis	210 220			
4.2.4 1 2		220			
4.5		- <u>-</u>			
4.3.1	Stadtisches Szenario	221 222			
4.3.2 4.4	Vergleich TETRA BOS zu Analog BOS	222			
4.5	Vergleich von TETRA BOS-Immissionen zu anderen Funkdiensten	227			
451	Veraleich von TETRA BOS-Immission und GSM-/UMTS-Immissionen	- <u>-</u> . 227			
4.5.2	Anteil der TETRA BOS-Immission an der Gesamtimmission	228			
5	Bedeutung der Projektergebnisse für die Normung2	29			
Danksa	ngung2	29			
Literaturverzeichnis					
Abkürz	ungsverzeichnis 2	31			
Voracia	hnic häufig vorwandatar Symbola	20			
verzeic	anns naung verwendeter Symbole2	JZ			

1 Einleitung

1.1 Zielsetzung des Forschungsvorhabens

Anlass des Forschungsvorhabens ist der fortschreitende Ausbau der Infrastruktur für die funkgestützte Telekommunikation in Deutschland. 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 wird jetzt um Informationen über die Beiträge neuer Funkdienste ergänzt und insgesamt weiter verbessert. 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 kann 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 Abschlussberichtes

In vorliegendem Abschlussbericht stehen die messtechnische Erfassung und die Auswertung von LTE und TETRA BOS Immissionen im Vordergrund.

Nach einem ausführlichen Vergleich zwischen codeselektiven und frequenzselektiven LTE-Messtechniken in Kapitel 2 werden in Kapitel 3 die Ergebnisse der Immissionsmessungen in 11 unterschiedlichen LTE-Szenarien an systematisch ausgewählten und zufällig ausgewürfelten ("statistischen") Messpunkten vorgestellt. Neben den LTE-Immissionen wurden auch die Immissionen der auf dem selben Standort installierten GSM- und/oder UMTS-Systeme mit erfasst, an einigen Messpunkten darüber hinaus auch die Mobilfunkimmissionen umliegender Anlagen sowie die Gesamtimmissionen im Hochfrequenzbereich 100 kHz bis 3 GHz. Die Messergebnisse werden statistisch ausgewertet und hinsichtlich des LTE-Immissionszuwachses zu den Mobilfunk- und Gesamtimmissionen im Hochfrequenzbereich untersucht. Eine besondere Beachtung erfährt dabei der Immissionsvergleich in vormals durch andere Funktechniken genutzten Frequenzbereichen, wie z.B. DVB-T. Weiterhin werden 2 Langzeitmessungen über einen Zeitraum von 24 Stunden sowie Untersuchungen zu auslastungsabhängigen Immissionsvariationen vorgestellt. Messtechnische Immissionserhebungen in Femtozellen-Szenarien sowie SAR-Messungen an 2 unterschiedlichen LTE-Endgeräten beschließen die Untersuchungen zu LTE.

In Kapitel 4 werden die Ergebnisse der Immissionsmessungen in 5 unterschiedlichen TETRA BOS-Szenarien an systematisch ausgewählten und zufällig ausgewürfelten ("statistischen") Messpunkten vorgestellt. Die Messungen der zeitlich und örtlich maximierten Immissionen werden durch Dosimetermessungen ergänzt. Die Messergebnisse werden statistisch ausgewertet und zu den gesetzlichen Grenzwerten in Beziehung gesetzt. 2 Langzeitmessungen über einen Zeitraum von 24 Stunden sowie Messungen hinsichtlich der Immissionsänderung im Vergleich zum analogen Behördenfunk beschließen die Untersuchungen zu TETRA BOS.

2 Untersuchung von codeselektiven Messtechniken zur Erfassung von LTE-Immissionen

Bereits im Zwischenbericht zu vorliegendem Forschungsvorhaben [BOR 12] wurde die codeselektive Messmethode bei LTE als sinnvolle Alternative zur frequenzselektiven Messmethode identifiziert. Bei der codeselektiven Messung ist es im Gegensatz zur frequenzselektiven Messung möglich, die Immissionsanteile verschiedener Stationen bzw. Sektoren (im Folgenden als Zellen bezeichnet) zu separieren. Dadurch können Unsicherheiten bei der Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung minimiert werden, die z.B. dadurch entstehen, dass verschiedene Zellen eines Betreibers im identischen Frequenzbereich (z.B. mehrere benachbarte Anlagen des Betreibers A im Frequenzband LTE-800) unterschiedliche Parameterkonfigurationen haben oder zeitlich nicht synchronisiert sind.

Zum Zeitpunkt des Zwischenberichtes (Januar 2012) war die Firma Rohde & Schwarz die einzige Firma, die ein codeselektives LTE-Messsystem für Immissionsmessungen kommerziell anbot. Dieses Messsystem ist in der Zwischenzeit optimiert worden und wird im Abschnitt 2.1 kurz vorgestellt. Auch die Firma Narda Safety Test Solutions bietet inzwischen eine codeselektive LTE Messoption für das frequenzselektive Feldstärkemesssystem SRM-3006 an, die im Abschnitt 2.2 vorgestellt wird. Beide Messsysteme wurden unter Feldbedingungen und Laborbedingungen ausführlichen Vergleichstests unterzogen, die in den Abschnitten 2.3 und 2.4 dokumentiert sind.

2.1 Rohde & Schwarz

Das 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]. Als Frontend für die codeselektiven Messungen dient der Universal Radio Network Analyser TSMW der Firma Rohde & Schwarz; die Messung wird über ein Notebook mit der Software RFEX gesteuert. 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.

In Erweiterung zu den ersten Untersuchungen der codeselektiven Messlösung "R&S®TS-EMF" in [BOR 12] wird nun nicht mehr nur die RS Immission durch die RS Resource Elemente in einem 1,08 MHz breiten Streifen um die Mittenfrequenz (d.h. die inneren 6 Resource Blocks) dokumentiert ("CenterRSRP" - Reference Signal Received Power pro Resource Element, Tabelle 2.1, Spalten 10 und 11), sondern es erfolgt auch die Angabe der antennenspezifischen über den inneren 6 RB ("NB_Rn" - Narrowband_Rn) oder der gesamten Signalbandbreite ("WB_Rn" – Wideband_Rn, Vorgabe durch Nutzer) gemittelten Empfangsleistung der RS. Für den Fall, dass (wie derzeit üblich) die Signale seitens der Basisstationen von der 2 Sendeantenne mit verschiedenen Polarisationen abgestrahlt werden (Polarisationsdiversity), werden die Werte antennenspezifisch für die Antenne 0 (eine Polarisationsebene, RS0) und die Antenne 1 (orthogonale Polarisationsebene, RS1) angegeben. Die jeweilige Antenne wird dabei in der Spalte "Tx Ant" dokumentiert.

Tabelle 2.1 zeigt die von RFEX ausgegebene Messdokumentation an einem Beispiel der in Abschnitt 2.3 dokumentierten Vergleichsmessungen. Bei der Messung wurden 3 Zellen gefunden (CellID 123, 205 und 206), deren mittlere Empfangspegel der RS über die gesamte

Signalbandbreite in den Spalten 3 und 4 ("WB_Rn") angegeben sind. Als Antennenfaktor wurde "0 dB/m" gewählt, so dass alle in der Einheit "dB μ V/m" dokumentierten Werte den gemessenen Spannungswerten in "dB μ V" entsprechen. Für die Zelle 123 ergibt sich beispielsweise als RS-Immission vom Antennenport 0 ("RS0") ein Wert von 43,0 dB μ V/m und als RS-Immission vom Antennenport 1 ("RS1") ein Wert von 42,4 dB μ V/m.

Cell ID	Frequency	WB Rn	WB Rn	Limit L	S-SYNC	S-SYNC	P-SYNC	P-SYNC	CenterRSRP	CenterRSRP	S-/P-SYNCRat	Tx Ant
	[MHz]	 [V/m]	[dBµV/m]	[V/m]	[V/m]	[dBµV/m]	[V/m]	[dBµV/m]	[V/m]	[dBµV/m]	[dB]	
123	1815,0000	1,41E-04	43,00	58,60E+00	16,53E-04	64,37	17,02E-04	64,62	1,43E-04	43,12	-0,35	0
123	1815,0000	1,32E-04	42,44	58,60E+00	16,53E-04	64,37	17,02E-04	64,62	1,43E-04	43,12	-0,35	1
205	1815,0000	76,08E-06	37,62	58,60E+00	14,51E-04	63,23	14,78E-04	63,39	1,21E-04	41,67	0,00	0
205	1815,0000	59,58E-06	35,50	58,60E+00	14,51E-04	63,23	14,78E-04	63,39	1,21E-04	41,67	0,00	1
206	1815,0000	7,78E-06	17,82	58,60E+00	1,33E-04	42,50	1,33E-04	42,50	14,31E-06	23,11	0,00	0
206	1815,0000	5,14E-06	14,22	58,60E+00	1,33E-04	42,50	1,33E-04	42,50	14,31E-06	23,11	0,00	1
	Total Exposu	re Ratios										
	Total Field St	rength R0 (RMS)	1,61E-04	V/m								
	Total Field St	rength R1 (RMS)	1,45E-04	V/m								
	Max. Single \	/alue:	1,41E-04	V/m								

Tabelle 2.1:Beispiel für die Dokumentation einer codeselektiven LTE-Messung mit dem Messsystem Rohde & Schwarz "R&S[®]TS-EMF"

In der Regel werden die angezeigten Werte für "CenterRSRP" und "WB/NB_Rn" nicht übereinstimmen, da die CenterRSRP

- nicht zeitkontinuierlich, sondern zu diskreten Zeitpunkten gemessen wird,
- als Mittelwert aus beiden Antennen bei Polarisationsdiversity gebildet wird und
- nur innerhalb der inneren 6 RB gemessen werden und nicht wie im Falle von "WB_Rn" über eine vom Nutzer vorgegebene größere Bandbreite. Durch Mehrwegeausbreitungseffekte kann es vorkommen, dass die Immission der einzelnen RS über der gesamten Signalbandbreite nicht konstant ist.

Bei der Vorgabe der Bandbreite für eine Wideband-Messung ist darauf zu achten, dass diese nicht größer gewählt wird als die tatsächliche Kanal- bzw. Signalbandbreite der LTE-Station. Andernfalls würden in die Mittelung auch "fiktive" RS einbezogen, die nicht mehr vom Kanal umfasst werden, was den Mittelwert nach unten verzerrt.

In den Spalten 6 und 7 sind die Messergebnisse für die S-SS Immission (in V/m bzw. dBµV/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, und nicht pro Resource Element. Dies ist besonders dann zu beachten, wenn die Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung nicht auf Basis der RS, sondern auf Basis der P-SS oder S-SS erfolgen soll.

Das Messsystem "R&S[®]TS-EMF" wurde von der Firma Rohde & Schwarz für vorliegendes Projekt speziell zur vergleichenden Untersuchung von codeselektiven LTE-Messtechniken sowie für einige begleitende Feldmessungen unentgeltlich zur Verfügung gestellt.

2.2 Narda

Seit Frühjahr 2012 bietet auch die Firma Narda Safety Test Solutions die codeselektive Messung von LTE-Signalen als Option für das frequenzselektive Messsystem SRM-3006 an. Bild 2.1 zeigt das Ergebnisdisplay einer codeselektiven LTE-Messung mit dem SRM-3006.

Das SRM-3006 ermittelt - wie das TS-EMF - zellspezifisch die Feldstärke pro Resource Element der RS-Signale durch Mittelung über einen einstellbaren Frequenzbereich. Dabei werden alle in LTE spezifizierten Kanalbandbreiten im FDD-Mode (im Bereich von 1,4 bis 20 MHz) unterstützt. Wie beim TS-EMF ist auch hier darauf zu achten, dass die eingestellte Messbandbreite nicht größer ist als die Signalbandbreite des zu messenden LTE-Signals, da es sonst zu einer Unterbewertung der RS-Leistung kommt. Bei Abstrahlung der RS-Signale über mehrere Antennen (MIMO) ermöglicht das SRM-3006 eine antennenspezifische Erfassung der RS-Signale. Zusätzlich wird die Messung der P-SS- bzw. S-SS-Signale angeboten. Im Unterschied zum TS-EMF wird beim SRM-3006 auch bei den Synchronisationssignalen die Feldstärke pro Resource Element angegeben, so dass die Ergebnisse ohne Umrechnung mit den RS-Messwerten verglichen werden können.

Battery 14.10.	Battery:)(14.10.12 10:29:13		I GPS: 50°6'22.8" N Ant: 11°27'28.0" E Cable:		3AX 27M-3G Srv1 Stru	Tbl: D_Mobilfunk 1: ICNIRP GP
Table	View					
Index	Cell ID	No. Ant	Max (PSS)	Max (SSS)	Max (RS 0)	Max (RS 1)
1	300	2	67.47 dBµV/m	67.27 dBµV/m	65.89 dBµV/m	57.59 dBµV/m
2	302	2	66.05 dBµV/m	65.09 dBµV/m	61.29 dBµV/m	63.15 dBµV/m
	Total		69.62 dBµV/m	68.79 dBµV/m	66.92 dBµV/m	63.85 dBµV/m
	Analog		82.42 dBµV/m			
Isotro	pic					
Ľ	ΓE					
Fcent: MR:	1	806 MH 25 dBµV/r	z CBW: n Extr. Fact.: Cell Sync.:	1.4 MHz Sweep Tim Off Noise Supp Sync. CP Length:	e: 680 ms Prog r.: Off No. Normal AVG	gress: of Runs: HOLD b: 4

Bild 2.1: SRM-3006: Ergebnisdarstellung einer codeselektiven LTE-Messung

In obigem Bild wurden 2 Zellen eines LTE-800 Standortes von Vodafone (Mittenfrequenz: 806 MHz), die jeweils mit 2-Antennen-MIMO betrieben werden, erfasst. Neben den Feldstärkewerten der RS-Signale werden auch die Messergebnisse der Synchronisationssignale dargestellt. Hierbei wurde im Gerät die Max-Hold Funktion aktiviert ("MAX"), was bedeutet, dass die angezeigten Werte die größten Einzelwerte waren, die während der gesamten Messzeit aufgetreten sind. Die Maximalwerte werden benötigt, wenn man bei den Messungen die Schwenkmethode anwendet. Die Anzeige kann auch auf andere Ergebnisdarstellungen umgestellt werden (z.B. "MIN", "AVG"). Gemessen wurde hier mit einer Kanalbandbreite von 1,4 MHz, d.h. die RS-Symbole wurden nur über 1,08 MHz gemittelt, obwohl LTE-800 mit einer Signalbandbreite von 9 MHz arbeitet. Wie später noch gezeigt wird, erzielt man mit dieser minimalen Messbandbreite eine deutlich kleinere Sweepzeit (d.h. eine größere Messrate), ohne dass die Verlässlichkeit der Messergebnisse nennenswert verringert wird.

Die Messgeräte SRM-3000 und SRM-3006, mit denen schwerpunktmäßig die Feldmessungen dieses Berichts durchgeführt wurden, befinden sich im Besitz der Auftragnehmer.

2.3 Vergleichsmessungen

Im Juni 2012 wurden bei der Firma Rohde & Schwarz in München ausführliche Vergleichsmessungen zwischen den codeselektiven LTE-Messsystemen der Firmen Rohde & Schwarz (R&S[®]TS-EMF mit Software RFEX Softwarestand 6.1.37), sowie Narda (SRM-3006 mit codeselektiver Messoption, Firmware V1.3.0) durchgeführt. Diese fanden unter Feldbedingungen und unter Laborbedingungen statt und sind nachfolgend dokumentiert.

2.3.1 Feldtests

Die Messungen wurden an 2 Außenmesspunkten und einem Innenmesspunkt auf dem Gelände der Firma Rohde & Schwarz in München durchgeführt. In unmittelbarer Umgebung betreibt die Deutsche Telekom 2 LTE-1800 Anlagen bei der Mittenfrequenz 1815 MHz mit 20 MHz (Anlage 1) bzw. 15 MHz (Anlage 2) Kanalbandbreite (Zustand während der Messungen). Beide Anlagen verwenden MIMO in Form von Polarisationsdiversity, d.h. von einer Antenne werden 2 unterschiedliche Signale über 2 orthogonale Polarisationen gleichzeitig abgestrahlt. Die wichtigsten technischen LTE-Daten sind in Tabelle 2.2 zusammengefasst.

Anlage	Sektor 1		Sekt	or 2	Sektor 3	
	Ausrichtung	Cell-ID	Ausrichtung	Cell-ID	Ausrichtung	Cell-ID
Anlage 1	80°	124	200°	123	320°	125
Anlage 2	80°	205	200°	204	320°	206

 Tabelle 2.2:
 Technische Daten der untersuchten LTE-Anlagen

Messpunkt 1

Messpunkt 1 wurde so ausgewählt, dass dort die Immission *einer* der beiden Anlage dominiert. Zur Anlage 2 bestand Sicht (Entfernung ca. 233 m); der Messpunkt lag in etwa 10° Winkelausrichtung zur Anlage 2 (Turm in Bild 2.2) und damit etwa mittig zwischen Sektor 1 und 3 (etwas näher am Sektor 3). Die Anlage 1 war hingegen durch Gebäude abgeschattet.

In Bild 2.2 ist der Messaufbau dargestellt: Eine logarithmisch-periodische Antenne (Schwarzbeck USLP-9142) in vertikaler Polarisation, die auf dem Stativ befestigt war, wurde auf Anlage 2 ausgerichtet und über einen Power Divider mit 2 gleichlangen Kabeln an beide Messsysteme angeschlossen. Hierdurch konnte die Immission zeitgleich und ohne Kabelwechsel durch beide Systeme gemessen und direkt miteinander verglichen werden. Durch das Verwenden einer gemeinsamen Antenne können Kalibrierunterschiede der jeweiligen systemeigenen Antenne als Ursache für potenzielle Abweichungen der Messergebnisse beider Systeme ausgeschlossen werden. In der geräteinternen Auswertung wurde ein Antennenfaktor von "0 dB/m" eingegeben und das Ergebnis direkt als Empfangsleistung in dBm protokolliert.



Bild 2.2: Messaufbau der Vergleichsmessungen am Messpunkt 1, Feldtests

In einer ersten Testreihe wurde die Pegelvergleichbarkeit sowie die Messgeschwindigkeit und Reproduzierbarkeit der Messungen untersucht. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2.3 dargestellt. Als "Narrowband" wird eine Dekodierung der inneren 6 RB (1,08 MHz) bezeichnet; bei "Wideband" wurde eine Kanalbreite von 20 MHz (entsprechend einer Signalbreite von 18 MHz) eingestellt. Die "Sweep Time" bezeichnet die für einen kompletten Dekodierungszyklus notwendige Zeit und ist insbesondere für die Beurteilung der Eignung für die "Schwenkmethode" wichtig.

Parameter	Cell ID	Narda [dBm]		Rohde & Schwarz [dBm]	
Narrowband, Messung 1	205	RS0: -61,8	RS1: -64,2	RS0: -61,6	RS1: -63,9
Narda: 229 ms Sweep Time	206	RS0: -62,2	RS1: -64,0	RS0: -62,0	RS1: -63,7
R&S: 114 ms Sweep Time					
Narrowband, Messung 2	205	RS0: -61,6	RS1: -63,8	RS0: -61,4	RS1: -63,4
	206	RS0: -62,0	RS1: -64,3	RS0: -61,8	RS1: -64,1
Wideband, Messung 1	205	RS0: -63,7	RS1: -65,0	RS0: -64,3	RS1: -65,5
Narda: 2,2 s Sweep Time	206	RS0: -63,2	RS1: -65,1	RS0: -63,4	RS1: -65,5
R&S: 588 ms Sweep Time					
Wideband, Messung 2	205	RS0: -64,0	RS1: -65,2	RS0: -64,5	RS1: -65,8
	206	RS0: -63,4	RS1: -65,2	RS0: -63,8	RS1: -65,7

 Tabelle 2.3:
 Messergebnisse der Vergleichsmessungen am Messpunkt 1, erste Messreihe

Als Ergebnis der Messungen lässt sich feststellen, dass beide Systeme vergleichbare Messergebnisse liefern und eine hohe Reproduzierbarkeit gegeben ist. Auffällig ist, dass die

Wideband-Messung generell etwas kleinere Ergebnisse liefert als die Narrowband-Messung. Grund hierfür ist, dass Anlage 2 mit einer Kanalbandbreite von 15 MHz (bzw. Signalbandbreite von 13,5 MHz) betrieben wurde, beide Messsysteme aber auf eine Kanalbandbreite von 20 MHz (Signalbandbreite 18 MHz) eingestellt waren. In die mittlere Leistung eines RS gehen somit auch Messwerte außerhalb des Spektrums ein. Theoretisch wäre also eine Fehlbewertung von 10·log(18 MHz / 13,5 MHz) = 1,2 dB zu erwarten, die in etwa mit den beobachteten Abweichungen übereinstimmt. Da der Betrieb einiger Anlagen auf 15 MHz (anstatt 20 MHz) einen beim LTE-Rollout nicht unüblichen Zustand darstellt, sollte vor Beginn der Messungen z.B. mit einer spektralen Messung eine Überprüfung über die derzeit belegte Signalbandbreite erfolgen, um Mess- bzw. Hochrechnungsfehler zu vermeiden. Die Situation wird dann verkompliziert, wenn wie im vorliegenden Fall im Einwirkungsbereich mehrere Anlagen eines Betreibers gemessen werden, die mit unterschiedlichen Signalbandbreiten arbeiten. In diesem Fall überlagern sich die Spektren und es ist nicht immer eindeutig, welche Signalbandbreite an welcher Station vorliegt. In so einem Fall kann es sinnvoll sein, bei der Messung nur die inneren 6 RB zu dekodieren (Narrowband-Messung), da die hierbei erfassten RS unabhängig von der realen Bandbreite der Anlage immer vorhanden sind.

Eine Narrowband-Messung hat gegenüber einer Wideband-Messung auch den Vorteil einer höheren Dekodiergeschwindigkeit, wie aus Tabelle 2.3 ersichtlich ist. Dabei ist das Rohde & Schwarz System im Dekodiervorgang schneller als das Narda-System (Faktor 2,0 bei Narrowband und 3,7 bei Wideband). Es ist jedoch zu beachten, dass die konkreten Dekodierzeiten auch noch von anderen Parametern abhängen, da bei den Folgemessungen auch geringfügig andere Werte ermittelt wurden. So ist nach Angaben von Rohde & Schwarz die Dekodiergeschwindigkeit beispielsweise auch von der Performance des verwendeten PCs abhängig.

Die absolute Pegelgenauigkeit wird später anhand der Labormessungen untersucht, da diese unter reproduzierbareren Bedingungen bei bekannten EPRE-Einstellungen stattfanden.

In einer zweiten Testreihe wurde die absolute Dynamik der Messsysteme untersucht. Hierzu wurde der Aufbau der Testreihe 1 beibehalten, wobei in die Antennenleitung Dämpfungsglieder geschaltet wurden. Die Dämpfung wurde so lange erhöht, bis die Geräte keine bzw. keine sinnvollen Messwerte mehr ausgaben. Die Messungen wurden wiederum im Narroband- und im Wideband-Modus durchgeführt. Die Ergebnisse sind in den beiden nachfolgenden Tabellen dargestellt.

Narrowband-Modus (Dekodierbandbreite 1,08 MHz)									
Parameter	Cell ID	Narda [dBm]	Rohde & Schwarz [dBm]						
Dämpfung 40 dB	205	RS0: -102,2 RS1: -103,7	RS0: -101,8 RS1: -103,7						
	206	RS0: -102,4 RS1: -104,5	RS0: -102,3 RS1: -104,1						
Dämpfung 50 dB	205	RS0: -111,8 RS1: -112,7	RS0: -111,5 RS1: -113,7						
	206	RS0: -112,1 RS1: -114,7	RS0: -112,4 RS1: -113,9						
Dämpfung 60 dB	205	keine Anzeige mehr	RS0: -119,6 RS1: -123,1						
	206		RS0: -121,6 RS1: -122,1						
Dämpfung 70 dB	205	keine Anzeige mehr	RS0: -127,5 RS1: -132,5						
	206		RS0: -131,5 RS1: -129,7						
Dämpfung 80 dB	205	keine Anzeige mehr	RS0: -134,0 RS1: -124,4						
	206		RS0: -134,1 RS1: -138,5						

Tabelle 2.4a: Messergebnisse der absoluten Dynamikmessungen, Narrowband-Modus

Wideband-Modus (Dekodierbandbreite 18 MHz)									
Parameter	Cell ID	NARDA [dBm]	Rohde & Schwarz [dBm]						
Dämpfung 40 dB	205	RS0: -104,3 RS1: -105,3	RS0: -104,8 RS1: -106,1						
	206	RS0: -103,5 RS1: -105,4	RS0: -104,0 RS1: -105,9						
Dämpfung 50 dB	205	RS0: -119,4 RS1: -120,6	RS0: -115,8 RS1: -117,6						
	206	RS0: -116,4 RS1: -118,5	RS0: -115,0 RS1: -116,8						
Dämpfung 60 dB	205	keine Anzeige mehr	RS0: -125,9 RS1: -127,8						
	206		RS0: -125,4 RS1: -126,8						
Dämpfung 70 dB	205	keine Anzeige mehr	keine Anzeige mehr						
	206								
Dämpfung 80 dB	205	keine Anzeige mehr	keine Anzeige mehr						
	206								

Tabelle 2.4b: Messergebnisse der absoluten Dynamikmessungen, Wideband-Modus

Als Ergebnis lässt sich feststellen, dass das Rohde & Schwarz-System absolut gesehen etwas empfindlicher als das Narda-System ist. Der Empfindlichkeitsvorteil beträgt bei der Narrowband-Messung, sofern als Kriterium eine *Anzeige von Daten* herangezogen wird, etwa 30 dB. Allerdings werden die Daten bei abnehmendem Pegel innerhalb der 30 dB zunehmend ungenauer. Definiert man als Kriterium deswegen die *Genauigkeit* (z.B. als Abweichung der RS-Ergebnisse vom "Zielwert" von maximal 1,0 dB), so beträgt der reale

Empfindlichkeitsvorteil weniger als 10 dB. Offensichtlich führt der Wideband-Modus zu einer geringeren Empfindlichkeit des Systems in der Größenordnung 10 dB als der Narrowband-Modus.

Messpunkt 2

Messpunkt 2 wurde so ausgewählt, dass dort die Immissionen *beider* Anlagen in vergleichbarer Stärke vorliegen. Zur Anlage 1 bestand Sichtkontakt (Entfernung ca. 212 m); der Messpunkt liegt in etwa 165° Winkelausrichtung von Anlage 1 und damit nahe Sektor 2. Zur Anlage 2 bestand ebenfalls Sichtkontakt (Entfernung ca. 247 m); der Messpunkt liegt in etwa 40° Winkelausrichtung von der Anlage 2 und damit nahe Sektor 1. Die Messungen wurden jeweils gleichzeitig bei beiden Messsystemen gestartet und beendet, um eventuelle zeitlich variable Umweltbedingungen (Autos, Personen, durch Wind bewegte Bäume) für beide Systeme gleich zu erfassen.

In Bild 2.3 ist der Messaufbau dargestellt: Diesmal wurde als Messantenne eine vertikal polarisierte bikonische Antenne verwendet, die gegenüber der am Messpunkt 1 verwendeten logarithmisch-periodischen Antenne keine Vorzugsrichtung auf die eine oder andere Anlage aufweist. Eine Messung mit dem Spektrumanalysator ergab, dass beide Anlagen zeitlich synchronisiert arbeiteten (es waren keine "Geisterbilder" o.ä. im Zeitbereich ersichtlich).



Bild 2.3: Messaufbau der Vergleichsmessungen am Messpunkt 2 mit Blick zur Anlage 1

In einer dritten Testreihe wurde wiederum die Pegelvergleichbarkeit sowie die Messgeschwindigkeit und Reproduzierbarkeit der Messungen untersucht. Die Ergebnisse sind in nachfolgender Tabelle dargestellt.

Parameter	Cell ID	Narda [dBm]	Rohde& Schwarz [dBm]	
Narrowband, Messung 1	123	RS0: -65,2 RS1: -64,5	RS0: -64,8 RS1: -64,1	
Narda: 252 ms Sweep time	205	RS0: -64,0 RS1: -66,5	RS0: -63,8 RS1: -66,1	
R&S: 128 ms Sweep Time	206	RS0: -71,9 RS1: -74,4	RS0: -71,0 RS1: -73,7	
	124	nicht messbar	RS0: -77,2 RS1: -78,1	
Narrowband, Messung 2	123	RS0: -64,8 RS1: -63,7	RS0: -64,7 RS1: -63,4	
	205	RS0: -65,3 RS1: -66,9	RS0: -64,7 RS1: -66,3	
	206	nicht messbar	RS0: -71,5 RS1: -73,4	
	124	nicht messbar	RS0: -76,8 RS1: -79,1	
Narrowband, Messung 3	123	RS0: -64,0 RS1: -63,2	RS0: -63,9 RS1: -62,8	
	205	RS0: -64,4 RS1: -66,9	RS0: -65,2 RS1: -66,5	
	206	RS0: -73,7 RS1: -74,6	RS0: -71,5 RS1: -73,8	
	124	nicht messbar	RS0: -76,9 RS1: -79,0	
Wideband, Messung 1	123	RS0: -63,7 RS1: -64,3	RS0: -63,8 RS1: -64,3	
Narda: 2,2 s Sweep time	205	nicht messbar	RS0: -69,9 RS1: -71,9	
(Modus "SYNC")	206	nicht messbar	RS0: -79,4 RS1: -82,7	
R&S: 600 ms Sweep Time	124	nicht messbar	nicht messbar	
Wideband, Messung 2	123	RS0: -63,8 RS1: -64,3	RS0: -63,4 RS1: -64,2	
Narda "NO SYNC"	205	RS0: -68,9 RS1: -70,2	RS0: -68,4 RS1: -70,8	
(dann 5,5 s Sweep Time)	206	nicht messbar	RS0: -78,0 RS1: -81,6	
	124	nicht messbar	nicht messbar	
Wideband, Messung 3	123	RS0: -63,3 RS1: -64,2	RS0: -63,4 RS1: -64,2	
Narda "NO SYNC"	205	RS0: -67,8 RS1: -68,8	RS0: -67,7 RS1: -69,9	
	206	RS0: -76,6 RS1: -79,7	RS0: -79,2 RS1: -83,9	
	124	nicht messbar	nicht messbar	

 Tabelle 2.5:
 Messergebnisse der Vergleichsmessungen am Messpunkt 2

Wie schon bei den Messungen am Messpunkt 1 lässt sich feststellen, dass beide Systeme vergleichbare Messergebnisse liefern und eine hohe Reproduzierbarkeit gegeben ist. Wiederum ist die Dekodiergeschwindigkeit bei Rohde & Schwarz höher als beim Narda-System. Bei Narda lässt sich durch die Betriebsart "NO SYNC" offenbar eine Empfindlichkeitsverbesserung erreichen, allerdings geht dies auf Kosten einer mehr als verdoppelten Messzeit. Bei beiden Systemen ist die Narrowband-Messung empfindlicher als die Wideband-Messung.

Im Gegensatz zu den Labormessungen (siehe Abschnitt 2.3.2) scheint eine relative Dynamik (maximale Pegeldifferenz zwischen 2 Signalen bei identischer Frequenz, die noch aufgelöst werden kann) von 15 dB (Narda) bzw. 20 dB (Rohde & Schwarz) möglich, allerdings kann die Genauigkeit der Messung und damit deren Validität hier nicht bewertet werden.

Messpunkt 3

Messpunkt 3 befindet sich in einem Laborraum und stellt eine reflektive Indoor-Umgebung ohne Sicht auf eine LTE-Anlage dar. An diesem Messpunkt wurden beide Systeme wiederum über ein und dieselbe bikonische Antenne gespeist, allerdings war diese nicht auf einem Stativ montiert, sondern es wurde ein Schwenkvorgang zur Erfassung des örtlichen Maximums durchgeführt. Die Messung wurde nur im Narrowband-Modus durchgeführt. Nachstehende Tabelle zeigt die Messergebnisse.

Parameter	Cell ID	Narda [dBm]	Rohde& Schwarz [dBm]
Narrowband, Messung 1	123	RS0: -86,8 RS1: -86,7	RS0: -86,4 RS1: -85,7
Narda: 260 ms Sweep time	124	RS0: -96,3 RS1: -95,3	RS0: -95,3 RS1: -94,9
R&S: 103 ms Sweep Time	125	RS0: -98,5 RS1: -100,7	RS0: -96,7 RS1: -95,9
	204	RS0: -102,3 RS1: -101,2	RS0: -96,8 RS1: -96,8
	205	RS0: -84,7 RS1: -84,3	RS0: -84,5 RS1: -84,5
	206	RS0: -87,9 RS1: -86,6	RS0: -88,1 RS1: -86,7
Narrowband, Messung 2	123	RS0: -90,0 RS1: -87,2	RS0: -89,6 RS1: -87,9
	124	RS0: -94,1 RS1: -94,9	RS0: -94,4 RS1: -94,8
	125	RS0: -101,8 RS1: -99,8	RS0: -98,3 RS1: -98,1
	204	RS0: -102,5 RS1: -103,1	RS0: -99,8 RS1: -100,0
	205	RS0: -85,7 RS1: -83,8	RS0: -82,9 RS1: -83,9
	206	RS0: -88,4 RS1: -88,1	RS0: -88,5 RS1: -87,9

Tabelle 2.6: Messergebnisse der Vergleichsmessungen am Messpunkt 3

Als Ergebnis lässt sich feststellen, dass auch in einer reflektiven Indoor-Umgebung ohne Sicht auf eine Basisstation beide Systeme vergleichbare Ergebnisse liefern. Die Pegel sind insgesamt etwa 20 dB kleiner als bei den Außenmessungen mit Sicht zu den LTE-Anlagen. Die Empfindlichkeit ist hier größer als am Messpunkt 2, da noch Immissionen von Zellen angezeigt werden, die bei den Messungen am Messpunkt 2 nicht mehr erfasst werden konnten. Hier zeigt sich deutlich das bereits erwähnte typische Verhalten der codeselektiven Messtechnik: Es werden nur Zellen dekodiert, die vom Pegel her bezüglich des stärksten Signals nicht zu schwach ausfallen. Am Messpunkt 3 fallen offensichtlich mehr Signale in dieses "Dekodierfenster". Zusätzlich machen sich die in Innenräumen immer vorhandenen starken Feldstärkeschwankungen (Interferenzen) bemerkbar, so dass immer wieder auch vergleichsweise schwache Signale detektiert werden können, wenn am aktuellen Messpunkt die eigentlich starken Signale ein Feldstärkeminimum besitzen. Anzumerken ist, dass bei sehr schwachen Pegeln (etwa ab -100 dBm) die Übereinstimmung zwischen beiden Systemen nachlässt, d.h. mindestens eines der Systeme wird hier ungenauer. Die Reproduzierbarkeit beider Messungen ist hier etwas geringer als bei den Außenmessungen mit Stativ; dies dürfte im durchgeführten Schwenkvorgang begründet liegen.

2.3.2 Labortests

Neben Feldtests wurden auch Labortests beider Messsysteme durchgeführt. Dazu wurden neben den zu testenden LTE-Messgeräten folgende Geräte verwendet:

- Rohde & Schwarz SMU 200A Vector-Signalgenerator mit LTE-Funktionalität
- Rohde & Schwarz FSL-6 Spektrumanalysator
- 2xPower Divider (Rohde & Schwarz sowie Agilent)
- Power Sensor mit Power Meter zur Messung der zeitlich gemittelten Leistung

An den Ausgang des SMU 200A wurden über den Power Divider gleichzeitig beide LTE-Messgeräte angeschlossen. Bild 2.4 zeigt den verwendeten Messaufbau.



Bild 2.4: Messaufbau der Vergleichsmessungen unter Laborbedingungen

In einer ersten Testreihe wurde überprüft, ob die Messsysteme den RS-Pegel des Signalgenerators korrekt erfassen und ob ein künstlich hinzu geschalteter Datenverkehr die Messergebnisse beeinflusst.

Am Signalgenerator wurden folgende Parameter eingestellt:

- LTE-Parametersatz "E_TM_1_1_20MHz", Mittenfrequenz 1815 MHz, 20 MHz Kanalbandbreite (18 MHz Signalbandbreite)
- eine Frequenz, ein Code (Cell ID 111), 2-Antennen-MIMO
- RS, P-SS und S-SS haben gleiche EPRE; P-SS und S-SS über eine Antenne
- wahlweise maximaler Verkehr oder ohne Verkehr (nur Signalisierung)

Aufgrund der Einstellungen ergaben sich am Signalgenerator folgende Werte:

- maximaler Verkehr: Level -30,0 dBm, RS power per RE relative to level display -30,6 dB, PEP -15,43 dBm, Sequence Length 10 frames
- ohne Verkehr: Level -30,0 dBm, RS power per RE relative to level display -21,2 dB, PEP -6,82 dBm

Die Ergebnisse der Messungen sind in nachfolgender Tabelle dargestellt. Hierbei sind noch die folgenden beiden Punkte zu berücksichtigen:

- Neben RS wurden nun auch die Empfangsleistungen der Synchronisierungen P-SS und S-SS gemessen. Beim Rohde & Schwarz System wurde die P-SS und S-SS Empfangsleistung, die in der Messsoftware über 62 RE summiert ausgegeben wird, auf ein RE herunter gerechnet, um direkt mit den Narda-Ergebnissen vergleichbar zu sein.
- Der verwendete Signalgenerator regelt im Zustand "maximaler Verkehr" die EPRE bei konstanter mittlerer Ausgangsleistung herunter. Die Differenz der EPRE kann dem Unterschied der "RS power per RE relative to level display" entnommen werden und beträgt hier 9,4 dB. In der Tabelle wurden die originären Messwerte bereits um diesen Wert korrigiert, damit die Messwerte der beiden Zustände "maximaler Verkehr" und "ohne Verkehr" direkt miteinander verglichen werden können.

Parameter	Narda [dBm]		Rohde & Schwarz [dBm]	
Max. Verkehr, Narrowband	RS0: -72,3	RS1: -72,3	RS0: -71,9	RS1: -71,9
Narda: 330 ms Sweep Time	PSS: -72,3	SSS: -72,3	PSS: -71,8	SSS: -71,8
R&S: 122 ms Sweep Time				
Max. Verkehr, Wideband	RS0: -71,9	RS1: -71,9	RS0: -71,9	RS1: -71,9
Narda: 5,2 s Sweep Time	PSS: -72,3	SSS: -72,3	PSS: -71,8	SSS: -71,8
R&S: 423 ms Sweep Time				
ohne Verkehr, Narrowband	RS0: -72,4	RS1: -72,3	RS0: -72,0	RS1: -72,0
	PSS: -72,4	SSS: -72,4	PSS: -71,9	SSS: -71,9
ohne Verkehr, Wideband	RS0: -72,0	RS1: -72,0	RS0: -72,0	RS1: -72,1
	PSS: -72,4	SSS: -72,4	PSS: -71,9	SSS: -71,9

 Tabelle 2.7:
 Messergebnisse der Vergleichsmessungen, Labormessungen, erste Messreihe

Zur Kontrolle wurde die Leistung am Eingang der Messsysteme mit einem Power Meter und einem Spektrumanalysator gemessen.

Bei "maximalem Verkehr" und im Zustand "ohne Verkehr" zeigt das Power Meter für das Gesamtsignal einen (zeitgemittelten) Wert von -38,5 dBm an. Rechnerisch würde sich daraus ein RS-Zielwert von etwa -72,1 dBm ergeben (max. Verkehr: RS power relative to

level display -30,6 dB sowie -3 dB durch Aufteilung der Leistung auf 2 Antennen), der sehr gut mit den Ergebnissen beider Geräte übereinstimmt.

Die Kontrolle mit dem Spektrumanalysator (Kanalleistungsmessung über der gesamten Signalbandbreite von 18 MHz) ergibt bei "maximalem Verkehr" einen Wert von -38,5 dBm an, der identisch zum Wert mit dem Power Meter ist.

Aus den Messungen lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten:

Beide Messsysteme geben bei unterschiedlichen Verkehrsauslastungen (ohne Verkehr und maximaler Verkehr) den Pegel der RS beider Antennen sowie P-SS/S-SS korrekt an. Der Datenverkehr beeinflusst also nicht die Genauigkeit der Messungen. Die Werte stimmen mit den theoretisch zu erwartenden Werten überein. Die Auswahl der zu dekodierenden Bandbreite hat keinen Einfluss auf die Messgenauigkeit.

Wie auch bereits bei den Feldmessungen beobachtet, ist das Rohde & Schwarz System im Dekodiervorgang schneller als das Narda-System. Narrowband-Messungen sind generell schneller als Wideband-Messungen.

In einer zweiten Testreihe wurde die absolute Dynamik überprüft (siehe zweite Messreihe der Feldmessungen am Messpunkt 1). Hierzu wurde die Ausgangsleistung des Signalgenerators in 5-10 dB Schritten so lange verringert, bis die Geräte keine bzw. keine sinnvollen Messwerte mehr ausgaben. Am Signalgenerator wurden folgende Einstellungen vorgenommen:

- LTE-Parametersatz "E_TM_1_1_20MHz", Mittenfrequenz 1815 MHz
- eine Frequenz, ein Code (Cell ID 111), 2-Antennen-MIMO
- RS, PSS und SSS gleiche EPRE; PSS und SSS über eine Antenne
- Modus "ohne Verkehr" (Leistungseinstellungen wie Messreihe 1)
- Messart Narrowband
- Variation der Generatorausgangsleistung in 5-10 dB Schritten
- Measurement Range des Narda-Systems wurde manuell angepasst

Die Ergebnisse der Messungen sind in Tabelle 2.8 dargestellt. Im Gegensatz zu Tabelle 2.7 erfolgt hier keine Korrektur der ausgegebenen Werte, da hier nur im Zustand "ohne Verkehr" gemessen wurde.

Parameter	Narda [dBm]		Rohde & Schwarz [dBm]		
Level: -30 dBm	RS0: -63,0	RS1: -62,9	RS0: -62,6	RS1: -62,6	
	PSS: -63,0	SSS: -63,0	PSS: -62,5	SSS: -62,5	
Level: -40 dBm	RS0: -73,0	RS1: -73,0	RS0: -73,1	RS1: -73,1	
	PSS: -73,0	SSS: -73,0	PSS: -73,0	SSS: -73,0	
Level: -50 dBm	RS0: -83,0	RS1: -83,0	RS0: -83,1	RS1: -83,1	
	PSS: -83,0	SSS: -83,0	PSS: -83,1	SSS: -83,0	
Level: -60 dBm	RS0: -93,0	RS1: -93,0	RS0: -93,1	RS1: -93,1	
	PSS: -93,0	SSS: -93,0	PSS: -93,0	SSS: -93,0	
Level: -70 dBm	RS0: -102,9	RS1: -102,9	RS0: -103,1	RS1: -103,1	
	PSS: -102,9	SSS: -102,8	PSS: -102,9	SSS: -102,9	
Level: -80 dBm	RS0: -112,8	RS1: -112,7	RS0: -113,1	RS1: -113,1	
	PSS: -112,4	SSS: -112,6	PSS: -112,6	SSS: -112,5	
Level: -85 dBm	RS0: -117,7	RS1: -117,5	RS0: -117,8	RS1: -117,9	
	PSS: -116,7	SSS: -116,9	PSS: -117,1	SSS: -117,1	
Level: -90 dBm	keine Anzeige	mehr	RS0: -122,7	RS1: -122,8	
			PSS: -121,2	SSS: -121,2	
Level: -100 dBm	keine Anzeige mehr		RS0: -131,6	RS1: -131,7	
			PSS: -132,1	SSS: -131,8	
Level: -110 dBm	keine Anzeige	mehr	RS0: -141,4	RS1: -124,4	
			PSS: -139,8	SSS: -138,9	

Tabelle 2.8:Messergebnisse der absoluten Dynamikmessungen, Labormessungen im
Narrowband-Modus, ohne Verkehr

Wie bei den Feldtests zeigt sich, dass das Rohde & Schwarz-System absolut gesehen etwas empfindlicher als das Narda-System ist. Der Empfindlichkeitsvorteil beträgt, sofern als Kriterium eine *Anzeige von Daten* herangezogen wird, etwa 25 dB. Allerdings werden die Daten bei abnehmendem Pegel innerhalb der 25 dB zunehmend ungenauer. Definiert man als Kriterium hingegen die *Genauigkeit* (z.B. als Abweichung der RS-Ergebnisse vom "Zielwert" von maximal 1,0 dB), so beträgt der reale Empfindlichkeitsvorteil etwa 5 dB.

Diese Ergebnisse bestätigen die Erkenntnisse der Feldtests. Die absolute Empfindlichkeit beider Systeme ist für Vorort-Expositionsmessungen völlig ausreichend.

In einer dritten Testreihe wurde die relative Dynamik unter Laborbedingungen untersucht. Im Gegensatz zu den Feldmessungen konnte hier ein zweites Signal mit anderer Cell-ID auf derselben Frequenz definiert solange im Pegel variiert werden, bis das Messsystem das

zweite Signal nicht mehr auflösen kann. Im Gegensatz zu den ersten beiden Messreihen der Labormessungen wurde kein MIMO verwendet, sondern 2 Signale (Cell ID 111 und 10) mit dem Signalgenerator erzeugt und über einen Power Divider zusammengeführt, bevor sie dann über einen zweiten Power Divider auf beide Messsysteme aufgeteilt wurden. Nachfolgend sind die Einstellungen des Signalgenerators aufgeführt:

- LTE-Parametersatz "E_TM_1_1_20MHz", Mittenfrequenz 806 MHz
- eine Frequenz, 2 Codes (Cell ID 111 und 10), kein MIMO
- RS, PSS und SSS gleiche EPRE
- Messmodi "ohne Verkehr" und "maximaler Verkehr" (Sequence Length 10 frames sowie Dummy-Daten)
- Messart Narrowband
- Cell ID 111: Level -30 dBm, RE relative to Level -21,208 dBm, PEP -10,65 dBm
- Cell ID 10: Anfangs-Level -30 dBm, RE relative to Level -21,208 dBm, PEP -9,84 dBm

Parameter	NARDA [dBm]	Rohde & Schwarz [dBm]	
111: Level -30 dBm	RS0: -65,1	RS0: -65,2	
10: Level -30 dBm	RS0: -65,1	RS0: -65,2	
111: Level -30 dBm	Es kann nur noch das stärkste	RS0: -65,4	
10: Level -40 dBm	Signal dekodiert werden (letzte	RS0: -75,3	
111: Level -30 dBm 10: Level -50 dBm	zuverlässige Dekodierung beider Signale bei 9 dB Unterschied)	RS0: -65,3 RS0: -84,5	

 Tabelle 2.9a:
 Messergebnisse der relativen Dynamikmessungen, Labormessungen im Narrowband-Modus, ohne Verkehr

Die Messergebnisse ohne Verkehr zeigen, dass das Narda-System unterschiedliche Signale nur bis zu einem maximalen Unterschied von 9 dB separieren kann. Hierfür ist der Modus "NO SYNC" zu bevorzugen, da im anderen Modus "SYNC" die Ergebnisse schlechter waren. Das Rohde & Schwarz-System ist hingegen in der Lage, unterschiedliche Signale bis zu einem maximalen Pegelunterschied von mindestens 20 dB zu separieren.

Die Messungen wurden mit "maximalem Verkehr" wiederholt, wobei in einer ersten Messreihe die Verkehrsdaten mit einer Periodizität von 10 Rahmen erzeugt wurden. Hierbei zeigte sich, dass beim Narda-System nur noch Signale mit einem maximalen Pegelunterschied bis zu 3 dB sauber separiert werden können; ab einer Differenz von 4 dB wurde das schwächere Signal nur selten gefunden. Beim Rohde & Schwarz-Messsystem liegt die Grenze bei einem Pegelunterschied von 8 dB, ab 9 dB wird das schwächere Signal nicht mehr gemessen. Bei diesen Messungen ist allerdings zu berücksichtigen, dass der Signalgenerator seine Verkehrsdaten in einer Periodizität von 10 Frames wiederholt und es sich hierbei streng genommen nicht um ein reales Signal, sondern ein "künstliches Signal" handelt. Deswegen wurden in einem zweiten Versuch "zufällige" Dummy-Daten durch den Signalgenerator erzeugt. Das Ergebnis ist in nachfolgender Tabelle dargestellt:

Parameter	Cell ID	NARDA [dBm]		Rohde & Schwarz [dBm]
		Noise red. off	NR on (6 dB)	
Differenz	111	RS0: -74,2	RS0: -74,1	nicht gemessen
0 dB	10	RS0: -74,1	RS0: -73,9	
Differenz	111	RS0: -74,1	RS0: -74,1	nicht gemessen
3 dB	10	RS0: -76,9	RS0: -76,8	
Differenz	111	RS0: -74,3	RS0: -74,3	nicht gemessen
4 dB	10	RS0: -77,7	RS0: -77,6	
Differenz	111	RS0: -74,3	RS0: -74,4	nicht gemessen
5 dB	10	RS0: -78,1	RS0: -78,1	
Differenz	111	RS0: -74,4	RS0: -74,3	nicht gemessen
6 dB	10	RS0: -79,2	RS0: -79,2	
Differenz	111	instabil	instabil	RS0: -74,9
7 dB	10			RS0: -81,6
Differenz	111	zweites Signal nicht	zweites Signal nicht	RS0: -74,9
9 dB	10 erkannt		erkannt	RS0: -83,3

 Tabelle 2.9b:
 Messergebnisse der relativen Dynamikmessungen, Labormessungen im Narrowband-Modus, maximaler Verkehr ("Dummy"-Daten)

Mit Dummy-Daten können beim Narda-System Signale mit einem maximalen Pegelunterschied bis zu etwa 6 dB separiert werden. Ab einem Unterschied von 7 dB werden die Ergebnisse instabil. Die Genauigkeit der Ergebnisse nimmt bei zunehmender Pegeldifferenz ab. Die Einstellung "Noise reduction" (NR) hat keinen Einfluss auf die Genauigkeit bzw. die relative Dynamik.

Beim Rohde & Schwarz-Messsystem liegt die relative Dynamikgrenze bei einem Pegelunterschied von etwa 9 dB.

Als Fazit lässt sich feststellen, dass die relative Dynamik beider Messsysteme offenbar ein kritischer Parameter von LTE-Messungen ist. Wohingegen das Rohde & Schwarz-System im Zustand "ohne Verkehr" noch in der Lage ist, unterschiedliche Signale bis zu einem Pegelunterschied von mindestens 20 dB zu separieren, sinkt diese Grenze bei "maximalem Verkehr"

auf 9 dB ab. Beim Narda-System werden im Zustand "ohne Verkehr" 9 dB erreicht und bei "maximalem Verkehr" 3-6 dB (der bessere Wert bei zufallsbasierten Daten).

Einschränkend ist jedoch zu vermerken, dass diese Untersuchungen an einem Signalgenerator gemacht wurden, dessen "künstliche" LTE-Signale nicht unbedingt für die von Basisstationen im Realbetrieb erzeugten Signale repräsentativ sein müssen. Die Algorithmen zur Auswertung von LTE-Signalen nutzen bekannte Periodizitäten. Generatorsignale enthalten normalerweise auch bei simulierten Daten hohe periodische Anteile, die in der Realität nicht auftreten. Diese periodischen Anteile sind periodischen Symbolen wie P-SS und S-SS und RS überlagert. Dies könnte bei simuliertem Datenverkehr mit einem Generator zu Werten bei Empfindlichkeit und Dynamik führen, die deutlich von der Praxis im Feld abweichen. Bei den Feldmessungen wurden beispielsweise auch Pegelunterschiede bis 15 dB vom Narda-System erkannt. Für diesen Aspekt ergibt sich weiterer Untersuchungs- und ggf. auch Optimierungsbedarf, um zu prüfen, wie groß die tatsächlich erzielbare relative Dynamik unter Feldbedingungen (realer Datenverkehr) ist.

2.3.3 Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse

Die Ergebnisse der codeselektiven Vergleichsmessungen mit den Messsystemen Rohde & Schwarz "R&S[®]TS-EMF" und Narda SRM-3006 unter Feld- und Laborbedingungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Feldtests

- Unter vergleichbaren Bedingungen (beide Systeme sind an dieselbe einachsige Messantenne angeschlossen) sind die Ergebnisse beider Messsysteme vergleichbar und reproduzierbar.
- Das Rohde & Schwarz System ist im Dekodiervorgang etwa 2-4 mal schneller als das Narda-System (genaue Werte jedoch noch von weiteren Parametern abhängig). Narrowband-Messungen sind generell schneller als Wideband-Messungen. Bei Narrowband-Messungen kann die Schwenkmethode bei beiden Systemen sinnvoll angewendet werden.
- Bei der Einstellung der Messbandbreite ist zu beachten, dass einige LTE-Anlagen im 1,8 GHz Band mit einer Kanalbandbreite von 15 MHz betrieben werden können (und zwar auf derselben Mittenfrequenz wie benachbarte 20 MHz Anlagen desselben Betreibers). Die Auswahl einer 20 MHz Dekodierbandbreite (als Kanalbandbreite bzw. 18 MHz als Signalbandbreite) kann hier bei der Hochrechnung zu einer Unterschätzung der maximal möglichen Immission führen. Aus diesem Grund ist eine schmalbandige Messung (1,4 MHz Kanalbandbreite bzw. 1,08 MHz Signalbandbreite) von Vorteil.
- Das Rohde & Schwarz-System ist absolut gesehen etwas empfindlicher als das Narda-System. Der reale Empfindlichkeitsvorteil liegt unter 10 dB. Die Wideband-Messung führt bei beiden Systemen zu einer geringeren Empfindlichkeit als die Narrowband-Messung. Beim Narda lässt sich durch die Betriebsart "NO SYNC" eine Empfindlichkeitsverbesse-

rung erreichen, allerdings auf Kosten einer mehr als verdoppelten Messzeit. Die Empfindlichkeiten beider Systeme sind für Immissionsmessungen völlig ausreichend.

- Im Gegensatz zu den Labortests scheint eine relative Dynamik von 15 dB (Narda) bzw.
 20 dB (Rohde & Schwarz) erreichbar zu sein, allerdings kann die Genauigkeit der Messung und damit deren Validität nicht bewertet werden.
- Auch in einer reflektiven Indoor-NLOS Umgebung sind die Ergebnisse beider Systeme vergleichbar. Anzumerken ist allerdings, dass bei schwachen Pegeln die Übereinstimmung zwischen beiden Systemen schlechter wird, d.h. mindestens eines der Systeme wird hier ungenauer.

Labortests

- Beide Messsysteme geben bei unterschiedlichen Verkehrsauslastungen die Stärke der RS beider Antennen und die P-SS/S-SS korrekt an. Der Verkehr beeinflusst also nicht die Genauigkeit der Messungen. Die Werte stimmen mit den theoretisch zu erwartenden Werten überein. Die Auswahl der zu dekodierenden Bandbreite hat keinen Einfluss auf die Messgenauigkeit.
- Das Rohde & Schwarz System ist im Dekodiervorgang schneller als das Narda-System. Narrowband-Messungen sind generell schneller als Wideband-Messungen.
- Das Rohde & Schwarz-System ist absolut gesehen etwas empfindlicher als das Narda-System. Der reale Empfindlichkeitsvorteil beträgt etwa 5 dB für die RS-Signale. Die absolute Empfindlichkeit beider Systeme ist für Vorort-Expositionsmessungen völlig ausreichend.
- Das Narda-System kann im Fall von "ohne Verkehr" unterschiedliche Signale nur bis zu einem maximalen Unterschied von 9 dB separieren. Hierfür ist der Modus "NO SYNC" zu bevorzugen, da im anderen Modus "SYNC" die Ergebnisse schlechter waren. Das Rohde & Schwarz-System ist hingegen in der Lage, unterschiedliche Signale bis zu einem maximalen Pegelunterschied von mindestens 20 dB zu separieren.
- Bei "maximalem Verkehr" sinkt diese relative Dynamik beim Rohde & Schwarz-System auf 9 dB ab. Beim Narda-System werden in diesem Zustand 3-6 dB (der bessere Wert bei zufallsbasierten Daten) erreicht. Einschränkend ist zu vermerken, dass diese Untersuchungen an einem Signalgenerator gemacht wurden, dessen "künstliche" LTE-Signale nicht unbedingt für die von Basisstationen im Realbetrieb erzeugten Signale repräsentativ sein müssen. Hier sind weitere Untersuchungen und ggf. Optimierungen notwendig, um zu überprüfen, ob diese Grenzen auch bei realen Verkehrsdaten unter Feldbedingungen gültig sind.

2.4 Erprobungsmessungen im Feld

Zusätzlich zu den Vergleichsmessungen mit den beiden derzeit am Markt verfügbaren codeselektiven Messsystemen wurden auch einige Erprobungsmessungen in der Umgebung von realen LTE-Sendeanlagen durchgeführt, um bezüglich folgender Fragestellungen nähere Erkenntnisse zu gewinnen:

- Liefern Messungen unter Verwendung einer einachsigen Messantenne vergleichbare Ergebnisse wie Messungen mit einer Isotropantenne?
- In wie weit ergeben sich bei Anwendung der beiden in [BOR 12] vorgeschlagenen Messmethoden (frequenzselektive Messung bzw. codeselektive Messung) vergleichbare Messergebnisse?
- Welche Auswirkungen auf die Ergebnisse einer Immissionsmessung hat die beschränkte relative Dynamik der codeselektiven Messmethode?
- Gibt es Unterschiede zwischen einer codeselektiven Messung der RS- bzw. Synchronisationssignale?

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden in den folgenden Abschnitten vorgestellt.

2.4.1 Verwendung verschiedener Messantennen

In der Umgebung eines Mobilfunkstandortes im ländlichen Umfeld, an dem eine LTE-800-Anlage (Betreiber 1) installiert ist, wurden an 5 Punkten in Bodennähe Immissionsmessungen mit dem SRM-3006 durchgeführt (Schwenkmethode). Dabei wurden die Messungen sowohl mit einer LogPer-Dipolantenne (Schwarzbeck USLP-9142), als auch mit der geräteeigenen 3-GHz-Isotropantenne vorgenommen und verglichen. Die Messpunkte waren zwischen 50 und 500 Meter vom Antennenstandort entfernt.



Bild 2.5: Messantennenvergleich: Anlagenstandort und Messpunkte

Tabelle 2.10 gibt die Messergebnisse für die 2 verwendeten Messantennen vergleichend wieder. Dabei wurde an jedem Punkt sowohl das codeselektive als auch das frequenzselektive Messprinzip angewendet.

	MP Nr.	1	2	3	4	5
Cell ID	Signal	Omni - USLP [dB]				
459	P-SS	-0,1	+1,0	+0,9	+0,8	-0,8
459	S-SS	+0,3	+1,0	+0,9	+0,8	-0,9
459	RS 0	-0,6	-1,6	-1,2	-1,0	-0,8
459	RS 1	+0,1	+0,1	-1,2	-0,3	-1,4
460	P-SS	-1,4	-	-	-	+5,1
460	S-SS	-1,8	-	-	-	+5,0
460	RS 0	-0,9	-	-	-	+4,9
460	RS 1	-1,3	-	-	-	+3,9
	Spektral	+0,3	+1,2	+0,7	+0,3	-1,7

Tabelle 2.10:Messantennenvergleich: Unterschied der Messungen mit der 3 GHz-Isotropantenne
des SRM-3006 und der einachsigen Antenne (USLP-9142) in dB

An 3 der 5 Messpunkte konnte codeselektiv nur eine der beiden am Standort installierten Funkzellen gemessen werden, da der Pegel der zweiten Zelle offensichtlich zu gering war. Die Messungen liefern hier durchgehend eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den beiden Antennen, was zum einen die gute Reproduzierbarkeit der Schwenkmethode bestätigt und andererseits darauf hindeutet, dass die Art der verwendeten Messantenne keinen signifikanten Einfluss auf das Messergebnis ausübt.

Die am Messpunkt 5 beim Signal der Zelle 460 aufgetretene größere Abweichung zwischen den beiden Messantennen ist darauf zurückzuführen, dass sich die codeselektive Messung mit der Isotropantenne aufgrund sehr geringer Signalstärke nahe an der Empfindlichkeitsgrenze bewegte und daher keine zuverlässigen Ergebnisse mehr lieferte.

Da die Abweichungen ansonsten nahezu symmetrisch um den Wert 0 dB streuen (Mittelwert = -0,4 dB), ist kein nennenswerter systematischer Fehler erkennbar. Die Standardabweichung der Differenzen liegt unter 1 dB.

Die für die Durchführung der Schwenkmethode notwendige Zeit ist für beide Messantennen in etwa gleich. Bei Verwendung der Isotropantenne sollte aufgrund der vergleichsweise geringen Messrate die Schwenkbewegung langsamer durchgeführt werden als bei Einsatz einer einachsigen Antenne. Die Messrate ist bei isotropen Antennen derartiger Messsysteme immer mindestens um etwa den Faktor 3 kleiner als bei Verwendung einer einachsigen Antenne, da die Isotropantennen intern aus drei räumlich orthogonal angeordneten einachsigen Antennen bestehen, die sequenziell mit dem Empfänger verbunden werden, so dass eine Isotropmessung immer aus 3 aufeinander folgenden einachsigen Messungen besteht. Dafür müssen bei der einachsigen Antenne nicht nur die Position, sondern auch die Ausrichtung und die Polarisationsebene variiert werden, um zuverlässig das Feldstärkemaximum zu erhalten, wodurch der Zeitvorteil der größeren Messrate nahezu wieder kompensiert wird.

Auch die mittels des "Level Recorder"-Modes an allen Messpunkten durchgeführte frequenzselektive Messung (letzte Zeile der Tabelle 2.10) liefert mit beiden Antennentypen eine sehr gute Übereinstimmung der Messergebnisse.

2.4.2 Vergleich der Messmethoden

In der Umgebung eines anderen Mobilfunkstandortes im ländlichen Umfeld, an dem sich eine LTE-800-Anlage (Betreiber 2) befindet, wurden an insgesamt 14 Punkten in Bodennähe Immissionsmessungen mit dem SRM-3006 durchgeführt (Schwenkmethode). Dabei wurden die Feldstärken sowohl codeselektiv als auch frequenzselektiv erfasst. Die Messpunkte waren zwischen 5 und 240 Meter vom Antennenstandort entfernt.



Bild 2.6: Vergleich der Messmethoden: Anlagenstandort und Messpunkte

Die Immissionsbestimmung wurde im Detail wie folgt durchgeführt (siehe auch [BOR 12]):

Codeselektive Messung:

An jedem Messpunkt wurde die Feldstärke der RS-Signale (RS 0 und RS 1, da die Anlage im MIMO-Mode betrieben wird) zellselektiv gemessen. Aus den vom Betreiber übermittelten Anlagendaten (Sendeleistung der RS-Symbole: 18,2 dBm = 66 mW pro Resource Element;

maximale Leistung pro MIMO-Kanal: 43 dBm = 20 W) kann der für die Extrapolation zu verwendende Faktor zu (43 - 18,2) dB = 24,8 dB ermittelt werden, mit dem die Summe aus RS 0- und RS 1-Immission zu vergrößern ist, um die Immission bei höchster betrieblicher Anlagenauslastung zu erhalten.

Frequenzselektive Messung:

An jedem Punkt wurde die Feldstärke ermittelt, die im zentralen Teil des Spektrums durch die regelmäßig auftretenden Synchronisationssignale erzeugt wird. Dazu eignet sich beim SRM-3006 besonders der "Level Recorder"-Mode. Das Messgerät wird dabei auf die Mittenfrequenz des LTE-Signals (hier 806 MHz) eingestellt, die ZF-Auflösebandbreite zu RBW = 800 kHz gewählt. Die RMS-Glättung erfolgt beim SRM-3006 mittels des Videofilters (VBW = 2 kHz). Extrapoliert auf die höchste betriebliche Anlagenauslastung wird durch einen Faktor, der sich als Quotient aus der Signalbandbreite (9 MHz bei LTE-800) und der äquivalenten Rauschbandbreite des verwendeten Zwischenfrequenzfilters (=768 kHz bei einer RBW von 800 kHz) errechnet. Somit beträgt der Extrapolationsfaktor für die frequenzselektive Messung 10,7 dB.

Die Ergebnisse der Vergleichsmessung sind in Tabelle 2.11 als hochgerechnete Werte wiedergegeben.

MP Nr.	Frequenzselektiv [dBµV/m]	Codeselektiv [dBµV/m]	Differenz [dB]
1	123,3	119,4	3,9
2	131,0	125,9	5,1
3	123,7	119,3	4,4
4	123,7	115,6	8,1
5	130,8	126,8	4,0
6	131,1	126,2	4,9
7	122,5	118,3	4,2
8	121,9	117,1	4,8
9	128,5	123,7	4,8
10	126,5	121,8	4,7
11	120,4	116,3	4,1
12	127,7	123,6	4,1
13	128,8	124,2	4,6
14	125,0	119,8	5,2

Tabelle 2.11:Vergleich der Messmethoden: Absolute Messergebnisse (hochgerechnet auf maxima-
le Anlagenauslastung), sowie Differenz (frequenzselektiv - codeselektiv) in dB
An allen Messpunkten liefert die frequenzselektive Messung signifikant höhere Resultate als das codeselektive Verfahren (im Mittel beträgt der Unterschied 4,8 dB). Die Ursache für diese Divergenz konnte jedoch schnell eingegrenzt werden. Auf Nachfrage teilte der Betreiber mit, dass bei diesem Standort die Synchronisationssignale (genauso wie die RS-Signale) gegenüber der mittleren Signalleistung um 3 dB angehoben sind.

Aufgrund dieser Tatsache müssen alle hier frequenzselektiv ermittelten und extrapolierten Immissionen um jeweils 3 dB verringert werden, da die Extrapolation im frequenzselektiven Verfahren die Annahme voraussetzt, dass alle Komponenten des LTE-Signals mit der gleichen Leistung abgestrahlt werden. Nach dieser Korrektur beträgt der Unterschied zwischen der (auf die Synchronisationssignale gestützten) frequenzselektiven und der (auf die Auswertung der RS-Symbole gestützten) codeselektiven Messung im Mittel nur noch 1,8 dB.

Da an einem Teil der Untersuchungspunkte dieses Projektes (siehe Kapitel 3) die LTE-Immission sowohl codeselektiv als auch frequenzselektiv ermittelt wurde, kann der Messmethodenvergleich auf eine größere Anzahl an Messpunkten und Standorten ausgedehnt werden. Damit werden die Ergebnisse belastbarer, als es bei Betrachtung nur eines Standortes der Fall ist. Insgesamt konnte dieser Vergleich für 6 Standorte, an denen Anlagen aller 3 derzeit präsenten LTE-Betreiber (Telekom, Vodafone, Telefónica) vorhanden sind, durchgeführt werden. Es handelt es sich dabei um 9 Anlagen mit insgesamt 23 LTE-800- und 3 LTE-1800-Funkzellen. Für den Vergleich standen die Messwerte von 150 Messpunkten zur Verfügung.



In Bild 2.7 ist das Resultat des Messmethodenvergleichs für die 150 Messpunkte dargestellt.



Auch bei diesen Messungen waren bei einigen Anlagen (alle Anlagen der Betreiber 2 und 3) die Synchronisationssignale gegenüber der mittleren Signalleistung um 3 dB angehoben. Die sich daraus für die frequenzselektive Messung ergebende Ergebniskorrektur ist in Bild 2.7 bzw. Tabelle 2.12 bereits berücksichtigt.

Anlage	Mittlerer Unterschied frequenzselektiv / codeselektiv [dB]		
Standort 1 (Betreiber 1)	-0,11		
Standort 2 (Betreiber 1) -2,12			
Standort 3 (Betreiber 1)	-2,25		
Standort 4 (Betreiber 1)	-1,38		
Standort 4 (Betreiber 2)	+1,76		
Standort 5 (Betreiber 1)	-0,70		
Standort 5 (Betreiber 2)	+0,71		
Standort 5 (Betreiber 3)	+1,78		
Standort 6 (Betreiber 1)	+1,68		

Tabelle 2.12:Vergleich der Messmethoden: Differenz (frequenzselektiv - codeselektiv) in dB als
Mittelwerte für die einzelnen betrachteten Anlagen

Betrachtet man zunächst nur die Anlagen des Betreibers 1, ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den beiden Messverfahren. Wie Tabelle 2.12 entnommen werden kann, liegt die mittlere Abweichung an den einzelnen Messorten bei Betreiber 1 in etwa im Bereich von ± 2 dB. Berechnet man für alle 100 Messpunkte des Betreibers die mittlere Abweichung zwischen den beiden Messverfahren, so ergibt sich ein Wert von -1,0 dB bei einer Standardabweichung von etwa 1,7 dB.

Bei manchen Standorten von Betreiber 1 liefert die codeselektive Messung im Mittel größere Ergebnisse, aber es tritt genauso der umgekehrte Fall ein. Auch gibt es Anlagen, bei denen der Unterschied nahezu verschwindet.

Im Vergleich ist die Tendenz der Messergebnisse für die Betreiber 2 und 3 leicht entgegengesetzt zu denen vom Betreiber 1. Es ergibt sich im Mittel ein Unterschied zwischen frequenzselektiver und codeselektiver Messung dergestalt, dass die frequenzselektive Messung (trotz Korrektur aufgrund der gegenüber der mittleren Signalleistung angehobenen Synchronisationssignale) im Mittel weiterhin etwas größere Werte liefert als das codeselektive Verfahren (Unterschiedsfaktor an den untersuchten Standorten etwa +1,4 dB). Dieser Trend wurde auch bei der in Tabelle 2.11 dokumentierten Messung an der Anlage des Betreibers 2 festgestellt, der Unterschiedsfaktor zwischen frequenz- und codeselektiver Messung lag dort im Mittel bei +1,8 dB.

Ein genauerer Blick auf die Ergebnisse der codeselektiven Messungen zeigte, dass bei diesen Anlagen die Synchronisationssignale signifikant höhere Feldstärkewerte lieferten als

die RS-Signale. Der Unterschied liegt hierbei typisch zwischen 2 und 3 dB. Eine Nachfrage beim Betreiber lieferte zunächst keine Erklärung für diesen Effekt. Laut Auskunft des Betreibers sind die Synchronisationssignale gegenüber den RS-Symbolen nicht angehoben, was durch den entsprechenden Parameter in der Konfigurationsdatenbank belegbar war (dieser Parameter definiert eine einstellbare Pegeldifferenz zwischen RS- und Synchronisationssignalen; er war auf 0 dB eingestellt).

Interessanterweise nutzen Betreiber 2 und 3 im untersuchten Gebiet Basisstationssystemtechnik eines anderen Herstellers als Betreiber 1. Es liegt also die Vermutung nahe, dass die Systemtechnik der unterschiedlichen Hersteller jeweils ein etwas unterschiedliches Verhalten aufweist, wodurch der beobachtete Einfluss auf die Ergebnisse der Expositionsmessungen hervorgerufen wird.

Nachdem von den beiden Betreibern keine Erklärung für diesen Effekt gegeben werden konnte, wurden weitere Messungen vorgenommen, um diesem Effekt näher auf den Grund zu gehen. Eine Messung der Synchronisationssignale im Zeitbereich (siehe Bild 2.8) lieferte schließlich Ergebnisse, die mit den bisherigen Angaben des Betreibers nicht erklärbar waren.



Bild 2.8: Zeitlicher Pegelverlauf der Synchronisationssignale (Betreiber 2). Messung mit einachsiger Antenne und unterschiedliche Polarisationsausrichtung

Bild 2.8 zeigt 2 Beispiele für den gemessenen zeitlichen Signalverlauf des zentralen Teils eines LTE-800-Spektrums vom Messpunkt 9 am Standort aus Bild 2.6 (Betreiber 2). Deutlich sind die Synchronisationssignale zu erkennen, die alle 5 ms auftauchen. Allerdings werden die aufeinander folgenden Synchronisationsimpulse offensichtlich jeweils mit deutlich unterschiedlichem Pegel ausgesendet. Eine Regelmäßigkeit mit einer Periode von 20 ms ist erkennbar. Das unterschiedliche Zeitverhalten lässt vermuten, dass die Synchronisationssignale von beiden Antennenebenen gleichzeitig abgestrahlt werden, allerdings nicht mit zeitlich konstantem, sondern von Impuls zu Impuls wechselndem Pegel. Bei konstantem Pegel müssten sich Pegelverläufe, wie in Bild 2.9 dargestellt, ergeben.

Die Hochrechnung auf maximale Anlagenauslastung geht bei der frequenzselektiven Methode davon aus, dass die Synchronisationssignale zeitlich konstant mit dem vom Betreiber angegebenen Pegel abgestrahlt werden. Obiges Bild zeigt jedoch, dass die Synchronisationssignale bei dieser Anlage zeitlich bei weitem nicht pegelkonstant sind. Durch den bei der Schwenkmethode verwendeten Max-Hold-Modus des Messgerätes bestimmen die Synchronisationspulse mit der größten Amplitude das Messergebnis, welches anschließend als Basis für die Hochrechnung auf maximale Anlagenauslastung herangezogen wird. Zum Vergleich zeigt Bild 2.9 den zeitlichen Verlauf der Synchronisationssignale, wie er in der Nähe einer Anlage vom Betreiber 1 gemessen wurde. Offensichtlich werden die Synchronisationssignale hier von den beiden Antennenpolarisationen mit zeitlich nicht wechselndem Pegel abgestrahlt. Je nach Ausrichtung der einachsigen Messantenne ergibt sich entweder ein Bild mit konstanten Impulsen (links) bzw. ein Bild mit Pulsen, die abwechselnd groß und klein sind. Beim linken Bild werden die beiden Polarisationsebenen in etwa gleich gut empfangen, beim rechten Bild ist die Messantenne bevorzugt auf eine der beiden Polarisationen ausgerichtet, so dass die zweite, räumlich dazu orthogonale Polarisation entsprechend schwächer empfangen wird. Am Standort dieses Betreibers konnten bei keiner Antennen-ausrichtung Pulsschemen mit mehr als 2 verschiedenen Pegelwerten (so wie in Bild 2.8 dargestellt) gefunden werden.



Bild 2.9: Zeitlicher Pegelverlauf der Synchronisationssignale (Betreiber 1). Messung mit einachsiger Antenne und unterschiedliche Polarisationsausrichtung

Um eventuelle Einflüsse der Luftschnittstelle auszuschließen, wurde zusätzlich das Hochfrequenzsignal einer realen LTE-Sendeanlage von Betreiber 2 am Senderausgang abgegriffen und direkt über Koaxialleitung mit dem SRM-3006 analysiert. Damit kann eine Beeinflussung der Pegelmesswerte durch ausbreitungsbedingte Unterschiede in der Pfaddämpfung bei den beiden Kanälen ausgeschlossen werden.

Die verwendete LTE-800-Basisstation war für eine Funkzelle mit 2-Antennen-MIMO konfiguriert. RS- und Synchronisationsleistung waren auf gleiche Werte eingestellt. Für die Messung wurden die HF-Ausgangssignale der beiden Antennenpfade zunächst separat gemessen. Anschließend wurden die beiden Signale mittels eines Powercombiners auf eine Leitung zusammengeführt und nochmals gemessen. Am Eingang des Messgerätes wurden die Signalpegel zusätzlich durch externe Dämpfungsglieder um 30 dB reduziert, damit das Messgerät nicht übersteuert oder gar zerstört wird. Die Messung lieferten die in Bild 2.10 dokumentierten Ergebnisse.



Bild 2.10: Leitungsgebundene Messung des zeitlichen Pegelverlaufs der Synchronisationssignale (Betreiber 2). Links oben: Antennenausgang A; rechts oben: Antennenausgang B; unten: Summensignal Kanal A+B am Ausgang des Combiners.

Eine zusätzlich durchgeführte codeselektive Messung am Ausgang des Combiners bestätigte den in Bild 2.10 dokumentierten instabilen Zeitverlauf der Synchronisationssignale. Die Referenzsignale RS 0 bzw. RS 1 hingegen zeigten keine zeitlichen Schwankungen.

Offensichtlich werden die Synchronisationssignale alle 5 ms in beiden Antennenpfaden generiert, jedoch bezüglich der Trägerphase von Puls zu Puls variiert: Sind die Träger beider Pulse phasengleich, summieren sie sich im Combiner konstruktiv, bei gegenphasigen Signalen ergibt sich im Idealfall eine Auslöschung bzw. (wie hier bei jedem vierten Puls zu beobachten) eine deutliche Amplitudenschwächung. Möglich ist hier offensichtlich auch ein Phasenunterschied von z.B. 90°, was zu einer nicht optimalen Summation der beiden Teilsignale führt.

Bei frequenzselektiven Messungen mit der Schwenkmethode (Max-Hold), die auf einer Auswertung der Synchronisationssignale basieren, kann es in der Umgebung von manchen LTE-Basisstationen somit zu einer Überbewertung der Immission kommen.

Auch bei Messungen an einem oder mehreren festen Punkten (Punktrastermethode) und Verwendung eines Messverfahrens, das auf einer Auswertung der Synchronisationssignale basiert, kann diese Instabilität bei den Synchronisationssignalen zu einer Überbewertung der Immission führen, da auch hier im Max-Hold-Modus gemessen werden muss, um aus dem Gesamtsignal zuverlässig die Synchronisationssignale zu erfassen.

Wendet man das codeselektive Messverfahren an, führt die beobachtete Instabilität bei den Synchronisationssignalen zu keiner negativen Beeinflussung der Messergebnisse, wenn man die Feldstärkewerte der RS-Signale als Basis für die Hochrechnung auf maximale Anlagenauslastung heranzieht.

Von Seiten der Betreiber kann derzeit keine schlüssige Auskunft gegeben werden, aus welchem Grund die Synchronisationssignale bei Systemen eines Herstellers das beobachtete instabile Zeitverhalten besitzen. Aktuell ist es unklar, ob dieses Verhalten einem bestimmten Zweck dient oder ob es sich hierbei um einen Fehler bzw. eine Ungenauigkeit in der Systemprogrammierung handelt. Unsicher ist auch, ob das Verhalten an allen Anlagen dieses Herstellers gleich ausgeprägt ist oder ob es möglicherweise von Standort zu Standort variiert (z.B. abhängig vom installierten Firmwarerelease). Hier sollten in Zukunft noch weitergehende Untersuchungen vorgenommen werden, um die beobachteten Effekte endgültig bewerten zu können.

2.4.3 Auswirkung der beschränkten Dynamik der codeselektiven Messtechnik in der Praxis

Wie in Abschnitt 2.3.2 durch Labormessungen gezeigt wurde, besitzen die aktuell verfügbaren codeselektiven LTE-Messgeräte eine vergleichsweise geringe relative Dynamik. Dies bedeutet, dass bei Anwesenheit eines relativ starken Signals im untersuchten Frequenzband schwächere Signale nicht mehr separiert und damit nicht mehr oder nur sehr ungenau zur Anzeige gebracht werden können. Bei typischen Mobilfunkstandorten mit 3 horizontal um 120° versetzt ausgerichteten Sektorantennen kann es daher passieren, dass am Messpunkt nicht 3 Signale, sondern nur 2 oder gar nur 1 Signal angezeigt werden. Die nicht angezeigten Signale sind zwar schwächer als die angezeigten, jedoch fehlen sie als Beitrag zur Gesamtimmission, die durch Summation aller Signale zu bilden ist.

Bei den Messungen in der Umgebung des Standortes, der in Abschnitt 3.1.11 noch näher vorgestellt wird, wurde zusätzlich die relative Dynamik der beiden Messsysteme TS-EMF und SRM-3006 vergleichend untersucht und dessen Auswirkung auf die Summenimmission ermittelt. Am betrachteten Standort wird eine LTE-1800-Anlage mit 3 um 120° versetzt ausgerichteten Antennen betrieben (Cell ID 18, 19, 20). Es wurden an insgesamt 6 Punkten die Immissionen codeselektiv mit beiden Messsystemen ermittelt und verglichen. Die Ergebnisse der Messungen sind in Tabelle 2.13 dokumentiert.

Wie aus dem Kartenausschnitt in Abschnitt 3.1.11 ersichtlich, sind die Messpunkte im Zusammenhang zu den Antennenausrichtungen so gewählt, dass an einigen Punkten 2 Signale etwa gleich stark vorhanden sein sollten, das dritte jedoch deutlich schwächer. An anderen Messpunkten sollte nur ein Signal groß, die anderen beiden dagegen vergleichsweise klein ausfallen.

Gemessen wurde mit der Schwenkmethode. Bei beiden Systemen wurde die Isotropantenne des Herstellers verwendet.

	c	ell ID 18		с	Cell ID 19		Cell ID 19 Cell ID 20			Summe		
Punkt Nr.	SRM [dBµV/m]	TS-EMF [dBµV/m]	Δ [dB]	SRM [dBµV/m]	TS-EMF [dBµV/m]	Δ [dB]	SRM [dBµV/m]	TS-EMF [dBµV/m]	Δ [dB]	SRM [dBµV/m]	TS-EMF [dBµV/m]	Δ [dB]
1	79,1	80,0	0,9	50,0	62,3	12,3	73,2	74,8	1,6	80,1	81,2	1,1
2	78,0	79,9	1,9	-	64,0	-	76,5	78,2	1,7	80,3	82,2	1,9
3	81,2	82,9	1,7	74,2	79,7	5,5	76,2	77,6	1,4	83,0	85,4	2,4
4	69,8	74,5	4,6	83,1	84,4	1,2	70,6	72,0	1,4	83,6	85,0	1,5
5	59,3	71,0	11,7	82,3	83,3	1,1	62,0	67,1	5,1	82,3	83,7	1,3
6	44,4	69,7	25,3	82,6	85,0	2,4	58,8	73,5	14,7	82,6	85,4	2,8

Tabelle 2.13:	Vergleich der relativen Dynamik des TS-EMF und des SRM-3006 im realen Messum-
	feld

An allen untersuchten Punkten wurden vom TS-EMF immer alle 3 Signale des Standortes dekodiert. Das SRM-3006 konnte an einem Punkt nur 2 der 3 Signale dekodieren. Grundsätzlich werden von beiden Systemen auch noch Signale angezeigt, die bezüglich des stärksten Signals Pegelunterschiede von mehr als 20 dB aufweisen, dann aber offensichtlich nicht mehr mit verlässlichem Messwert.

Bei Signalen mit ausreichend großen Pegeln liegt der Unterschied im Messergebnis zwischen beiden Systemen etwa zwischen einem und 3 dB (in der Tabelle grün markiert), bei Signalen mit - im Vergleich zum starken Kanal - niedrigen Pegeln nehmen die Unterschiede drastisch zu (in der Tabelle rot markiert). Aufgrund der Erfahrungen aus den Labormessungen ist anzunehmen, dass zunächst das SRM ungenau wird, jedoch auch das TS-EMF ab einem bestimmtem Pegelunterschied keine zuverlässigen Ergebnisse mehr liefert (im Laborexperiment betrug die relative Dynamik bei Signalen mit Verkehr und Dummydaten 6 dB für das SRM-3006 bzw. 9 dB für das TS-EMF).

Betrachtet man in obiger Tabelle, bei welchen Pegelunterschieden zwischen starkem und den schwachen Signalen noch geringe Abweichungen zwischen den Systemen auftreten, ergibt sich ein Bereich von etwa 1,5 bis 12,5 dB.

Der Vergleich der (verlässlichen) Messergebnisse in Tabelle 2.13 zeigt, dass das TS-EMF systematisch etwa 1 bis 2 dB größere Messwerte liefert als das SRM-3006. Ein derartiger Unterschied zwischen den beiden Messsystemen wurde in den Labormessungen (ohne Messantenne) nicht festgestellt, vermutlich ist er daher auf Unterschiede in der Kalibrierung der Messantennen zurückzuführen.

Ermittelt man die Summenimmission durch leistungsbezogene Addition der Messergebnisse der einzelnen Zellen (rechter Abschnitt in Tabelle 2.13), erkennt man, dass der Einfluss der ungenauen Teilergebnisse auf die Summenimmission nur vergleichsweise gering ausfällt, da die Summenimmission im wesentlich durch das starke bzw. die beiden stärksten Signale bestimmt wird. An allen 6 Punkten bleibt in der Summe der Unterschied zwischen beiden Systemen unter 3 dB, obwohl bei den Einzelwerten teilweise Unterschiede im zweistelligen dB-Bereich auftreten. Absolut gesehen vergrößert sich der Unterschied der Messergebnisse zwischen TS-EMF und SRM-3006 in der Summenimmission im Vergleich zum Unterschied des jeweils stärksten Signals am Messpunkt nur um 0 bis 0,7 dB.

Die hier durchgeführten Vergleichsmessungen zeigen somit keinen starken Einfluss der vergleichsweise geringen relativen Dynamik der Systeme auf die Messunsicherheit der Summenimmission. Allerdings konnten nur an 6 Punkten in der Umgebung eines Standortes vergleichende Messungen durchgeführt werden. Weitere Untersuchungen (z.B. an Punkten in unmittelbarer Nähe der Antennen sowie in Szenarien mit starken Reflexionen) sollten zukünftig noch durchgeführt werden, um ein genaueres Bild über die Auswirkungen der begrenzten relativen Dynamik bei codeselektiven LTE-Messungen zu erhalten. Auch der Einfluss der Verkehrslast sollte an realen Standorten noch eingehender geprüft werden, da im Laborexperiment hier durchaus stärkere Einflüsse beobachtet werden konnten, aktuell die untersuchten realen Standorte jedoch vermutlich bezüglich Verkehr noch vergleichsweise gering ausgelastet waren.

2.4.4 Codeselektive Messung von RS im Vergleich zu P-SS bzw. S-SS

Die codeselektive Messtechnik ermöglicht es grundsätzlich, entweder über die Messung der RS-Signale oder über die Synchronisationssignale (P-SS bzw. S-SS) auf die Immission bei maximaler Anlagenauslastung zu extrapolieren. Für beide Signalarten kann vom Betreiber die aktuell eingestellte Leistung pro Resource Element angegeben werden. Lässt man die in Abschnitt 2.4.2 festgestellten systemtechnikbedingten Unterschiede zwischen der codeselektiven Messung von Synchronisations- und RS-Signalen außer Acht (sie treten ja offensichtlich auch nicht bei allen Herstellern auf), so erscheint es auf den ersten Blick gleichwertig, ob man als Basis für die Hochrechnung auf die Immission bei maximaler Sendeleistung die Feldstärke, verursacht durch die Synchronisationssignale oder die Feldstärke durch die RS-Signale heranzieht.

Werden die LTE-Signale nur über eine Antenne in die Funkzelle abgestrahlt, sind beide Verfahren in der Tat grundsätzlich als gleichwertig anzusehen. Allerdings ermöglicht eine Messung der RS-Signale besonders stabile Resultate, da hier die Leistung der spektral verteilten RS-Symbole auch über die volle Signalbandbreite gemessen und gemittelt werden kann. Die Synchronisationssignale befinden sich hingegen unabhängig von der eingestellten Signalbandbreite immer im Bereich des zentralen Megahertz des Signalspektrums. Eine Genauigkeitssteigerung durch größere Messbandbreite ist bei Messung der Synchronisationssignale ausgeschlossen.

Um einen Eindruck über die durch eine größere Messbandbreite zu erzielende Genauigkeitssteigerung zu erhalten, wurde an einem Messpunkt (Balkon eines Wohnhauses, von dem aus eine direkte Sichtverbindung zu einem LTE-800-Standort besteht), jeweils dreimal hintereinander der Maximalwert der RS-Signale gemessen, wobei bei den ersten 3 Messungen eine Messbandbreite von 1,08 MHz (Kanalbandbreite = 1,4 MHz) und bei den folgenden 3 Messungen eine Messbandbreite von 9 MHz (Kanalbandbreite: 10 MHz) am Gerät eingestellt wurde. Als Messgerät wurde das SRM-3006 mit einer auf einem Stativ montierten Isotropantenne eingesetzt. Die Ergebnisse der Messungen sind in den folgenden beiden Tabellen wiedergegeben.

Messung Nr.	RS 0 [dBµV/m]	RS 1 [dBµV/m]	Leistungsmittelwert aus RS 0 und RS 1 [dBµV/m]
1	63,0	55,8	60,5
2	62,6	54,7	60,0
3	62,9	55,0	60,4

Tabelle 2.14:Codeselektive Messung der RS-Signale einer LTE-Basisstation mit eingestellter
Kanalbandbreite von 1,4 MHz (schmalbandige Messung)

Messung Nr.	RS 0 [dBµV/m]	RS 1 [dBµV/m]	Leistungsmittelwert aus RS 0 und RS 1 [dBµV/m]
1	62,5	55,2	60,1
2	62,4	55,1	60,1
3	62,4	55,0	60,1

Tabelle 2.15:Codeselektive Messung der RS-Signale einer LTE-Basisstation mit eingestellter
Kanalbandbreite von 10 MHz (breitbandige Messung)

Die größere Messbandbreite liefert in der Tat sehr stabile Resultate, allerdings ist die Schwankungsbreite der schmalbandigen Messung mit 0,5 dB ebenfalls als sehr gering anzusehen. Zudem muss an dieser Stelle angemerkt werden, dass eine breitbandige Messung der RS-Signale nur mit unbewegter Antenne erfolgen kann (d.h. Messung an einem festen Punkt), da bei dieser Geräteeinstellung die Zeit für einen Dekodierdurchlauf mehrere Sekunden beträgt. Die Anwendung der Schwenkmethode ist mit der breitbandigen Messung aufgrund dieser großen Messzeit nicht möglich, hier kann nur die schmalbandige Messung verwendet werden.

Bezüglich der Absolutwerte liefern beide Messbandbreiten nahezu identische Mittelwerte.

Eine weitere interessante Erkenntnis aus den Tabellen 2.14 und 2.15 ist die Tatsache, dass die Feldstärkewerte der beiden MIMO-Kanäle am Messpunkt nicht unbedingt gleich groß ausfallen müssen, obwohl derzeit die beiden Kanäle von den Betreibern (in etwa) mit gleicher Leistung gespeist werden und die Abstrahlung über die beiden orthogonalen Dipolgruppen gängiger kreuzpolarisierter (X-Pol-) Mobilfunksektorantennen - also vom gleichen Ort aus - erfolgt. Für diese - teilweise recht deutlichen - Pegelunterschiede sind die folgenden beiden Tatsachen verantwortlich:

- Der Übertragungskanal verhält sich für die beiden Signale nicht gleich (genau diese Tatsache macht man sich bei der MIMO-Technik für die Vergrößerung des mittleren Datendurchsatzes zu Nutzen). Somit ist es nicht verwunderlich, dass sich bei der Messung der Feldstärkewerte an einem festen Punkt (wie in Tabelle 2.14 und 2.15 dargestellt) unter Umständen deutlich unterschiedliche Pegel für die beiden RS-Signale ergeben.
- Allerdings stellt man Pegelunterschiede zwischen den beiden Kanälen auch bei Messung in einem größeren Volumen mit der Schwenkmethode fest. Dies liegt daran, dass der Antennengewinn für die beiden abgestrahlten Polarisationen (+45° bzw. -45°) nicht in allen Richtungen von der Sendeantenne aus gesehen gleich groß ist. Diese Tatsache ist in Bild 2.11 verdeutlicht. Direkt vor der Antenne sind beide Dipolfelder gleichwertig, beide RS-Signale werden am Messpunkt in etwa den gleichen Pegel besitzen. Schräg unterhalb der Antenne, beispielsweise in Richtung des roten Pfeils in Bild 2.11 befindet man sich senkrecht zur Achse der +45°-Dipole und in Achsrichtung der -45°-Dipole. Da Dipole in Richtung ihrer eigenen Achse ein Strahlungsminimum besitzen, senkrecht zu ihrer Achse jedoch ein Maximum, wird in der rot eingezeichneten Richtung eines der beiden RS-Signale schwächer ausgeprägt sein als das andere. In Richtung des grünen Pfeils ist die Situation genau umgekehrt.

Die in Abschnitt 2.4.2 bereits vorgestellte Messung wurde auch bezüglich der hier diskutierten Unterschiede von RS 0 und RS 1 ausgewertet. Es ergab sich dabei das in Tabelle 2.16 dokumentierte Ergebnis.



Bild 2.11: Prinzipieller Aufbau einer kreuzpolarisierten Mobilfunksektorantenne

Signale	Maximal [dB]	Minimal [dB]	Mittelwert [dB]	Standardabweichung [dB]
Pegelunterschied zwischen RS 0 und RS 1	-4,4 / +4,2	+0,1	-0,2	1,93
Pegelunterschied zwischen P-SS und S-SS	-1,7 / +2,2	0	+0,01	0,85

Tabelle 2.16:Differenz zwischen RS 0 und RS 1 bzw. zwischen P-SS und S-SS in dB für die in
Abschnitt 2.4.2 dokumentierten Messpunkte

Der Pegelunterschied zwischen RS 0 und RS 1 ist stärker ausgeprägt, als der zwischen P-SS und S-SS, die - im Unterschied zu den RS-Signalen - zeitlich nacheinander über die gleiche Antennenpolarisation abgestrahlt werden. Aufgrund der nahezu gleichen absoluten Abweichung der Differenzen zwischen RS 0 und RS 1 in beide Richtungen kann der Pegelunterschied auch nicht allein auf einen Pegelunterschied der Senderausgangssignale in den beiden MIMO-Kanälen zurückgeführt werden. Die größten Pegelunterschiede zwischen den beiden RS-Signalen fanden sich regelmäßig an den Messpunkten nah am Mast schräg unter den Antennen (MP 2-7; siehe Bild 2.6).

Die hier vorgestellten Ergebnisse legen es nahe, bei MIMO-Abstrahlung nicht nur ein RS-Signal zu erfassen, wie es beispielsweise in [METAS 12] vorgeschlagen wird, da dies zu einer Unterbewertung der Immission führen kann. Will man eine Worst-Case-Bewertung sicherstellen, sollten immer alle vorhandenen RS-Signale gemessen werden, was mit den aktuell verfügbaren Messsystemen einfach möglich ist und auch nicht mehr Messzeit benötigt.

LTE-Anlagen bieten im Übrigen auch die Möglichkeit, bei geringer Auslastung softwaregesteuert zeitweise einen der beiden MIMO-Kanäle abzuschalten und in den einkanaligen Betrieb zu wechseln, was aufgrund des geringeren Leistungsverbrauchs zu nicht unerheblichen Energiekosteneinsparungen beim Betreiber führen kann. Derzeit ist nach unserem Wissensstand eine derartige Option in Deutschland noch nicht realisiert, jedoch wurde uns von dem Vertreter eines deutschen Netzbetreibers diese Option bereits für die Zukunft in Aussicht gestellt. Bei abgeschaltetem zweitem Kanal kann es ebenso zu einer Fehlbewertung der Immission kommen, wenn man in diesem Fall nur den vorhandenen Kanal misst und den fehlenden zweiten Kanal pauschal durch einen Faktor (3 dB) berücksichtigt. Wie oben erläutert, kann der zweite Kanal am Messpunkt eine signifikant größere Immission erzeugen, als der derzeit aktive Kanal.

2.4.5 Schlussfolgerungen aus den Erprobungsmessungen im Feld

Die in der Umgebung von realen LTE-Standorten durchgeführten zusätzlichen Erprobungsmessungen (Schwenkmethode) liefern folgende Ergebnisse und Schlussfolgerungen:

- Die derzeit verfügbaren Messsysteme liefern unabhängig vom verwendeten Antennentyp (isotrop bzw. einachsig) vergleichbare Ergebnisse.
- Bei Anwendung der Schwenkmethode ist die Geschwindigkeit der Schwenkbewegung an die Messrate des Gerätes anzupassen, damit eine ausreichend dichte Abtastung des Messvolumens sichergestellt ist. Bei Verwendung einer einachsigen Antenne ist die Messrate des Gerätes zwar deutlich größer als bei Einsatz einer aus drei räumlich orthogonal angeordneten einachsigen Antennen bestehenden isotropen Antennne, jedoch ist dann mehr Zeit für die Änderung der Vorzugsrichtung und der Polarisationsebene der Messantenne zu verwenden, so dass der Zeitbedarf für die Messung bei beiden Antennen etwa gleich ausfällt.
- Die beiden Messprinzipien (spektrale bzw. codeselektive Messung) liefern vergleichbare Ergebnisse für die Immission bei maximaler Anlagenauslastung, wenn zur Hochrechnung die real eingestellten Anlageparameter verwendet werden.
- Ist man hingegen nicht an der maximal möglichen, sondern an der aktuell auftretenden Immission interessiert, ist eine breitbandige frequenzselektive Messung durchzuführen. Die codeselektive Messung ist hierfür nicht geeignet.
- Bei codeselektiver Messung der RS-Signale und Anwendung der Schwenkmethode ist unabhängig von der Bandbreite des zu messenden LTE-Signals - die schmalbandige Messung (Mittelung der RS-Signale über eine Bandbreite von zirka 1 MHz) anzuwenden, da eine breitbandige Messung (Mittelung der RS-Signale über die komplette Signalbandbreite) nur geringfügig stabilere Messergebnisse liefert, die Zeit für einen Messdurchlauf in diesem Fall jedoch im Sekundenbereich liegt, was eine sinnvolle Durchführung der Schwenkmethode unmöglich macht.
- Da die in Deutschland derzeit betriebenen LTE-Systeme im Regelfall mit Zweiantennen-MIMO arbeiten, wird bei der codeselektiven Messung die Erfassung und Auswertung beider RS-Symbole empfohlen, um Fehlbewertungen der Exposition aufgrund starker Pegelunterschiede in den beiden Signalpfaden zu vermeiden.
- Bei der frequenzselektiven Messung kann sich eine Überbewertung der extrapolierten Immission ergeben, wenn am Standort die Synchronisationssignale mit höherem Pegel als der mittlere Signalpegel des LTE-Signals abgestrahlt werden ("Boosting"). Entsprechende Klärung beim Betreiber im Vorfeld einer Messung wird daher empfohlen, um die Messresultate geeignet korrigieren zu können.
- Ebenfalls zu einer Überbewertung der Immission kann es kommen, wenn die Synchronisationssignale nicht mit zeitlich konstanter Leistung gesendet werden, sondern - wie es im Rahmen dieser Untersuchungen bei einigen Anlagen beobachtet werden konnte zwischenzeitlich auch Synchronisationsimpulse mit größerer Leistung abgegeben werden. Eine Korrektur der Messergebnisse erscheint bei diesem Effekt derzeit nicht seriös

machbar, da die Ursache, die wertemäßige Ausprägung sowie die Beeinflussbarkeit dieses Effektes noch ungeklärt sind.

- Auch bei einer auf den RS-Signalen basierenden codeselektiven Messung kann sich eine Fehlbewertung ergeben, da auch die RS-Signale vom Betreiber im Pegel angehoben (geboostet) werden können. Wird versehentlich übersehen, dem Messtechniker mitzuteilen, dass die RS-Symbole am betrachteten Standort geboostet sind, wird die Immission überschätzt, da der Hochrechnungsfaktor (d.h. der Unterschiedsfaktor zwischen eingestellter RS- Leistung und maximaler Leistung der Funkzelle) auf einer geringeren RS-Leistung basiert, als in Wirklichkeit vorhanden ist. Die gemessene RS-Feldstärke wird mit einem zu großen Extrapolationsfaktor multipliziert. Die Größe der Überbewertung entspricht also immer dem Faktor, um den die RS-Signale gegenüber der mittleren Signalleistung geboostet sind. Zur Qualitätssicherung empfiehlt es sich daher, zumindest an einigen Messpunkten die Immission mittels beider Messprinzipien (frequenzselektiv und codeselektiv) zu erfassen, so dass bei Vergleich der Resultate eventuell aufkommende Ungereimtheiten im Nachgang mit dem Betreiber geklärt und die Messergebnisse geeignet korrigiert werden können.
- Auch ein kritisches Hinterfragen der vom Betreiber angegebenen RS-Leistungen ist durchaus empfehlenswert. Sind alle Resource Elemente des LTE-Signals pegelmäßig gleich eingestellt (also auch die RS-Elemente), errechnet sich die RS-Leistung pro Resource Element einfach aus der Nominalleistung der Endstufe (z.B. 20 W) geteilt durch die Anzahl der vorhandenen Resource Elemente pro Symbol (z.B. 600 bei 9 MHz bzw. 1200 bei 18 MHz Signalbandbreite). Gibt der Betreiber einen größeren Wert an, als hier errechnet, sind die RS-Elemente geboostet bzw. bei einem kleineren Wert (was unwahrscheinlich ist) abgesenkt.
- Bei einer Systemkonfiguration mit 2-Antennen-MIMO können betreiberseitig die RS-Elemente um bis zu 3 dB gegenüber dem Wert bei konstantem Pegel aller Resource Elemente angehoben sein, da in jedem Pfad jedes zweite RS-Symbol ausgetastet wird [BOR 12]. Zum Teil werden derzeit die Standorte, die mit MIMO-Systemen ausgestattet sind (dies ist derzeit der Regelfall), bezüglich der RS-Symbole bereits geboostet betrieben, teilweise aber auch nicht. Werden vom Betreiber Leistungswerte für die RS-Symbole angegeben, die mehr als 3 dB über dem Wert bei konstanter Leistung aller RS-Symbole liegen (Berechnung siehe vorherigen Aufzählungspunkt), sollte beim Betreiber nochmals nachgefragt werden, ob diese Angabe wirklich der Realität entspricht. Möglicherweise ist der mitgeteilte Wert für das RS-Signal zwar korrekt, aber es wurde eine zu geringe Nominalleistung der Endstufe angegeben.
- In der Nähe der Landesgrenzen wird, aufgrund internationaler Vorgaben zur Minimierung von länderübergreifenden Störungen der Funksysteme untereinander, häufig die maximale Leistung der Sender dauerhaft reduziert (z.B. von 20 Watt bei Standardkonfiguration auf 5 Watt im grenznahen Umfeld). Daher sollten Anlagenparameter beim Betreiber nie pauschal (z.B. für eine Region), sondern immer anlagenbezogen abgefragt werden, um Fehlbewertungen der Immission an Standorten zu vermeiden, die bezüglich Ihrer Parameter aus der Reihe fallen.

- Außerdem kann es in der Praxis passieren, dass im Rahmen der Netzoptimierung beispielsweise die Pegel der RS-Signale kurzfristig vom Betreiber verändert werden. Wie bereits in [BOR 12] erwähnt, wird die Information über die aktuell eingestellte RS-Leistung im LTE-Signal als Information (im Systeminformationsblock Nr. 2; SIB 2) übermittelt. Es wäre für die messtechnische Praxis daher sehr hilfreich, wenn codeselektive Messsysteme in Zukunft diesen Parameter direkt aus dem LTE-Signal extrahieren und dem Messenden zur Verfügung stellen würden. Damit würde eine einfache Kontrolle der vom Betreiber angegebenen RS-Leistungen möglich werden.
- Die (prinzipiell unvermeidbare) beschränkte relative Dynamik von codeselektiven LTE-Messsystemen kann auch bei Messungen an realen Standorten beobachtet werden, ihre Auswirkung auf die Messunsicherheit der ermittelten Summenimmission war bei den hier vorgenommenen Untersuchungen allerdings immer relativ gering. Weitere Messungen (z.B. an Punkten in unmittelbarer Nähe der Antennen sowie in Szenarien mit starken Reflexionen) sollten zukünftig noch durchgeführt werden, um ein genaueres Bild über die Auswirkungen der begrenzten relativen Dynamik bei codeselektiven LTE-Messungen zu erhalten. Auch der Einfluss der Verkehrslast sollte an realen Standorten noch eingehender geprüft werden, da im Laborexperiment hier durchaus stärkere Einflüsse beobachtet werden konnten, aktuell die untersuchten realen Standorte jedoch vermutlich bezüglich Verkehr noch vergleichsweise gering ausgelastet waren.

Bestimmung und Analyse von LTE-Immissionen Messergebnisse in 11 verschiedenen Szenarien

In vorliegendem Kapitel werden die Ergebnisse umfangreicher Messungen an verschiedenen LTE-Stationen vorgestellt. Bei den untersuchten Anlagenkonfigurationen wurde Wert auf eine möglichst breite Vielfalt unterschiedlicher Szenarien gelegt: Die Messungen erfolgten an insgesamt 11 unterschiedlichen, für LTE-Netze typischen Anlagenkonfigurationen. Die untersuchten Szenarien sind:

- 1. Niedrig montierte LTE-Anlage im städtischen Umfeld
- 2. Hoch montierte LTE-Anlage im städtischen Umfeld
- 3. LTE-Anlage auf einem Gebäudedach und Ermittlung der Immission im selben Gebäude (Dämpfungsverlauf)
- 4. LTE-Anlage auf einem Gebäudedach und Ermittlung der Immission im gegenüberliegenden Gebäude (Höhenabhängigkeit)
- 5. LTE-Anlage zur Indoor-Versorgung
- 6. Niedrig montierte LTE-Anlage im ländlichen Umfeld (Dachstandort am Ortsrand)
- 7. Niedrig montierte LTE-Anlage im ländlichen Umfeld (Dachstandort in Ortsmitte)
- 8. Sehr niedrig montierte LTE-Anlage im ländlichen Umfeld (Dachstandort im Wohngebiet)
- 9. Hoch montierte LTE-Anlage im ländlichen Umfeld (Maststandort in Ortsmitte)
- 10. Hoch montierte LTE-Anlage im ländlichen Umfeld (Maststandort am Ortsrand)
- 11. Hoch montierte LTE-Anlage im ländlichen Umfeld (Freistehender Maststandort)

In jedem Szenario wurden mehrere unterschiedliche Messungen vorgenommen, die nachfolgend beschrieben sind:

Systematische Messungen

Bei den systematischen Messungen erfolgte die Auswahl der Messpunkte nach systematischen Gesichtspunkten, d.h. die Messpunkte weisen verschiedene Abstände, Orientierungen, Höhenunterschiede, Sichtverbindungen usw. zur Sendeanlage auf. Anhand von Immissionsmessungen entlang einer Linie oder in verschiedenen Stockwerken eines Gebäudes wird es möglich, die grundsätzliche Entfernungs- bzw. Höhenabhängigkeit der Immission analysieren zu können. Durch diesen systematischen Ansatz wird in gewissen Grenzen eine Übertragbarkeit der ermittelten Immissionen auf ähnliche Szenarien ermöglicht.

Als Messverfahren wurde primär das spektrale, an einigen Standorten auch schon das codeselektive Messverfahren mit Schwenkmethode und Hochrechnung auf die höchste betriebliche Anlagenauslastung angewendet [BOR 12]. Alle Messwerte werden als

- Elektrische Feldstärke in V/m,
- Elektrische Feldstärke in % vom Grenzwert der 26. BlmSchV und
- Elektrische Leistungsflussdichte in μW/m²

für den maximalen Betriebszustand der Anlage angegeben.

Bei der Auswahl der zu untersuchenden Anlagen wurden solche bevorzugt, bei denen *am selben Standort* zusätzlich zum LTE-System auch GSM- und/oder UMTS-Systeme installiert waren. Dadurch ist es möglich, die LTE-Immissionssituation mit der GSM/UMTS-Immissionssituation, verursacht durch Anlagen am gleichen Standort, zu vergleichen. Mit der Schwenkmethode wurden die GSM-Immissionen spektral und die UMTS-Immissionen codeselektiv mit gemessen und mit dem in [BOR 07] beschriebenen Verfahren auf maximale Anlagenauslastung hochgerechnet.

Messung an statistisch verteilten Messpunkten

Zusätzlich zu den Messungen an solchen Punkten, die aus systematischen Gesichtspunkten ausgewählt wurden, erfolgten auch Messungen der LTE-Immission an statistisch verteilten Messpunkten. Diese Messpunkte wurden wie folgt ausgewählt: Um die Anlage wurde ein rechteckiger Bereich definiert, der im städtischen Bereich etwa der Größe einer typischen Versorgungszelle entspricht (nach Rücksprache mit den LTE-Netzbetreibern wurde hierbei für städtische Versorgungszellen ein Quadrate mit einer halbe Kantenlänge (Radius der Versorgungszelle) von 400 m gewählt). Im ländlichen Bereich wurde durch ein Rechteck die gesamte Ortschaft zusammenhängend umschlossen. Innerhalb dieses definierten Bereiches wurden mit einem Zufallszahlengenerator x-y-Wertepaare ausgewürfelt. Ein Messpunkt (Wertepaar) wurde für die Messung zugelassen, wenn er allgemein zugänglich war und sich in bebautem Gebiet befand. Traf eine von beiden Bedingungen nicht zu, wurde ein alternativer Messpunkt ausgewürfelt.

An allen statistischen Messpunkten wurden neben den LTE-Immissionen auch die Immissionen durch am selben Standort vorhandene GSM-/UMTS-Mobilfunkdienste mit gemessen. Als Messverfahren wurde die Schwenkmethode mit Hochrechnung auf die maximale Anlagenauslastung angewendet.

An einem Teil der statistisch verteilten Messpunkte wurde darüber hinaus auch die Immission durch relevante ortsfeste Funkdienste im Frequenzbereich 100 kHz bis 3 GHz frequenzselektiv erfasst. In diesem Frequenzbereich sind die wichtigsten Immissionen durch hochfrequente Sendeanlagen enthalten. Als Messverfahren wurde die Schwenkmethode mit Hochrechnung auf die maximale Anlagenauslastung angewendet, wobei die Extrapolation der GSM-Immissionen von anderen als dem primär untersuchten LTE-Standort anhand von typischen Kanalzahlen erfolgte. Bei UMTS wurde von einem Leistungsanteil des CPICH von 10 % der Gesamtleistung ausgegangen.

Momentanwertimmission

An je einem Messpunkt pro Szenario wurde zusätzlich zur örtlich (Schwenkmethode mit Aufzeichnung des Maximalwerts im durchschwenkten Volumen) und zeitlich (Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung) maximierten Immission auch der örtlich gemittelte Momentanwert der LTE-Immission ermittelt.

Für die örtliche Mittelung wurde das 3-Punkte-Raster aus der Norm EN 50492 [EN 50492] verwendet, d.h. 3 in den Höhen 1,1 m, 1,5 m und 1,7 m über dem Boden in einer vertikalen Linie angeordnete Messpunkte. Die Immission wird leistungsbezogen über diese 3 Messpunkte gemittelt, wodurch die Immission quasi einen "räumlich gemittelten Wert über den gesamten Körper des exponierten Individuums" zum Vergleich mit den Referenzwerten nach ICNIRP [ICNIRP 98] darstellt. Für die Messung an den 3 Punkten wurde eine isotrope Sonde verwendet.

Bezüglich der zeitlichen Mittelung wurde die üblicherweise bei der Schwenkmethode verwendete "Maxhold"-Funktion des Messgerätes deaktiviert und stattdessen eine Mittelung über mehrere Messdurchläufe angewendet.

Die so gemessene örtlich und zeitlich gemittelte Immission wird mit der örtlich und zeitlich maximierten Exposition am selben Messpunkt verglichen.

Maximale und minimale Immission

An den im Folgenden dokumentierten systematischen und statistischen Messpunkten ist jeweils die zeitlich maximierte, d.h. auf maximale Anlagenauslastung extrapolierte Immission angegeben. Die minimale Immission bestimmt sich durch permanent abgestrahlten Synchronisierungs- und Signalisierungskanäle und –signale und kennzeichnet z.B. den Zustand bei Nacht, wenn kein Gesprächs- oder Datenverkehr abgewickelt wird. Bei GSM beträgt die minimale Immission bei einer typischen Konfiguration (4 Kanäle, davon ein Signalisierungskanal) 25 % der maximalen Immission, bei UMTS sind es 20 %. Bei LTE ist der Anteil der Signalisierung vor allem davon abhängig, wie viele Symbole der PDCCH pro Subframe belegt (1 bis 3), siehe [BOR 12]. Bei 3 Symbolen ist der Anteil der Signalisierung am größten und beträgt ca. 20 %. Damit liegt der Anteil der permanenten Signalisierung bei allen 3 Mobilfunktechnologien in derselben Größenordnung. Es ist deswegen gerechtfertigt, pauschal davon auszugehen, dass die minimale Immission etwa 6 dB unter der maximalen Immission liegt. Auf eine explizite Angabe der Minimalimmission wird im Folgenden aus Übersichtsgründen verzichtet. Die Minimalimmission errechnet sich zu 50 % der angegebenen Feldstärkewerte bzw. 25 % der angegebenen Leistungsflussdichtewerte.

Summenimmission und Grenzwertvergleich

Nach den Bestimmungen der 26. BImSchV [26. BImSchV] sind Hochfrequenzanlagen so zu errichten und zu betreiben, dass in ihrem Einwirkungsbereich in Gebäuden oder auf Grundstücken, die zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt sind, bei höchster betrieblicher Anlagenauslastung und unter Berücksichtigung von Immissionen durch andere ortsfeste Sendefunkanlagen die in Tabelle 3.0a angegebenen Grenzwerte der elektrischen und magnetischen Feldstärke für den jeweiligen Frequenzbereich nicht überschritten werden. Bei gepulsten elektromagnetischen Feldern, wie z.B. von Radaranlagen, darf zusätzlich der Spitzenwert für die elektrische und magnetische Feldstärke das 32-fache der Werte nach Tabelle 3.0a nicht überschreiten.

	Effektivwert, quadratisch gemittelt über 6-Minuten-Intervalle				
Frequenz f in MHz	Elektrische Feldstärke E _{eff} in V/m	Magnetische Feldstärke H _{eff} in A/m			
10 - 400	27,5	0,073			
400 - 2000	1,375· \sqrt{f}	0,0037 $\cdot \sqrt{f}$			
2000 - 300000	61	0,16			

 Tabelle 3.0a:
 Grenzwerte der elektrischen und magnetischen Feldstärke im Hochfrequenzbereich nach 26. BImSchV. Für *f* ist der Zahlenwert in MHz einzusetzen.

Elektrische und magnetische Feldstärken sind im Fernfeld einer Strahlungsquelle über den Wellenwiderstand des Freiraumes, $Z_0 \approx 377 \Omega$, ineinander überführbar und beinhalten dieselbe Information. Deswegen ist es hier ausreichend, lediglich die Größe des elektrischen Feldes zu messen.

Das Produkt von elektrischer und magnetischer Feldstärke im Fernfeld einer Strahlungsquelle ergibt die elektrische Leistungsflussdichte S. Da auch diese dieselbe Information wie die Feldstärken beinhaltet, wird sie oft alternativ zur elektrischen Feldstärke bei der Grenzwertüberprüfung herangezogen.

Tabelle 3.0b fasst die relevanten Grenzwerte der 26. BImSchV für die Abstrahlung der Basisstationen (Downlink) in den Mobilfunkbereichen LTE-800, LTE-1800, GSM-R, GSM-900, GSM-1800 und UMTS zusammen. Für die Auswertung in diesem Bericht wird je System derjenige Grenzwert verwendet, der für die Banduntergrenze des jeweiligen Frequenzbereiches gültig ist.

LTE- bzw. Mobilfunksystem	Elektrische Feldstärke E _{eff} in V/m	Magnetische Feldstärke H _{eff} in A/m	Äquivalente Leistungsflussdichte S in W/m ²
LTE-800	38,6	0,10	4,0
LTE-1800	58,4	0,16	9,0
GSM-900, GSM-R	41,7	0,11	4,6
GSM-1800	58,4	0,16	9,0
UMTS	61,0	0,17	10,0

Tabelle 3.0b:Grenzwerte für die Mobilfunkfrequenzbereiche nach 26. BImSchV. Der Grenzwert wird
bei der Auswertung in diesem Bericht als konstant über dem gesamten Frequenzbe-
reich des jeweiligen Funksystems angesetzt.

Wenn neben Mobilfunkimmissionen auch Immissionen durch andere Funkdienste gemessen wurden, werden dafür die Grenzwerte nach Tabelle 3.0a und, speziell im Fall von Immissionen bei Frequenzen unterhalb von 10 MHz, die Referenzwerte nach EU-Ratsempfehlung 1999/519/EG [1999/519/EG] angesetzt.

Wirken wie in vorliegendem Fall gleichzeitig Felder unterschiedlicher Quellen und Frequenzen zusammen, dann sind die grenzwertbezogenen Ausschöpfungsgrade (GW_ASG) geeignet zu summieren. In Anlehnung an die EU-Ratsempfehlung 1999/519/EG werden diese für die Frequenzbereiche ab 100 kHz (thermische Wirkungen) wie folgt gebildet:

$$GW_ASG_{thermisch} = \sqrt{\sum_{i=100 \text{ kHz}}^{1\text{ MHz}} (\frac{\mathsf{E}_{i}}{c})^{2} + \sum_{i>1\text{ MHz}}^{300 \text{ GHz}} (\frac{\mathsf{E}_{i}}{\mathsf{E}_{L,i}})^{2}}$$
(3.1)

- E_i gemessene elektrische Feldstärke bei der Frequenz i;
- E_{L,i} Grenzwert für die elektrische Feldstärke nach Tabelle 3.0a bzw. 3.0b;
- c beträgt 87/ \sqrt{f} V/m (f ist in MHz einzusetzen).

Der mit dem Faktor 100 multiplizierte grenzwertbezogene Ausschöpfungsgrad nach Gleichung 3.1 ergibt die prozentuale Ausschöpfung des zulässigen Feldstärke-Grenzwertes. Dieser darf den Wert 100 nicht überschreiten. Diese prozentuale Ausschöpfung ist in den Ergebnistabellen der folgenden Abschnitte als "Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BImSchV" ausgewiesen.

In Analogie dazu wird für Felder unterschiedlicher Quellen und Frequenzen eine resultierende Summenfeldstärke nach Gleichung 3.2 gebildet, die in den Ergebnistabellen der folgenden Abschnitte als "Elektr. Feldstärke E in V/m" ausgewiesen ist.

$$E = \sqrt{\sum_{i=100 \text{ kHz}}^{300\text{GHz}} E_i^2}$$
(3.2)

3.1.1 Niedrig montierte Station im städtischen Umfeld

Die Messungen zum Szenario "Niedrig montierte Station im städtischen Umfeld" wurden an der Anlage Bocholder Straße 185 in 45335 Essen durchgeführt. Auf einem Hausdach ist in ca. 17 Meter Höhe ein dreisektoriges Mobilfunksystem des Betreibers A installiert, von dem neben LTE-1800 auch GSM-900 und UMTS abgestrahlt werden. Am gleichen Mast, allerdings mit anderer Sektorausrichtung, befindet sich ein dreisektoriges UMTS-System von Betreiber B.

Die nähere Umgebung des Standortes, die horizontale Ausrichtung der Sendeantennen, sowie die Lage der systematischen Messpunkte sind in folgendem Bild dargestellt.



Bild 3.1a: Szenario 1: Lageplan mit Anlagenstandort, Ausrichtung der LTE-Sendeantennen und Verteilung der systematischen Messpunkte

Für dieses Szenario wurden systematische Messungen an 11 Außen-Messpunkten mit und ohne direkte Sicht bei verschiedenen Orientierungen und Entfernungen zur Anlage durchgeführt. Die Messpunkte wurden in einer Linie angeordnet, um die Entfernungsabhängigkeit der Immission untersuchen zu können. Die Messpunkte 1.5_SY bzw. 1.7_SY befinden sich in gleicher Entfernung wie die Messpunkte 1.4_SY bzw. 1.6_SY, haben aber keine Sicht auf

die Anlage (gegenüberliegende Straßenseite, Sicht durch Häuser verdeckt). Hierdurch ist es möglich, den Einfluss der Sichtverhältnisse bei ansonsten gleicher Entfernung und Ausrichtung zur Anlage zu untersuchen.

Nachfolgende Tabelle beschreibt die Lage der systematischen Messpunkte.

Punkt Nr.	Messort	Sicht (zu LTE)	Horizontal- entfernung zur LTE-Anlage
1.1_SY	vor der Anlage am Parkplatz "Spiel Oase"	ја	24 m
1.2_SY	Bocholder Straße, Jet-Tankstelle, an Preissäule	ja	58 m
1.3_SY	Bocholder Straße vor Haus Nr. 200	ja	98 m
1.4_SY	Bocholder Straße vor Haus Nr. 202	ja	134 m
1.5_SY	Bocholder Straße vor Haus Nr. 195	nein	134 m
1.6_SY	Bocholder Straße Ecke Jahnstraße, Bushaltestelle	ja	174 m
1.7_SY	Bocholder Straße vor Haus Nr. 197	nein	174 m
1.8_SY	Bocholder Str. gegenüber Nr. 201, Fußgängerampel	ja	211 m
1.9_SY	Bocholder Straße vor Haus Nr. 226	ja	247 m
1.10_SY	Bocholder Straße vor Haus Nr. 234	ја	320 m
1.11_SY	Bocholder Straße vor Haus Nr. 240	ja	360 m

Tabelle 3.1a: Szenario 1: Beschreibung der systematischen Messpunkte

In folgender Tabelle ist zunächst nur die LTE-Immission für die 11 Punkte angegeben. Die Summenimmission aus GSM- und UMTS-Signalen vom selben Standort wird anschließend in einer zweiten Tabelle dargestellt.

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
1.1_SY	0,38	0,65	387,8
1.2_SY	0,61	1,05	996,7
1.3_SY	0,57	0,97	848,4
1.4_SY	1,28	2,19	4.350,9

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
1.5_SY	0,37	0,63	353,7
1.6_SY	1,18	2,02	3.703,2
1.7_SY	0,44	0,75	511,2
1.8_SY	1,92	3,28	9.740,4
1.9_SY	1,08	1,84	3.080,2
1.10_SY	1,04	1,78	2.874,6
1.11_SY	0,66	1,12	1.144,4

Tabelle 3.1b: Szenario 1, systematische MP: LTE-Immission

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
1.1_SY	1,50	3,10	5.954,8
1.2_SY	1,29	2,58	4.382,3
1.3_SY	1,47	3,38	5.713,2
1.4_SY	1,87	3,80	9.255,7
1.5_SY	0,87	1,96	2.002,1
1.6_SY	1,65	3,04	7.229,7
1.7_SY	0,48	0,99	615,2
1.8_SY	1,97	3,51	10.289,1
1.9_SY	2,21	4,21	12.971,4
1.10_SY	1,97	3,73	10.345,7
1.11_SY	1,03	1,84	2.819,8

Tabelle 3.1c: Szenario 1, systematische MP: Summenimmission GSM + UMTS

In folgendem Bild sind die Resultate aus den obigen beiden Tabellen visualisiert. An allen 11 Messpunkten dominieren grenzwertbezogen und absolut die GSM-/UMTS-Immissionen im Vergleich zu den LTE-Immissionen. Der leistungsgemittelte grenzwertbezogene Unterschiedsfaktor zwischen GSM-/UMTS-Immissionen und LTE-Immissionen beträgt ca. 6,5 dB.



Bild 3.1b: Szenario 1, systematische MP: Grafische Darstellung der gemessenen Immission



Bild 3.1c: Szenario 1, systematische MP: Abstandsabhängigkeit der Messpunkte mit freier Sicht auf die Anlage, nur Betreiber A

In Bild 3.1c sind speziell die Ergebnisse der Messungen zur Untersuchung der Entfernungsabhängigkeit dargestellt. Hierbei wurden nur die Messpunkte mit direkter Sicht zur Anlage aufgenommen. Die LTE-Immissionen werden dabei mit den GSM-900- und UMTS- Immissionen desselben Betreibers (Betreiber A) verglichen; die UMTS-Immissionen des Betreibers B bleiben unberücksichtigt. Die Hauptstrahlrichtung trifft offenbar je nach System bei ca. 210-250 m auf den Boden, danach ist bei allen Funkdiensten eine gleichmäßige Abnahme der Immission zu beobachten.

An den Messpunktepaaren 1.4_SY/1.5_SY sowie 1.6_SY/1.7_SY kann der Einfluss der Sichtbedingungen vom Messpunkt zur Anlage bewertet werden. Aus einem Vergleich der Messwerte lässt sich ableiten, dass die Messpunkte ohne Sicht bei LTE eine um 9 bis 11 dB kleinere Immission erfahren als Messpunkte vergleichbarer Entfernung mit Sicht.

Zusätzlich zu den systematischen Messpunkten wurden 5 statistische Messpunkte ausgewürfelt, an denen neben den LTE-Immissionen auch sämtliche Immissionen im Frequenzbereich 100 kHz bis 3 GHz erfasst wurden. Nachfolgendes Bild sowie Tabelle 3.1d beschreibt die Lage der statistischen Messpunkte.



Bild 3.1d: Szenario 1: Lageplan mit Anlagenstandort, Ausrichtung der LTE-Sendeantennen und Verteilung der statistischen Messpunkte

Punkt Nr.	Messort	Sicht (zu LTE)	Horizontal- entfernung zur LTE-Anlage
1.1_ST	Wolfsbankstraße 61, Einfahrt Autohaus Kufen	nein	175 m
1.2_ST	Keunefeld, direkt vor der Anlage	nein	25 m
1.3_ST	Pookweg vor Haus Nr. 43	nein	245 m
1.4_ST	Jahnstraße vor Eingang Hauptschule Bochold	Bäume	165 m
1.5_ST	Jahnstraße gegenüber Umspannwerk	Bäume	190 m

Tabelle 3.1d: Szenario 1: Beschreibung der statistischen Messpunkte

In folgender Tabelle ist zunächst nur die LTE-Immission für die 5 Punkte angegeben. Anschließend werden die GSM- und UMTS-Mobilfunkimmissionen (hier sind alle berücksichtigt und nicht nur diejenigen des LTE-Standorts) sowie die Gesamtimmissionen im Frequenzbereich 100 kHz – 3 GHz (mit LTE) dargestellt.

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
1.1_ST	0,08	0,14	17,1
1.2_ST	0,18	0,32	90,3
1.3_ST	0,05	0,09	6,5
1.4_ST	0,73	1,26	1.424,2
1.5_ST	0,18	0,32	89,7

 Tabelle 3.1e:
 Szenario 1, statistische MP: LTE-Immission

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
1.1_ST	0,35	0,65	319,4
1.2_ST	0,56	1,14	832,0
1.3_ST	0,11	0,21	32,3
1.4_ST	1,03	2,18	2.812,0
1.5_ST	0,53	1,03	749,3

Tabelle 3.1f: Szenario 1, statistische MP: GSM- und UMTS-Immission

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
1.1_ST	0,36	0,69	349,4
1.2_ST	0,59	1,19	930,6
1.3_ST	0,13	0,25	43,2
1.4_ST	1,27	2,52	4.246,7
1.5_ST	0,57	1,12	869,4

Tabelle 3.1g: Szenario 1, statistische MP: Gesamtimmission im Bereich 100 kHz – 3 GHz (mit LTE)



Bild 3.1e: Szenario 1, statistische MP: Grafische Darstellung der gemessenen Immission

An allen statistischen Messpunkten dominiert bei der Gesamtimmission der Anteil von GSMund UMTS-Mobilfunkanlagen. Abschließend sind die Ergebnisse der Momentanwertmessung dargestellt. Der Unterschied zwischen örtlich und zeitlich maximierter LTE-Immission und örtlich und zeitlich gemittelter LTE-Immission entspricht feldstärkebezogen einem Faktor 7,0.

Messpunktbeschreibung			
	45335 Essen, Pookwe	eg 6, vor den Garagen	
Horizontalabstand zur Anlage Sichtverhältnisse			
75	m	keine Sicht	
örtlich und	d zeitlich maximierte Imr	nission (max. Anlagena	uslastung)
	0,42	V/m	
örtlich und zeitlich gemittelte Immission (Momentanimmission)			
1,1 m Höhe 1,5 m Höhe 1,7 m Höhe Mittelwert			
0,058 V/m	0,063 V/m	0,057 V/m	0,06 V/m

 Tabelle 3.1h:
 Szenario 1: Unterschied zwischen der örtlich und zeitlich gemittelten und der örtlich und zeitlich maximierten LTE-Immission

3.1.2 Hoch montierte Station im städtischen Umfeld

Die Messungen zum Szenario "Hoch montierte Station im städtischen Umfeld" wurden an der Anlage Neue Fruchtstraße 2 in 47057 Duisburg durchgeführt. Auf einem Hausdach ist in ca. 38 Meter Höhe über Grund ein dreisektoriges Mobilfunksystem des Betreibers A installiert, von dem neben LTE-1800 auch UMTS abgestrahlt werden. Am selben Standort, allerdings nicht am selben Mast, befindet sich auf etwa 34 m ein dreisektoriges GSM-900-System von Betreiber B und auf ca. 32 m ein GSM-1800-System von Betreiber C.

Für dieses Szenario wurden systematische Messungen an 10 Außen-Messpunkten mit und ohne direkte Sicht bei verschiedenen Orientierungen und Entfernungen zur Anlage durchgeführt. Die Messpunkte wurden in einer Linie etwa im 120°-Sektor angeordnet, um die Entfernungsabhängigkeit der Immission untersuchen zu können.

Die nähere Umgebung des Standortes, die horizontale Ausrichtung der Sendeantennen, sowie die Lage der systematischen Messpunkte sind in folgendem Bild dargestellt. Tabelle 3.2a beschreibt die Lage der systematischen Messpunkte.





Szenario 2: Lageplan mit Anlagenstandort, Ausrichtung der LTE-Sendeantennen und Verteilung der systematischen Messpunkte

Punkt Nr.	Messort	Sicht (zu LTE)	Horizontal- entfernung zur LTE-Anlage
2.1_SY	Neudorfer Straße vor Haus Nr. 103 an Bus-Haltestelle	ja	56 m
2.2_SY	Neudorfer Straße zwischen Haus Nr. 107 und 105	ja	83 m
2.3_SY	Neudorfer Straße vor Haus Nr. 109 (Heiko Kfz-Teile)	ja	111 m
2.4_SY	Neudorfer Straße vor Haus Nr. 115	ja	140 m
2.5_SY	Neudorfer Straße vor Haus Nr. 117, Ecke Blumenstraße	ja	166 m
2.6_SY	Neudorfer Straße vor Haus Nr. 125	ja	197 m
2.7_SY	Neudorfer Straße vor Haus Nr. 131	ja	223 m
2.8_SY	Neudorfer Straße vor Haus Nr. 141	ja	249 m
2.9_SY	Neudorfer Straße vor Haus Nr. 147, Ecke Alte Schanze	Bäume	283 m
2.10_SY	Neudorfer Straße vor Haus Nr. 151	nein	315 m

Tabelle 3.2a: Szenario 2: Beschreibung der systematischen Messpunkte

In folgender Tabelle ist zunächst nur die LTE-Immission für die 10 Punkte angegeben. Die Summenimmission aus GSM- und UMTS-Signalen vom selben Standort wird anschließend in einer zweiten Tabelle dargestellt.

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
2.1_SY	0,57	0,97	847,4
2.2_SY	0,30	0,52	244,4
2.3_SY	0,59	1,00	908,0
2.4_SY	0,24	0,40	147,3
2.5_SY	0,79	1,35	1.652,2
2.6_SY	1,11	1,91	3.296,6
2.7_SY	1,52	2,60	6.138,5
2.8_SY	2,58	4,42	17.703,7
2.9_SY	1,03	1,76	2.805,8
2.10_SY	0,26	0,45	181,2

Tabelle 3.2b: Szenario 2, systematische MP: LTE-Immission

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
2.1_SY	0,69	1,43	1.268,3
2.2_SY	0,77	1,79	1.557,4
2.3_SY	0,94	2,09	2.355,4
2.4_SY	1,35	3,17	4.808,7
2.5_SY	1,03	2,12	2.824,5
2.6_SY	1,82	3,30	8.780,2
2.7_SY	2,24	3,97	13.291,7
2.8_SY	1,90	3,55	9.620,9
2.9_SY	0,78	1,35	1.616,4
2.10_SY	0,36	0,65	344,2

Tabelle 3.2c: Szenario 2, systematische MP: Summenimmission GSM + UMTS

In folgendem Bild sind die Resultate aus den obigen beiden Tabellen visualisiert. An 8 der 10 Messpunkte dominieren grenzwertbezogen und absolut die GSM-/UMTS-Immissionen im Vergleich zu den LTE-Immissionen. Der leistungsgemittelte grenzwertbezogene Unterschiedsfaktor zwischen GSM-/UMTS-Immissionen und LTE-Immissionen beträgt ca. 5,0 dB.





In Bild 3.2c sind speziell die Ergebnisse der Messungen zur Untersuchung der Entfernungsabhängigkeit dargestellt. Hierbei wurden nur die Messpunkte mit direkter Sicht zur Anlage berücksichtigt (2.1_SY bis 2.8_SY). Die LTE-Immissionen werden dabei mit den UMTS-Immissionen desselben Betreibers (Betreiber A) am selben Mast verglichen; die Immissionen der Betreiber B und C bleiben unberücksichtigt. Im Vergleich zur niedrig montierten Anlage (Szenario 1) fällt auf, dass bei diesem LTE-System selbst bei einem Abstand von 250 m von der Anlage die vertikale Hauptstrahlrichtung offenbar noch nicht erreicht ist.



Bild 3.2c: Szenario 2, systematische MP: Abstandsabhängigkeit der Messpunkte mit freier Sicht auf die Anlage, nur Betreiber A

Zusätzlich zu den systematischen Messpunkten wurden 5 statistische Messpunkte ausgewürfelt, an denen neben den LTE-Immissionen auch sämtliche Immissionen im Frequenzbereich 100 kHz bis 3 GHz erfasst wurden. Nachfolgendes Bild sowie Tabelle 3.2d beschreiben die Lage der statistischen Messpunkte.



Bild 3.2d: Szenario 2: Lageplan mit Anlagenstandort, Ausrichtung der LTE-Sendeantennen und Verteilung der statistischen Messpunkte

Punkt Nr.	Messort	Sicht (zu LTE)	Horizontal- entfernung zur LTE-Anlage
2.1_ST	Park zwischen Neuer Fruchtstraße und Bahngleisen	nein	85 m
2.2_ST	Neue Fruchtstraße vor Haus Nr. 12	Bäume	120 m
2.3_ST	Koloniestraße Ecke Neue Fruchtstraße	ja	230 m
2.4_ST	Kammerstraße gegenüber GEK Barmer	nein	250 m
2.5_ST	Ludgeriplatz am Zauneingang zu Klöcknerstr. 48-50	nein	370 m

Tabelle 3.2d: Szenario 2: Beschreibung der statistischen Messpunkte

In folgender Tabelle ist zunächst nur die LTE-Immission für die 5 Punkte angegeben. Anschließend werden die GSM- und UMTS-Mobilfunkimmissionen (hier sind alle berücksichtigt und nicht nur diejenigen des LTE-Standorts) sowie die Gesamtimmissionen im Frequenzbereich 100 kHz – 3 GHz (mit LTE) dargestellt.

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
2.1_ST	0,07	0,12	12,2
2.2_ST	0,07	0,12	12,9
2.3_ST	0,30	0,51	230,7
2.4_ST	0,12	0,20	35,2
2.5_ST	0,04	0,06	3,5

Tabelle 3.2e: Szenario 2, statistische MP: LTE-Immission

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
2.1_ST	0,31	0,70	257,3
2.2_ST	0,40	0,80	420,5
2.3_ST	0,68	1,39	1.215,0
2.4_ST	0,44	0,76	515,2
2.5_ST	0,32	0,56	269,0

Tabelle 3.2f: Szenario 2, statistische MP: GSM- und UMTS-Immission

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
2.1_ST	0,32	0,72	272,8
2.2_ST	0,41	0,81	435,4
2.3_ST	0,74	1,49	1.450,7
2.4_ST	0,46	0,83	566,7
2.5_ST	0,33	0,64	292,5

Tabelle 3.2g: Szenario 2, statistische MP: Gesamtimmission im Bereich 100 kHz – 3 GHz (mit LTE)

An allen statistischen Messpunkten dominiert bei der Gesamtimmission der Anteil von GSMund UMTS-Mobilfunkanlagen.





Abschließend sind die Ergebnisse der Momentanwertmessung dargestellt. Der Unterschied zwischen örtlich und zeitlich maximierter LTE-Immission und örtlich und zeitlich gemittelter LTE-Immission entspricht feldstärkebezogen einem Faktor 3,1.

Messpunktbeschreibung					
47057 Duisburg, Parkplatz am Duisburg Hbf. Osteingang					
Horizontalabstand zur Anlage		Sichtverhältnisse			
70 m		freie Sicht			
örtlich und zeitlich maximierte Immission (max. Anlagenauslastung)					
0,25 V/m					
örtlich und zeitlich gemittelte Immission (Momentanimmission)					
1,1 m Höhe	1,5 m Höhe	1,7 m Höhe	Mittelwert		
0,086 V/m	0,076 V/m	0,086 V/m	0,08 V/m		

 Tabelle 3.2h:
 Szenario 2: Unterschied zwischen der örtlich und zeitlich gemittelten und der örtlich und zeitlich maximierten LTE-Immission

3.1.3 LTE-Anlage auf einem Gebäudedach und Ermittlung der Immission im selben Gebäude (Dämpfungsverlauf)

Die Messungen zum Szenario "LTE-Anlage auf einem Gebäudedach und Ermittlung der Immission im selben Gebäude" zur Untersuchung des Dämpfungsverlaufs wurden an der Anlage Kampstraße 106 in 44137 Dortmund durchgeführt. Auf dem Gebäude der Firma Telekom ist in ca. 42-45 Meter Höhe über Grund ein dreisektoriges Mobilfunksystem des Betreibers A installiert, von dem neben LTE-1800 auch GSM-900 und UMTS abgestrahlt wird. Am selben Mast befindet sich zwischen 35 und 40 m ein einsektoriges GSM-900-/GSM-1800- und UMTS-System von Betreiber B und ein dreisektoriges UMTS-System von Betreiber D.

Örtlich getrennt in einem anderen Standortbereich ist ein zweisektoriges System (GSM-900, GSM-1800 und UMTS) von Betreiber B installiert.

Die nähere Umgebung des Standortes, die horizontale Ausrichtung der Sendeantennen, sowie die Lage der systematischen und statistischen Messpunkte sind in folgendem Bild dargestellt.



Bild 3.3a: Szenario 3: Lageplan mit Anlagenstandort, Ausrichtung der LTE-Sendeantennen und Messpunktverteilung

Für dieses Szenario wurden systematische Messungen an 9 Innen- und einem Außen-Messpunkt durchgeführt. Die Innenmesspunkte wurden dabei in verschiedenen Geschosshöhen gewählt, um den Verlauf der Immission über der Geschosshöhe untersuchen zu können. Dabei wurden die Stockwerke in 2 verschiedenen vertikalen Linien durchlaufen: Eine Linie befindet sich an einer geöffneten Fensterfront, um z.B. Beugungen an der Dachkante bzw. Reflexionen an benachbarten Gebäudeteilen zu erfassen, wohingegen sich die zweite Linie in einem nahe gelegenen Treppenhaus ohne Fenster befindet. Beide Linien sind nahezu unter der Anlage angeordnet.

Nachfolgende Tabelle beschreibt die Lage der systematischen Messpunkte.

Punkt Nr.	Messort	Sicht (zu LTE)	Horizontal- entfernung zur LTE-Anlage
3.1_SY	Kampstraße 106, 5. OG vor Fahrstühlen, Fenster offen	nein	unter Anlage
3.2_SY	Kampstraße 106, 5. OG, Treppenhaus (ohne Fenster)	nein	unter Anlage
3.3_SY	Kampstraße 106, 4. OG, Treppenhaus (ohne Fenster)	nein	unter Anlage
3.4_SY	Kampstraße 106, 4. OG vor Fahrstühlen, Fenster offen	nein	unter Anlage
3.5_SY	Kampstraße 106, 3. OG, Treppenhaus (ohne Fenster)	nein	unter Anlage
3.6_SY	Kampstraße 106, 3. OG vor Fahrstühlen, Fenster offen	nein	unter Anlage
3.7_SY	Kampstraße 106, 2. OG, Treppenhaus (ohne Fenster)	nein	unter Anlage
3.8_SY	Kampstraße 106, 2. OG vor Fahrstühlen, Fenster offen	nein	unter Anlage
3.9_SY	Kampstraße 106, Treppenhaus zwischen 1. und 2. OG	nein	unter Anlage
3.10_SY	Kampstraße 106, vor dem Gebäude (an Pyramide)	ја	53 m

Tabelle 3.3a: Szenario 3: Beschreibung der systematischen Messpunkte

In folgender Tabelle ist zunächst nur die LTE-Immission für die 10 Punkte angegeben. Die Summenimmission aus GSM- und UMTS-Signalen vom selben Standort wird anschließend in einer zweiten Tabelle dargestellt, wobei hier nur die Immissionen vom Hauptstandortbereich (Mast mit der LTE-Anlage) erfasst werden, die des benachbarten Standortbereiches hingegen nicht.

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
3.1_SY	0,07	0,12	14,1
3.2_SY	0,05	0,08	5,4
3.3_SY	0,01	0,01	0,2
3.4_SY	0,08	0,13	15,1
3.5_SY	0,00	0,01	0,1
3.6_SY	0,05	0,09	7,1
3.7_SY	0,00	0,01	0,0
3.8_SY	0,04	0,07	4,7
3.9_SY	0,00	0,00	0,0
3.10_SY	0,62	1,06	1.024,1

Tabelle 3.3b: Szenario 3, systematische MP: LTE-Immission

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
3.1_SY	0,25	0,57	170,8
3.2_SY	0,09	0,20	21,4
3.3_SY	0,04	0,09	4,2
3.4_SY	0,29	0,66	228,4
3.5_SY	0,01	0,03	0,6
3.6_SY	0,22	0,49	133,1
3.7_SY	0,02	0,04	0,8
3.8_SY	0,23	0,50	144,2
3.9_SY	0,01	0,01	0,1
3.10_SY	0,60	1,27	965,7

Tabelle 3.3c: Szenario 3, systematische MP: Summenimmission GSM + UMTS
In folgendem Bild sind die Resultate aus den obigen beiden Tabellen visualisiert. An allen 10 Messpunkten dominieren grenzwertbezogen die GSM-/UMTS-Immissionen im Vergleich zu den LTE-Immissionen. Absolut gesehen sind an 9 der 10 Messpunkte die GSM-/UMTS-Immissionen höher. Der leistungsgemittelte grenzwertbezogene Unterschiedsfaktor zwischen GSM-/UMTS-Immissionen und LTE-Immissionen beträgt ca. 12,5 dB.



Bild 3.3b: Szenario 3, systematische MP: Grafische Darstellung der gemessenen Immission

In den Bildern 3.3c und 3.3d sind speziell die Ergebnisse der Messungen zur Untersuchung des Dämpfungsverlaufs für beide vertikalen Linien visualisiert. Die LTE-Immissionen werden dabei mit den GSM-900- und UMTS-Immissionen desselben Betreibers (Betreiber A) am selben Mast verglichen; die Immissionen der Betreiber B und D bleiben unberücksichtigt. Wohingegen bei der Linie "Fensterfront", offensichtlich hervorgerufen durch Reflexionen an benachbarten Gebäudeteilen, die Abnahme der Immission hin zu tieferen Stockwerken vor allem bei LTE und UMTS eher ungleichmäßig ist, verläuft bei der Linie "Treppenhaus" die Immissionsabnahme wesentlich regelmäßiger. Der Dämpfungsverlauf von LTE ähnelt quantitativ demjenigen von UMTS und weniger dem von GSM-900. Im untersten Geschoss wurden von der Anlage auf dem Dach kaum noch messbare Immissionen festgestellt.



Bild 3.3c: Szenario 3, systematische MP: Dämpfungsverlauf der Messpunkte in Abhängigkeit der Geschosshöhe, Linie "Fensterfront", nur Betreiber A



Bild 3.3d: Szenario 3, systematische MP: Dämpfungsverlauf der Messpunkte in Abhängigkeit der Geschosshöhe, Linie "Treppenhaus", nur Betreiber A

Die größten Immissionen im untersuchten Szenario wurden am Außenmesspunkt befunden, obwohl dieser sich am weitesten von der Anlage entfernt befindet. Das unterstreicht die

signifikante Dämpfung der elektromagnetischen Felder durch das Baumaterial der Geschossdecken.

Zusätzlich zu den systematischen Messpunkten wurden 5 statistische Messpunkte ausgewürfelt, an denen neben den LTE-Immissionen auch sämtliche Immissionen im Frequenzbereich 100 kHz bis 3 GHz erfasst wurden. Nachfolgende Tabelle beschreibt die Lage der statistischen Messpunkte (siehe auch Bild 3.3a).

Punkt Nr.	Messort	Sicht (zu LTE)	Horizontal- entfernung zur LTE-Anlage
3.1_ST	Brinkhoffstraße, am Firmenparkplatz	ja	210 m
3.2_ST	Königswall Ecke Hoher Wall, vor der Anlage	nein	55 m
3.3_ST	Grafenhof, vor dem City-Hotel	nein	90 m
3.4_ST	Hoher Wall Ecke Frankenstraße	nein	130 m
3.5_ST	Amalienstraße, an der Liebfrauenkirche	nein	315 m

Tabelle 3.3d: Szenario 3: Beschreibung der statistischen Messpunkte

In folgender Tabelle ist zunächst nur die LTE-Immission für die 5 Punkte angegeben. Anschließend werden die GSM- und UMTS-Mobilfunkimmissionen (hier sind alle berücksichtigt und nicht nur diejenigen des LTE-Standorts) sowie die Gesamtimmissionen im Frequenzbereich 100 kHz – 3 GHz (mit LTE) dargestellt.

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
3.1_ST	0,10	0,16	23,8
3.2_ST	0,13	0,22	42,4
3.3_ST	0,09	0,16	23,0
3.4_ST	0,10	0,17	25,5
3.5_ST	0,01	0,02	0,44

Tabelle 3.3e: Szenario 3, statistische MP: LTE-Immission

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
3.1_ST	0,97	2,12	2.515,4
3.2_ST	0,97	2,04	2.485,6
3.3_ST	0,61	1,28	997,6
3.4_ST	1,39	3,09	5.138,0
3.5_ST	0,12	0,22	37,1

Tabelle 3.3f: Szenario 3, statistische MP: GSM- und UMTS-Immission

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
3.1_ST	0,98	2,14	2.562,9
3.2_ST	0,99	2,12	2.600,3
3.3_ST	0,62	1,30	1.028,5
3.4_ST	1,40	3,11	5.178,1
3.5_ST	0,13	0,26	43,0

Tabelle 3.3g: Szenario 3, statistische MP: Gesamtimmission im Bereich 100 kHz – 3 GHz (mit LTE)

An allen statistischen Messpunkten dominiert bei der Gesamtimmission der Anteil von GSMund UMTS-Mobilfunkanlagen.



Bild 3.3e: Szenario 3, statistische MP: Grafische Darstellung der gemessenen Immission

Abschließend sind die Ergebnisse der Momentanwertmessung dargestellt. Der Unterschied zwischen örtlich und zeitlich maximierter LTE-Immission und örtlich und zeitlich gemittelter LTE-Immission entspricht feldstärkebezogen einem Faktor 17,2.

Messpunktbeschreibung					
	44137 Dortmund,	Rheinische Straße			
Horizontalabstand zur Anlage Sichtverhältnisse					
26	7 m	freie	Sicht		
örtlich und	örtlich und zeitlich maximierte Immission (max. Anlagenauslastung)				
	1,03	V/m			
örtlich und zeitlich gemittelte Immission (Momentanimmission)					
1,1 m Höhe	1,5 m Höhe	1,7 m Höhe	Mittelwert		
0,071 V/m	0,037 V/m	0,065V/m	0,06 V/m		

 Tabelle 3.3h:
 Szenario 3: Unterschied zwischen der örtlich und zeitlich gemittelten und der örtlich und zeitlich maximierten LTE-Immission

3.1.4 LTE-Anlage auf einem Gebäudedach und Ermittlung der Immission im gegenüberliegenden Gebäude (Höhenabhängigkeit)

Die Messungen zum Szenario "LTE-Anlage auf einem Gebäudedach und Ermittlung der Immission im gegenüberliegenden Gebäude" zur Untersuchung der Höhenabhängigkeit wurden an der Anlage Poststraße 26 in 47051 Duisburg durchgeführt. Auf einem Hausdach ist in ca. 24 Meter Höhe über Grund ein dreisektoriges Mobilfunksystem des Betreibers A installiert, von dem neben LTE-1800 auch GSM-900 und UMTS (GSM-900 allerdings mit anderer Sektorausrichtung) abgestrahlt werden. Am Standort sind keine weiteren Betreiber vertreten.

Die nähere Umgebung des Standortes, die horizontale Ausrichtung der Sendeantennen sowie die Lage der systematischen und statistischen Messpunkte sind in folgendem Bild dargestellt.



Bild 3.4a: Szenario 4: Lageplan mit Anlagenstandort, Ausrichtung der LTE-Sendeantennen und Messpunktverteilung

Für dieses Szenario wurden systematische Messungen an 8 Innen- und 2 Außen-Messpunkten mit und ohne direkte Sicht in verschiedenen Stockwerken eines Gebäudes und auf Straßenniveau in unmittelbarer Nähe der LTE-Anlage durchgeführt. Die Beschreibung der Messpunkte erfolgt auf Bitten des Hausbesitzers lediglich pauschal.

Punkt Nr.	Messort	Sicht (zu LTE)	Horizontal- entfernung zur LTE-Anlage
4.1_SY	benachbartes Gebäude, Zimmer im 1. OG, Fenster offen	ja	71 m
4.2_SY	benachbartes Gebäude, Zimmer im 2. OG, Fenster offen	ja	71 m
4.3_SY	benachbartes Gebäude, Zimmer im 3. OG, Fenster offen	ja	71 m
4.4_SY	benachbartes Gebäude, Zimmer im 4. OG, Fenster offen	ja	71 m
4.5_SY	benachbartes Gebäude, Zimmer im 5. OG, Fenster offen	ja	71 m
4.6_SY	benachbartes Gebäude, Zimmer im 6. OG, Fenster offen	ja	71 m
4.7_SY	benachbartes Gebäude, Zimmer im 7. OG, Fenster offen	ja	71 m
4.8_SY	benachbartes Gebäude, Dach	ja	71 m
4.9_SY	vor dem benachbarten Gebäude, in Flucht mit MP 4.1-4.8	ја	71 m
4.10_SY	benachbartes Gebäude, Innen-MP im EG, ohne Sicht	nein	84 m

Nachfolgende Tabelle beschreibt die Lage der systematischen Messpunkte.

 Tabelle 3.4a:
 Szenario 4: Beschreibung der systematischen Messpunkte

In folgender Tabelle ist zunächst nur die LTE-Immission für die 10 Punkte angegeben. Die Summenimmission aus GSM- und UMTS-Signalen vom selben Standort wird anschließend in einer zweiten Tabelle dargestellt.

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
4.1_SY	0,80	1,37	1.699,6
4.2_SY	0,64	1,10	1.097,3
4.3_SY	0,47	0,80	575,9
4.4_SY	1,20	2,05	3.804,9
4.5_SY	2,01	3,44	10.723,6
4.6_SY	3,66	6,26	35.509,1
4.7_SY	3,38	5,78	30.223,1
4.8_SY	2,91	4,98	22.404,7
4.9_SY	0,32	0,54	263,2
4.10_SY	0,02	0,04	1,6

Tabelle 3.4b: Szenario 4, systematische MP: LTE-Immission

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
4.1_SY	1,07	2,35	3.038,3
4.2_SY	1,99	4,68	10.551,8
4.3_SY	2,63	6,21	18.328,8
4.4_SY	3,99	9,23	42.285,7
4.5_SY	4,68	10,36	58.102,9
4.6_SY	4,75	10,12	59.801,1
4.7_SY	3,48	7,16	32.195,5
4.8_SY	1,78	3,86	8.415,6
4.9_SY	0,84	1,90	1.850,9
4.10_SY	0,09	0,22	22,5

Tabelle 3.4c: Szenario 4, systematische MP: Summenimmission GSM + UMTS

In folgendem Bild sind die Resultate aus den obigen beiden Tabellen visualisiert. An 9 der 10 Messpunkte dominieren grenzwertbezogen und absolut die GSM-/UMTS-Immissionen im Vergleich zu den LTE-Immissionen. Der leistungsgemittelte grenzwertbezogene Unterschiedsfaktor zwischen GSM-/UMTS-Immissionen und LTE-Immissionen beträgt ca. 8,7 dB.



Bild 3.4b: Szenario 4, systematische MP: Grafische Darstellung der gemessenen Immission

In Bild 3.4c sind speziell die Ergebnisse der Messungen zur Untersuchung der Höhenabhängigkeit dargestellt. Hierbei wurden nur die Messpunkte mit direkter Sicht zur Anlage aufgenommen (4.1_SY bis 4.9_SY). Die LTE-Immissionen werden dabei mit den GSM- und UMTS-Immissionen desselben Betreibers (Betreiber A) am selben Mast verglichen. Wohingegen bei GSM-900 die höchste Immission im 5. OG erreicht wird, liegt das Maximum bei UMTS und LTE ein Stockwerk höher. Die Messpunkte im 7. OG und auf dem Dach liegen offensichtlich schon oberhalb der vertikalen Hauptstrahlrichtung der Anlage.



Bild 3.4c: Szenario 4, systematische MP: Abstandsabhängigkeit der Messpunkte mit freier Sicht auf die Anlage, nur Betreiber A

Der Messpunkt 4.10_SY (Erdgeschoss, ohne Sicht) weist gegenüber dem Messpunkt 4.9_SY (Erdgeschoss, mit Sicht) einen um 19 dB geringeren Pegel auf. Beide befinden sich in gleicher Sektorausrichtung zur Anlage. Zwar ist der MP 4.10_SY etwas weiter von der Anlage entfernt, allerdings dürfte die fehlende Sicht die Hauptursache für den geringeren Pegel sein.

Zusätzlich zu den systematischen Messpunkten wurden 5 statistische Messpunkte ausgewürfelt, an denen neben den LTE-Immissionen auch sämtliche Immissionen im Frequenzbereich 100 kHz bis 3 GHz erfasst wurden. Nachfolgende Tabelle beschreibt die Lage der statistischen Messpunkte (siehe auch Bild 3.4a).

Punkt Nr.	Messort	Sicht (zu LTE)	Horizontal- entfernung zur LTE-Anlage
4.1_ST	vor dem Anlagengebäude	ja	25 m
4.2_ST	Königstraße, am Brunnen	nein	215 m
4.3_ST	Untermauerstraße, am Wendekreis	nein	215 m
4.4_ST	Steinsche Gasse, vor Müllersgasse 2	nein	360 m
4.5_ST	Stadtarchiv Duisburg, Karmelplatz 5, Treppe zum Wasser	nein	340 m

Tabelle 3.4d: Szenario 4: Beschreibung der statistischen Messpunkte

In folgender Tabelle ist zunächst nur die LTE-Immission für die 5 Punkte angegeben. Anschließend werden die GSM- und UMTS-Mobilfunkimmissionen (hier sind alle berücksichtigt und nicht nur diejenigen des LTE-Standorts) sowie die Gesamtimmissionen im Frequenzbereich 100 kHz – 3 GHz (mit LTE) dargestellt.

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
4.1_ST	0,45	0,76	525,2
4.2_ST	0,29	0,50	227,2
4.3_ST	0,11	0,18	29,5
4.4_ST	0,07	0,12	12,31
4.5_ST	0,06	0,10	8,52

Tabelle 3.4e: Szenario 4, statistische MP: LTE-Immission

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
4.1_ST	1,65	3,63	7.204,7
4.2_ST	1,49	2,74	5.880,2
4.3_ST	0,49	0,87	634,3
4.4_ST	0,23	0,41	139,8
4.5_ST	0,20	0,39	105,0

Tabelle 3.4f: Szenario 4, statistische MP: GSM- und UMTS-Immission

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
4.1_ST	1,71	3,71	7.731,3
4.2_ST	1,52	2,78	6.109,3
4.3_ST	0,50	0,89	666,9
4.4_ST	0,24	0,43	153,0
4.5_ST	0,21	0,43	120,5

Tabelle 3.4g: Szenario 4, statistische MP: Gesamtimmission im Bereich 100 kHz – 3 GHz (mit LTE)



Bild 3.4d: Szenario 4, statistische MP: Grafische Darstellung der gemessenen Immission

An allen statistischen Messpunkten dominiert bei der Gesamtimmission der Anteil von GSMund UMTS-Mobilfunkanlagen.

Abschließend sind die Ergebnisse der Momentanwertmessung dargestellt. Der Unterschied zwischen örtlich und zeitlich maximierter LTE-Immission und örtlich und zeitlich gemittelter LTE-Immission entspricht feldstärkebezogen einem Faktor 3,8.

Messpunktbeschreibung					
	47051 Duisburg, Parkp	latz vor Salvatorkirche			
Horizontalabstand zur Anlage Sichtverhältnisse					
187 m freie Sicht					
örtlich und zeitlich maximierte Immission (max. Anlagenauslastung)					
	1,44	V/m			
örtlich u	örtlich und zeitlich gemittelte Immission (Momentanimmission)				
1,1 m Höhe 1,5 m Höhe 1,7 m Höhe Mittelwert					
0,432 V/m	0,279 V/m	0,403 V/m	0,38 V/m		

 Tabelle 3.4h:
 Szenario 4: Unterschied zwischen der örtlich und zeitlich gemittelten und der örtlich und zeitlich maximierten LTE-Immission

3.1.5 Indoor-Versorgung

Die Messungen zum Szenario "Indoor-Versorgung" wurden in der E-Plus-Straße 1 in 40472 Düsseldorf durchgeführt. In der dortigen Zentrale der E-Plus Mobilfunk GmbH & Co. KG betreibt die Firma E-Plus eine Indoor-Mobilfunkanlage, bei der die Mobilfunkdienste LTE-1800, GSM-1800 und UMTS mit mehreren Hundert Antennen (in der Regel an der Decke montiert) im Gebäude verteilt werden. Das Szenario wurde deswegen ausgewählt, weil es sich von der Versorgungssituation signifikant von einem typischen Outdoor-Szenario (d.h. LTE-Anlage auf einem Mast oder einem Hausdach) unterscheidet.

Für dieses Szenario wurden systematische Messungen an 11 Innen-Messpunkten mit und ohne direkte Sicht bei verschiedenen Orientierungen und Entfernungen zur Anlage durchgeführt. 9 der 11 Messpunkte wurden in einer Linie zwischen 2 Deckenantennen ("Antenne 1 und 2") gewählt, um die Entfernungsabhängigkeit der Immission untersuchen zu können. Nachfolgende Tabelle beschreibt die Lage der systematischen Messpunkte. Die Spalte "Horizontalentfernung zur LTE-Anlage" beschreibt in diesem Szenario den horizontalen Abstand zur *nächstgelegenen* Indoor-Antenne. MP 5.11_SY liegt mit 17 m Abstand zur Antenne 1 direkt unter Antenne 2. Folgendem Bild zeigt die Messung am letzten Punkt der Linienmessung (5.11_SY). An der Decke ist eine der Indoor-Antennen (Antenne 2) zu sehen.





Szenario 1: Linienmessung beim Indoor-Szenario

Punkt Nr.	Messort	Sicht (zu LTE)	Horizontal- entfernung zur LTE-Anlage
5.1_SY	Konferenzraum A, EG, Antenne außerhalb des Raums	nein	6 m
5.2_SY	Konferenzraum B, EG, Antenne außerhalb des Raums	nein	3 m
5.3_SY	Linienmessung Bürobereich 2. OG, unter der Antenne 1	ja	0 m
5.4_SY	Linienmessung Bürobereich, 2 m entfernt von Antenne 1	ja	2 m
5.5_SY	Linienmessung Bürobereich, 4 m entfernt von Antenne 1	ja	4 m
5.6_SY	Linienmessung Bürobereich, 6 m entfernt von Antenne 1	ja	6 m
5.7_SY	Linienmessung Bürobereich, 8 m entfernt von Antenne 1	ja	8 m
5.8_SY	Linienmessung Bürobereich, 10 m entfernt von Antenne 1	ja	7 m
5.9_SY	Linienmessung Bürobereich, 12 m entfernt von Antenne 1	ja	5 m
5.10_SY	Linienmessung Bürobereich, 14 m entfernt von Antenne 1	ја	3 m
5.11_SY	Linienmessung Bürobereich, 17 m entfernt von Antenne 1	ја	0 m

Tabelle 3.5a: Szenario 5: Beschreibung der systematischen Messpunkte

In folgender Tabelle ist zunächst nur die LTE-Immission für die 11 Punkte angegeben. Die Summenimmission aus GSM- und UMTS-Signalen wird anschließend in einer zweiten Tabelle dargestellt.

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
5.1_SY	0,20	0,34	104,8
5.2_SY	0,24	0,40	148,0
5.3_SY	0,66	1,13	1.149,1
5.4_SY	0,51	0,87	692,4
5.5_SY	0,31	0,53	257,2
5.6_SY	0,29	0,49	218,9
5.7_SY	0,19	0,33	100,1
5.8_SY	0,27	0,47	199,7

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
5.9_SY	0,32	0,54	263,2
5.10_SY	0,42	0,73	479,0
5.11_SY	0,70	1,19	1289,3

Tabelle 3.5b: Szenario 5, systematische MP: LTE-Immission

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
5.1_SY	0,71	1,20	1.330,7
5.2_SY	1,03	1,75	2.823,8
5.3_SY	3,38	5,70	30.316,8
5.4_SY	2,72	4,63	19.696,4
5.5_SY	1,32	2,23	4.591,2
5.6_SY	0,95	1,62	2.402,7
5.7_SY	1,05	1,79	2.927,5
5.8_SY	1,23	2,09	4.005,2
5.9_SY	1,39	2,35	5.103,4
5.10_SY	1,86	3,13	9.211,3
5.11_SY	4,13	6,90	45.228,6

Tabelle 3.5c: Szenario 5, systematische MP: Summenimmission GSM + UMTS

In folgendem Bild sind die Resultate aus den obigen beiden Tabellen visualisiert. An allen Messpunkten dominieren grenzwertbezogen und absolut die GSM-/UMTS-Immissionen gegenüber den LTE-Immissionen. Der leistungsgemittelte grenzwertbezogene Unterschieds-faktor zwischen GSM-/UMTS-Immissionen und LTE-Immissionen beträgt 13,0 dB.



Bild 3.5b: Szenario 5, systematische MP: Grafische Darstellung der gemessenen Immission

In Bild 3.5c sind speziell die Ergebnisse der Linienmessungen zwischen den beiden Indoor-Antennen 1 und 2 dargestellt. Die LTE-Immissionen werden dabei mit den GSM-1800- und UMTS-Immissionen, die von denselben Antennen erzeugt werden, verglichen. Für alle 3 Systeme ist der qualitative Verlauf gleich: Direkt unterhalb einer Antenne ist die Immission am höchsten; bei steigender Entfernung nimmt sie zunächst ab, um dann bei Annäherung an die nächste Antenne wieder anzusteigen. Offensichtlich sind die GSM-1800 Immissionen am höchsten und die LTE-Immissionen am niedrigsten.



Bild 3.5c: Szenario 5, systematische MP: Ergebnisse der Linienmessungen (Messpunkte 4.3_SY bis 4.11_SY)

Zusätzlich zu den systematischen Messpunkten wurden 5 statistische Messpunkte ausgewählt, an denen neben den LTE-Immissionen auch sämtliche Immissionen im Frequenzbereich 100 kHz bis 3 GHz erfasst wurden. Im Gegensatz zu den übrigen Szenarien wurden diese Messpunkte hier jedoch nicht ausgewürfelt. Grund dafür ist, dass die im vorliegenden Szenario untersuchte Mobilfunkanlage für eine Indoor-Versorgung konzipiert ist, d.h. aufgrund der Auslegung der Anlage und der stark HF-dämpfenden Fensterscheiben des Gebäudes (metallbedampfte Fenster zur besseren Wärmedämmung) ist eine Versorgung außerhalb des Gebäudes nicht vorgesehen. Eine Auswürfelung von Messpunkten innerhalb des Gebäudes ist ebenfalls nicht sinnvoll, da diese sich größtenteils in Bereichen befinden würden, die nicht oder nur beschränkt zugänglich sind (Wände, Mobiliar usw.). Die 5 statistischen Punkte wurden deswegen an möglichst unterschiedlichen, aber für die Mitarbeiter allgemein zugänglichen Orten ausgewählt. Aufgrund der Tatsache, dass die Indoor-Antennen oft in Abständen von nur einigen Metern voneinander installiert sind, wird in folgender Tabelle auf die Angabe der Horizontalentfernung zur Antenne verzichtet.

Punkt Nr.	Messort	Sicht (zu LTE)	Horizontal- entfernung zur LTE-Anlage
5.1_ST	Bürobereich, 2. OG, am Fenster	ја	Х
5.2_ST	Konferenzraum, 3. OG	nein	Х
5.3_ST	Teeküche 2. OG	ja	Х
5.4_ST	Empfangsbereich, zwischen 2 Antennen	ja	Х
5.5_ST	Kantine, zwischen 2 Antennen	ја	Х

Tabelle 3.5d: Szenario 5: Beschreibung der statistischen Messpunkte

In folgender Tabelle ist zunächst nur die LTE-Immission für die 5 Punkte angegeben. Anschließend werden die GSM- und UMTS-Mobilfunkimmissionen (hier sind alle berücksichtigt und nicht nur diejenigen der Indoor-Antennen) sowie die Gesamtimmissionen im Frequenzbereich 100 kHz – 3 GHz (mit LTE) dargestellt.

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
5.1_ST	0,14	0,24	50,4
5.2_ST	0,03	0,06	3,0
5.3_ST	0,14	0,24	49,8
5.4_ST	0,30	0,52	245,1
5.5_ST	0,36	0,61	338,3

Tabelle 3.5e: Szenario 5, statistische MP: LTE-Immission

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
5.1_ST	0,56	0,93	827,2
5.2_ST	0,16	0,27	67,5
5.3_ST	1,03	1,75	2.824,1
5.4_ST	1,03	1,75	2.789,7
5.5_ST	1,42	2,42	5.371,7

Tabelle 3.5f: Szenario 5, statistische MP: GSM- und UMTS-Immission

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
5.1_ST	0,58	0,98	898,9
5.2_ST	0,17	0,28	71,4
5.3_ST	1,04	1,76	2.878,0
5.4_ST	1,07	1,83	3.037,3
5.5_ST	1,47	2,50	5.719,5

Tabelle 3.5g: Szenario 5, statistische MP: Gesamtimmission im Bereich 100 kHz – 3 GHz (mit LTE)



Bild 3.5d: Szenario 5, statistische MP: Grafische Darstellung der gemessenen Immission

An allen statistischen Messpunkten dominiert bei der Gesamtimmission der Anteil von GSM und UMTS. Die "sonstigen HF-Immissionen" (ohne Mobilfunk) sind in diesem Szenario naturgemäß vergleichsweise gering, da von außen einfallende elektromagnetische Felder durch die Fensterscheiben des Gebäudes sehr stark gedämpft werden und somit die Gesamtimmission von der Indoor-Mobilfunkantennenanlage dominiert wird.

Abschließend sind die Ergebnisse der Momentanwertmessung dargestellt. Der Unterschied zwischen örtlich und zeitlich maximierter LTE-Immission und örtlich und zeitlich gemittelter LTE-Immission entspricht feldstärkebezogen einem Faktor 6,1.

Messpunktbeschreibung				
К	onferenzraum A, EG, Ante	enne außerhalb des Raum	IS	
Horizontalabstand zur Anlage Sichtverhältnisse				
6 m keine Sicht			Sicht	
örtlich und	d zeitlich maximierte Imr	nission (max. Anlagena	uslastung)	
	0,20	V/m		
örtlich u	örtlich und zeitlich gemittelte Immission (Momentanimmission)			
1,1 m Höhe 1,5 m Höhe 1,7 m Höhe Mittelwert				
0,031 V/m	0,034 V/m	0,033 V/m	0,033 V/m	

 Tabelle 3.5d:
 Szenario 5: Unterschied zwischen der örtlich und zeitlich gemittelten und der örtlich und zeitlich maximierten LTE-Immission

3.1.6 Niedrig montierter Dachstandort im ländlichen Umfeld (Ortsrand)

Die Messungen zum Szenario "Niedrig monierter Dachstandort im ländlichen Umfeld (Ortsrand)" wurden an der Anlage Lindenstr. 5 in 85567 Alxing (Landkreis Ebersberg bei München) durchgeführt. Auf einem Scheunendach ist in zirka 14 Meter Höhe ein dreisektoriges Mobilfunksystem des Betreibers A installiert, von dem LTE-800 und UMTS abgestrahlt werden. Aufgrund der Verwendung von Multibandantennen sind die horizontalen Hauptsenderichtungen für UMTS und LTE identisch.

Am gleichen Dach, allerdings mit anderer Sektorausrichtung, befinden sich noch ein dreisektoriges GSM-900-System von Betreiber B sowie ein GSM-900-Sektor des Betreibers A.

Die nähere Umgebung des Standortes, die horizontale Ausrichtung der LTE-Sendeantennen, sowie die Lage der systematischen Messpunkte sind in folgendem Bild dargestellt.



Bild 3.6a: Szenario 6: Lageplan mit Anlagenstandort und Lage der systematischen Messpunkte

Für dieses Szenario wurden systematische Messungen an 7 Außen-Messpunkten mit sowie einem Außen-Messpunkt ohne direkte Sicht bei verschiedenen Entfernungen zur Anlage durchgeführt. Die Messpunkte wurden derart angeordnet, dass sie in etwa im Versorgungsbereich einer der 3 LTE-Sektorantennen (285°) lagen. Nachfolgende Tabelle beschreibt die Lage der systematischen Messpunkte.

Punkt Nr.	Messort	Sicht (zu LTE)	Horizontal- entfernung zur LTE-Anlage
6.1_SY	Dorfstraße, Radweg (nahe Einmündung Lindenstr.)	ja	333 m
6.2_SY	Dorfstraße, Radweg	ja	321 m
6.3_SY	Dorfstraße, Radweg	ja	316 m
6.4_SY	Dorfstraße, Radweg (Ortseingang)	nein	297 m
6.5_SY	Lindenstraße	ja	264 m
6.6_SY	Lindenstraße, Einmündung Feldweg	ja	210 m
6.7_SY	Höchster Punkt nordwestlich des Anlagenstandortes	ja	159 m
6.8_SY	Feldweg nordwestlich des Anlagenstandortes	ja	251 m

Tabelle 3.6a: Szenario 6: Beschreibung der systematischen Messpunkte

In folgender Tabelle ist zunächst nur die LTE-Immission für die 8 Punkte angegeben. Die Summenimmission aus GSM- und UMTS-Signalen vom selben Standort wird anschließend in einer zweiten Tabelle dargestellt.

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
6.1_SY	0,92	2,36	2.251,7
6.2_SY	0,54	1,37	763,0
6.3_SY	0,41	1,04	439,0
6.4_SY	0,27	0,69	191,7
6.5_SY	0,85	2,17	1.916,5
6.6_SY	1,05	2,68	2.900,8
6.7_SY	2,85	7,28	21.503,6
6.8_SY	1,15	2,93	3.487,5

Tabelle 3.6b: Szenario 6, systematische MP: LTE-Immission

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
6.1_SY	1,02	1,96	2.780,2
6.2_SY	1,13	2,26	3.389,1
6.3_SY	0,81	1,63	1.733,5
6.4_SY	0,20	0,46	102,8
6.5_SY	1,27	2,71	4.289,7
6.6_SY	1,68	3,48	7.510,5
6.7_SY	2,19	4,77	12.755,9
6.8_SY	1,54	3,19	6.308,7

Tabelle 3.6c: Szenario 6, systematische MP: Summenimmission GSM + UMTS

In folgendem Bild sind die Resultate aus den obigen beiden Tabellen visualisiert. An 5 der 8 Messpunkte dominieren grenzwertbezogen die GSM-/UMTS-Immissionen im Vergleich zu den LTE-Immissionen. Absolut gesehen sind an 6 der 8 Messpunkte die GSM-/UMTS-Immissionen höher. Der leistungsgemittelte grenzwertbezogene Unterschiedsfaktor zwischen GSM-/UMTS-Immissionen und LTE-Immissionen beträgt ca. 0,6 dB.



Bild 3.6b: Szenario 6, systematische MP: Grafische Darstellung der gemessenen Immission

Zusätzlich zu den systematischen Messpunkten wurden 10 statistische Messpunkte ausgewürfelt, an denen die LTE-Immissionen gemessen wurden. An den ersten 5 dieser 10 Messpunkte wurden - zusätzlich zu den LTE-Immissionen - auch sämtliche anderen nennenswert vorhandenen Hochfrequenzimmissionen im Frequenzbereich 100 kHz bis 3 GHz erfasst. Nachfolgende Tabelle beschreibt die Lage der statistischen Messpunkte. Die Lage der Zufallsmesspunkte ist in Bild 3.6c dargestellt.

Punkt Nr.	Messort	Sicht (zu LTE)	Horizontal- entfernung zur LTE-Anlage
6.1_ST	Kirchweg 4 (Schule)	nein	315 m
6.2_ST	Kirchweg 1 (Bäckerei)	nein	301 m
6.3_ST	Bergblick 1 (Gasthof)	nein	275 m
6.4_ST	Kastanienweg (Schreinerei)	nein	306 m
6.5_ST	Lindenstr. 19	nein	210 m
6.6_ST	Lindenstr. (Hofeinfahrt)	nein	141 m
6.7_ST	Lindenstr. 6/8	ја	173 m
6.8_ST	Talstraße 11 (Ortseingang)	nein	589 m
6.9_ST	Talstraße 10	nein	513 m
6.10_ST	Talstraße 4	nein	427 m

Tabelle 3.6d: Szenario 6: Beschreibung der statistischen Messpunkte



Bild 3.6c: Szenario 6: Lageplan mit Anlagenstandort und Lage der statistischen Messpunkte

In folgender Tabelle ist zunächst nur die LTE-Immission für die 10 Punkte angegeben. Anschließend werden die GSM- und UMTS-Mobilfunkimmissionen (hier sind bei den ersten 5 MP alle berücksichtigt und bei den letzten 5 nur diejenigen des Standortes "Lindenstr. 5"), sowie für die ersten 5 Punkte die Gesamtimmissionen im Frequenzbereich 100 kHz - 3 GHz (mit LTE) dargestellt.

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
6.1_ST	0,18	0,46	85,6
6.2_ST	0,14	0,35	48,1
6.3_ST	0,51	1,30	680,0
6.4_ST	0,22	0,55	123,7
6.5_ST	0,37	0,94	356,9
6.6_ST	0,31	0,80	258,5
6.7_ST	2,04	5,22	11.028,4
6.8_ST	0,02	0,04	0,6
6.9_ST	0,02	0,04	0,7
6.10_ST	0,03	0,06	1,6

Tabelle 3.6e: Szenario 6, statistische MP: LTE-Immission

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
6.1_ST	0,22	0,51	124,9
6.2_ST	0,18	0,42	84,9
6.3_ST	0,48	1,02	606,8
6.4_ST	0,23	0,53	143,3
6.5_ST	0,22	0,46	123,6
6.6_ST	0,21	0,48	118,7
6.7_ST	1,28	3,00	4.357,0
6.8_ST	0,02	0,05	1,0
6.9_ST	0,02	0,04	0,7
6.10_ST	0,04	0,09	3,4

Tabelle 3.6f:Szenario 6, statistische MP: GSM- und UMTS-Immission (bei den ersten 5 MP wurden
alle berücksichtigt und bei den letzten 5 MP nur die des LTE-Standortes)

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
6.1_ST	0,29	0,71	221,2
6.2_ST	0,25	0,60	154,9
6.3_ST	0,70	1,66	1.299,6
6.4_ST	0,37	0,88	339,4
6.5_ST	0,44	1,06	504,5

Tabelle 3.6g: Szenario 6, statistische MP: Gesamtimmission im Bereich 100 kHz - 3 GHz (mit LTE)





An 6 der 10 statistischen Messpunkte dominiert der Anteil von LTE-Mobilfunkanlagen gegenüber GSM/UMTS.

Abschließend sind die Ergebnisse der Momentanwertmessung dargestellt. Der Unterschied zwischen örtlich und zeitlich maximierter LTE-Immission und örtlich und zeitlich gemittelter LTE-Immission entspricht feldstärkebezogen einem Faktor 6,6.

Messpunktbeschreibung				
MP 6.9_SY: 85567 Alxing, Dorfstraße (Einmündung Lindenstraße)				
Horizontalabstand zur Anlage Sichtverhältnisse				
348 m Sicht			cht	
örtlich und	örtlich und zeitlich maximierte Immission (max. Anlagenauslastung)			
	1,82	V/m		
örtlich und zeitlich gemittelte Immission (Momentanimmission)				
1,1 m Höhe 1,5 m Höhe 1,7 m Höhe Mittelwert				
0,243 V/m	0,305 V/m	0,282 V/m	0,28 V/m	

 Tabelle 3.6h:
 Szenario 6: Unterschied zwischen der örtlich und zeitlich gemittelten und der örtlich und zeitlich maximierten LTE-Immission

3.1.7 Niedrig montierter Dachstandort im ländlichen Umfeld (Ortsmitte)

Die Messungen zum Szenario "Niedrig montierter Dachstandort im ländlichen Umfeld (Ortsmitte)" wurden an der Anlage Bahnhofstraße 9 in 97440 Eßleben (Landkreis Schweinfurt) durchgeführt. Auf einem Scheunendach ist in zirka 17 Meter Höhe ein zweisektoriges Mobilfunksystem des Betreibers A installiert, von dem LTE-800, GSM-900 und UMTS abgestrahlt werden. Aufgrund der Verwendung von Multibandantennen sind die horizontalen Hauptsenderichtungen für alle 3 Mobilfunktechnologien identisch.

Die nähere Umgebung des Standortes, die horizontale Ausrichtung der LTE-Sendeantennen, sowie die Lage der systematischen Messpunkte sind in folgendem Bild dargestellt.



Bild 3.7a: Szenario 7: Lageplan mit Anlagenstandort und Lage der systematischen Messpunkte

Für dieses Szenario wurden systematische Messungen an 9 Außen-Messpunkten mit, sowie einem Außen-Messpunkt ohne direkte Sicht bei verschiedenen Entfernungen zur Anlage durchgeführt. Die Messpunkte wurden derart angeordnet, dass sie im Versorgungsbereich der nach 340° ausgerichteten Sektorantenne liegen. Nachfolgende Tabelle beschreibt die Lage der systematischen Messpunkte.

Punkt Nr.	Messort		Horizontal- entfernung zur LTE-Anlage
7.1_SY	Teilheimer Weg (Einmündung Feldweg)	ja	182 m
7.2_SY	Feldweg (Ostrand Wohnbebauung "An der Hackmähnde")	ja	267 m
7.3_SY	Feldweg (Nordrand Wohnbebauung "An der Hackmähnde")	ja	418 m
7.4_SY	An der Hackmähnde (Einmündung Stiegelspfortenweg)	ja	188 m
7.5_SY	Stiegelspfortenweg		186 m
7.6_SY	Wirtschaftsweg nördlich Anlagenstandort		80 m
7.7_SY	Wirtschaftsweg nördlich Anlagenstandort	ja	136 m
7.8_SY	Herrenmarter 2	ja	316 m
7.9_SY	Hauptstraße (Einmündung Herrenmarter)	nein	370 m
7.10_SY	Herrenmarter (Einmündung An der Hackmähnde)	ја	314 m

Tabelle 3.7a: Szenario 7: Beschreibung der systematischen Messpunkte

In folgender Tabelle ist zunächst nur die LTE-Immission für die 10 Punkte angegeben. Die Summenimmission aus GSM- und UMTS-Signalen vom selben Standort wird anschließend in einer zweiten Tabelle dargestellt.

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
7.1_SY	0,26	0,65	172,5
7.2_SY	0,36	0,92	344,2
7.3_SY	0,12	0,31	39,5
7.4_SY	0,80	2,04	1.886,0
7.5_SY	1,03	2,63	2.798,0
7.6_SY	0,37	0,95	368,8
7.7_SY	0,72	1,84	1.370,4
7.8_SY	0,71	1,82	1.339,2
7.9_SY	0,21	0,53	114,0
7.10_SY	0,50	1,27	655,9

Tabelle 3.7b: Szenario 7, systematische MP: LTE-Immission

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
7.1_SY	0,33	0,69	290,6
7.2_SY	0,50	1,12	659,1
7.3_SY	0,46	0,81	561,1
7.4_SY	0,74	1,75	1.445,0
7.5_SY	1,09	2,57	3.177,4
7.6_SY	0,79	1,50	1.659,4
7.7_SY	0,97	2,05	2.512,0
7.8_SY	0,83	1,84	1.812,6
7.9_SY	0,32	0,69	272,5
7.10_SY	1,04	2,36	2.880,5

Tabelle 3.7c: Szenario 7, systematische MP: Summenimmission GSM + UMTS

In folgendem Bild sind die Resultate aus den obigen beiden Tabellen visualisiert. An 8 der 10 Messpunkte dominieren grenzwertbezogen die GSM-/UMTS-Immissionen im Vergleich zu den LTE-Immissionen. Absolut gesehen sind an 9 der 10 Messpunkte die GSM-/UMTS-Immissionen höher. Der leistungsgemittelte grenzwertbezogene Unterschiedsfaktor zwischen GSM-/UMTS-Immissionen und LTE-Immissionen beträgt ca. 2,2 dB.





Zusätzlich zu den systematischen Messpunkten wurden 10 statistische Messpunkte ausgewürfelt, an denen die LTE-Immissionen gemessen wurden. An den ersten 5 dieser 10 Messpunkte wurden - zusätzlich zu den LTE-Immissionen - auch sämtliche anderen nennenswert vorhandenen Hochfrequenzimmissionen im Frequenzbereich 100 kHz bis 3 GHz erfasst. Nachfolgende Tabelle beschreibt die Lage der statistischen Messpunkte. Die Lage der Zufallsmesspunkte ist in Bild 3.7c dargestellt.

Punkt Nr.	Messort	Sicht (zu LTE)	Horizontal- entfernung zur LTE-Anlage
7.1_ST	Sportgelände Eßleben (Brunnen, nordöstlich Tennisplatz)	nein	335 m
7.2_ST	Hauptstraße 34	nein	238 m
7.3_ST	Seeweg 4	nein	486 m
7.4_ST	Kirchstraße 10	nein	302 m
7.5_ST	Schäferwiese 4	nein	603 m
7.6_ST	Ringstr. 3	nein	502 m
7.7_ST	An der Hackmähnde (Trafostation)	ja	228 m
7.8_ST	An der Hackmähnde 10	ja	107 m
7.9_ST	Bahnhofstraße (Einmündung Langgasse)	nein	123 m
7.10_ST	Sonnenstraße 8	nein	310 m

Tabelle 3.7d: Szenario 7: Beschreibung der statistischen Messpunkte



Bild 3.7c: Szenario 7: Lageplan mit Anlagenstandort und Lage der statistischen Messpunkte

In folgender Tabelle ist zunächst nur die LTE-Immission für die 10 Punkte angegeben. Anschließend werden die GSM- und UMTS-Mobilfunkimmissionen (hier sind bei den ersten 5 MP alle berücksichtigt und bei den letzten 5 nur diejenigen des Standortes "Bahnhofstr. 9"), sowie für die ersten 5 Punkte die Gesamtimmissionen im Frequenzbereich 100 kHz - 3 GHz (mit LTE) dargestellt.

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
7.1_ST	0,10	0,25	25,5
7.2_ST	0,08	0,21	18,1
7.3_ST	0,04	0,09	3,4
7.4_ST	0,05	0,12	5,5
7.5_ST	0,02	0,04	0,8
7.6_ST	0,08	0,21	17,7
7.7_ST	0,97	2,48	2.493,7
7.8_ST	0,41	1,06	453,8
7.9_ST	0,24	0,61	150,3
7.10_ST	0,27	0,70	198,1

Tabelle 3.7e: Szenario 7, statistische MP: LTE-Immission

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
7.1_ST	0,83	1,99	1.840,5
7.2_ST	0,69	1,65	1.255,2
7.3_ST	0,83	1,99	1.828,2
7.4_ST	0,18	0,43	89,6
7.5_ST	0,03	0,07	2,3
7.6_ST	0,13	0,29	43,8
7.7_ST	1,25	2,93	4.139,6
7.8_ST	0,50	1,08	670,2
7.9_ST	0,21	0,46	112,8
7.10_ST	0,28	0,59	203,3

 Tabelle 3.7f:
 Szenario 7, statistische MP: GSM- und UMTS-Immission (bei den ersten 5 MP wurden alle berücksichtigt und bei den letzten 5 MP nur die des LTE-Standortes)

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
7.1_ST	0,84	2,01	1.890,1
7.2_ST	0,70	1,66	1.292,3
7.3_ST	0,83	1,99	1.846,1
7.4_ST	0,21	0,45	122,8
7.5_ST	0,12	0,19	34,0

Tabelle 3.7g: Szenario 7, statistische MP: Gesamtimmission im Bereich 100 kHz - 3 GHz (mit LTE)

An 8 der 10 statistischen Messpunkte dominiert der Anteil von GSM/UMTS-Mobilfunkanlagen gegenüber LTE.

Das starke Übergewicht der GSM/UMTS-Immission an den Punkten 7.1_ST bis 7.4_ST wird durch eine andere Mobilfunksendeanlage verursacht, deren Antennen auf einem Flutlichtmast im Bereich des Fußballplatzes von Eßleben (Seeweg) installiert sind.





Abschließend sind die Ergebnisse der Momentanwertmessung dargestellt. Der Unterschied zwischen örtlich und zeitlich maximierter LTE-Immission und örtlich und zeitlich gemittelter LTE-Immission entspricht feldstärkebezogen einem Faktor 6,6.

Messpunktbeschreibung						
Messpunkt 7.11_SY: 97440 Eßleben, Stiegelspfortenweg						
Horizontalabst	and zur Anlage	Sichtverhältnisse				
348	3 m	Sicht				
örtlich und zeitlich maximierte Immission (max. Anlagenauslastung)						
0,63 V/m						
örtlich und zeitlich gemittelte Immission (Momentanimmission)						
1,1 m Höhe	1,5 m Höhe	1,7 m Höhe	Mittelwert			
0,100 V/m	0,090 V/m	0,097 V/m	0,10 V/m			

 Tabelle 3.7h:
 Szenario 7: Unterschied zwischen der örtlich und zeitlich gemittelten und der örtlich und zeitlich maximierten LTE-Immission

3.1.8 Sehr niedrig montierter Dachstandort im ländlichen Umfeld (Wohngebiet)

Die Messungen zum Szenario "Sehr niedrig montierter Dachstandort im ländlichen Umfeld (Wohngebiet)" wurden an der Anlage Im Hopfengarten 9 in 96158 Frensdorf (Landkreis Bamberg) durchgeführt. Auf dem Dach einer Ortsvermittlungsstelle ist in zirka 12 Meter Höhe ein dreisektoriges Mobilfunksystem des Betreibers A installiert, von dem LTE-800, GSM-900 und UMTS abgestrahlt werden. Aufgrund der Verwendung von Multibandantennen sind die horizontalen Hauptsenderichtungen für alle 3 Mobilfunktechnologien identisch.

Die nähere Umgebung des Standortes, die horizontale Ausrichtung der LTE-Sendeantennen, sowie die Lage der systematischen Messpunkte sind in folgendem Bild dargestellt.



Bild 3.8a: Szenario 8: Lageplan mit Anlagenstandort und Lage der systematischen Messpunkte

Für dieses Szenario wurden systematische Messungen an 10 Außen-Messpunkten mit sowie 2 Außen-Messpunkten ohne direkte Sicht bei verschiedenen Entfernungen zur Anlage durchgeführt. Die Messpunkte wurden derart angeordnet, dass sie sich im Bereich der direkt umgebenden Wohnbebauung befinden und der Abstand zur Anlage maximal zirka 100 Meter beträgt. Nachfolgende Tabelle beschreibt die Lage der systematischen Messpunkte.

Punkt Nr.	Messort	Sicht (zu LTE)	Horizontal- entfernung zur LTE-Anlage
8.1_SY	Im Hopfengarten 6 (Garten)		52 m
8.2_SY	Im Hopfengarten 6 (Garage)		31 m
8.3_SY	Im Hopfengarten 11		46 m
8.4_SY	Marschallsgarten 8		93 m
8.5_SY	Marienstraße 15	nein	114 m
8.6_SY	Marienstraße 8 / Im Hopfengarten 2		107 m
8.7_SY	Marienstraße (Einmündung Im Hopfengarten)		105 m
8.8_SY	Im Hopfengarten 7		56 m
8.9_SY	Bergweg (Einmündung Im Hopfengarten)	ja	83 m
8.10_SY	Bergweg 5/7	ja	72 m
8.11_SY	Bergweg 1		96 m
8.12_SY	Bahnhofstraße 15		107 m

Tabelle 3.8a: Szenario 8: Beschreibung der systematischen Messpunkte

In folgender Tabelle ist zunächst nur die LTE-Immission für die 12 Punkte angegeben. Die Summenimmission aus GSM- und UMTS-Signalen vom selben Standort wird anschließend in einer zweiten Tabelle dargestellt.

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
8.1_SY	0,93	2,37	2.274,3
8.2_SY	2,05	5,24	11.139,0
8.3_SY	1,21	3,09	3.862,3
8.4_SY	1,00	2,57	2.672,1
8.5_SY	0,54	1,38	770,6
8.6_SY	1,18	3,02	3.688,5
8.7_SY	0,58	1,48	884,8
8.8_SY	0,88	2,26	2.074,2
8.9_SY	1,50	3,84	5.982,0
Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
--------------	--------------------------------	---	------------------------------------
8.10_SY	2,03	5,18	10.885,4
8.11_SY	0,93	2,37	2.274,3
8.12_SY	1,52	3,89	6.121,3

Tabelle 3.8b: Szenario 8, systematische MP: LTE-Immission

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
8.1_SY	1,21	2,53	3.856,9
8.2_SY	2,02	4,22	10.770,5
8.3_SY	1,65	3,64	7.182,7
8.4_SY	0,93	2,14	2.272,4
8.5_SY	0,84	1,69	1.878,3
8.6_SY	2,54	4,70	17.119,2
8.7_SY	0,53	1,15	755,2
8.8_SY	1,63	3,56	7.050,3
8.9_SY	3,06	6,66	24.825,6
8.10_SY	2,65	6,12	18.657,3
8.11_SY	1,87	3,77	9.282,0
8.12_SY	3,39	6,62	30.436,0

Tabelle 3.8c: Szenario 8, systematische MP: Summenimmission GSM + UMTS

In folgendem Bild sind die Resultate aus den obigen beiden Tabellen visualisiert. An 9 der 12 Messpunkte dominieren sowohl grenzwertbezogen als auch absolut gesehen die GSM-/UMTS-Immissionen im Vergleich zu den LTE-Immissionen. Der leistungsgemittelte grenzwertbezogene Unterschiedsfaktor zwischen GSM-/UMTS-Immissionen und LTE-Immissionen beträgt ca. 1,7 dB.





Zusätzlich zu den systematischen Messpunkten wurden 10 statistische Messpunkte ausgewürfelt, an denen die LTE-Immissionen gemessen wurden. An den ersten 5 dieser 10 Messpunkte wurden - zusätzlich zu den LTE-Immissionen - auch sämtliche anderen nennenswert vorhandenen Hochfrequenzimmissionen im Frequenzbereich 100 kHz bis 3 GHz erfasst. Nachfolgende Tabelle beschreibt die Lage der statistischen Messpunkte. Die Lage der Zufallsmesspunkte ist in Bild 3.8c dargestellt.

Punkt Nr.	Messort	Sicht (zu LTE)	Horizontal- entfernung zur LTE-Anlage
8.1_ST	Schellenanger 1	ja	325 m
8.2_ST	Am Falter 13	nein	365 m
8.3_ST	Lindenstraße 18 (Parkplatz)	ja	466 m
8.4_ST	Lindenstraße (Einmündung Merkelsgasse)	nein	369 m
8.5_ST	Kellerstraße 8 (Einmündung Fußweg)	nein	409 m
8.6_ST	Gertrudenstraße 3/4	nein	510 m
8.7_ST	Gertrudenstraße (Einmündung Lärchenstraße)	nein	508 m
8.8_ST	Hauptstraße 2	nein	490 m

Punkt Nr.	Messort	Sicht (zu LTE)	Horizontal- entfernung zur LTE-Anlage
8.9_ST	Kaulberg 34	nein	826 m
8.10_ST	Im Kästelein 35	nein	903 m

Tabelle 3.8d: Szenario 8: Beschreibung der statistischen Messpunkte



Bild 3.8c: Szenario 8: Lageplan mit Anlagenstandort und Lage der statistischen Messpunkte

In folgender Tabelle ist zunächst nur die LTE-Immission für die 10 Punkte angegeben. Anschließend werden die GSM- und UMTS-Mobilfunkimmissionen (hier sind bei den ersten 5 MP alle berücksichtigt und bei den letzten 5 nur diejenigen des Standortes "Im Hopfengarten 9"), sowie für die ersten 5 Punkte die Gesamtimmissionen im Frequenzbereich 100 kHz – 3 GHz (mit LTE) dargestellt.

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
8.1_ST	0,74	1,90	1.468,4
8.2_ST	0,05	0,14	7,4
8.3_ST	0,33	0,85	2.93,0
8.4_ST	0,04	0,11	4,8
8.5_ST	0,06	0,16	9,7
8.6_ST	0,02	0,06	1,4
8.7_ST	0,03	0,07	1,9
8.8_ST	0,04	0,10	4,0
8.9_ST	0,06	0,14	7,9
8.10_ST	0,03	0,07	2,0

Tabelle 3.8e: Szenario 8, statistische MP: LTE-Immission

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
8.1_ST	1,23	2,47	3.991,3
8.2_ST	0,07	0,16	12,0
8.3_ST	0,45	1,01	544,4
8.4_ST	0,07	0,17	13,4
8.5_ST	0,06	0,15	10,9
8.6_ST	0,02	0,05	1,2
8.7_ST	0,04	0,08	3,3
8.8_ST	0,05	0,12	6,8
8.9_ST	0,08	0,19	16,2
8.10_ST	0,03	0,08	3,2

Tabelle 3.8f:Szenario 8, statistische MP: GSM- und UMTS-Immission (bei den ersten 5 MP wurden
alle berücksichtigt und bei den letzten 5 MP nur die des LTE-Standortes)

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
8.1_ST	1,44	3,13	5.482,5
8.2_ST	0,10	0,23	29,0
8.3_ST	0,57	1,34	852,9
8.4_ST	0,11	0,23	31,0
8.5_ST	0,10	0,23	29,8

Tabelle 3.8g: Szenario 8, statistische MP: Gesamtimmission im Bereich 100 kHz - 3 GHz (mit LTE)



Bild 3.8d: Szenario 8, statistische MP: Grafische Darstellung der gemessenen Immission

An 8 der 10 statistischen Messpunkte dominiert der Anteil von GSM/UMTS-Mobilfunkanlagen gegenüber LTE.

Abschließend sind die Ergebnisse der Momentanwertmessung dargestellt. Der Unterschied zwischen örtlich und zeitlich maximierter LTE-Immission und örtlich und zeitlich gemittelter LTE-Immission entspricht feldstärkebezogen einem Faktor 5,6.

Messpunktbeschreibung				
Messpunkt 8.13_SY: 96158 Frensdorf, Am Bahnhofsplatz				
Horizontalabstand zur Anlage Sichtverhältnisse				
119) m	Keine Sicht		
örtlich und zeitlich maximierte Immission (max. Anlagenauslastung)				
	0,44	V/m		
örtlich und zeitlich gemittelte Immission (Momentanimmission)				
1,1 m Höhe	1,5 m Höhe	1,7 m Höhe	Mittelwert	
0,082 V/m	0,072 V/m	0,079 V/m	0,08 V/m	

 Tabelle 3.8h:
 Szenario 8: Unterschied zwischen der örtlich und zeitlich gemittelten und der örtlich und zeitlich maximierten LTE-Immission

3.1.9 Hoher Maststandort im ländlichen Umfeld (Ortsmitte)

Die Messungen zum Szenario "Hoher Maststandort im ländlichen Umfeld (Ortsmitte)" wurden an der Anlage Kreuthfeldstraße 8 in 91608 Geslau (Landkreis Ansbach) durchgeführt. Auf einem Betonmast sind in zirka 36 bis 41 Meter Höhe dreisektorige Mobilfunksysteme des Betreibers A installiert, von denen LTE-800, GSM-900 und UMTS abgestrahlt werden. Außerdem befinden sich am Mast in etwa 33 Meter Höhe dreisektorige Mobilfunksysteme des Betreibers B, von denen LTE-800 und GSM-900 abgestrahlt werden. Die horizontalen Hauptsenderichtungen sind für alle am Standort vorhandenen Mobilfunksysteme identisch.

Für die Messungen in der Umgebung dieses Standortes wurden 10 statistische Messpunkte ausgewürfelt, an denen die LTE-Immissionen gemessen wurden. An den ersten 5 dieser 10 Messpunkte wurden - zusätzlich zu den LTE-Immissionen - auch sämtliche anderen nennenswert vorhandenen Hochfrequenzimmissionen im Frequenzbereich 100 kHz bis 3 GHz erfasst. Nachfolgende Tabelle beschreibt die Lage der statistischen Messpunkte. Die nähere Umgebung des Standortes, die horizontale Ausrichtung der LTE-Sendeantennen, sowie die Lage der statistischen Messpunkte sind in Bild 3.9a dargestellt. Abgesehen vom Punkt für die Erfassung der körpergemittelten Immission wurden keine systematischen Messpunkte an diesem Standort gemessen.

Punkt Nr.	Messort	Sicht (zu LTE)	Horizontal- entfernung zur LTE-Anlage
9.1_ST	Marktplatz 1 (Vor Eingang Kirchhof)	nein	438 m
9.2_ST	Badergasse (Wiese)	ja	322 m
9.3_ST	Hauptstraße 22a (nördlich Lagerhalle)	ja	436 m
9.4_ST	Weg südlich Bergstraße 6	ja	326 m
9.5_ST	Pfarrgasse 5	nein	483 m
9.6_ST	Bergstraße 1a (Parkplatz)	ja	115 m
9.7_ST	Schulstraße 12 (Einmündung Birkenstraße)	ја	208 m
9.8_ST	Buchenstraße 7/12	ja	323 m
9.9_ST	Kreuthfeldstraße 20 (Einmündung Ahornstraße)	ја	242 m
9.10_ST	Kreuthfeldstraße 10 (Ostseite)	ја	70 m

Tabelle 3.9a: Szenario 9: Beschreibung der statistischen Messpunkte



Bild 3.9a: Szenario 9: Lageplan mit Anlagenstandort und Lage der statistischen Messpunkte

In folgender Tabelle ist zunächst nur die LTE-Immission für die 10 Punkte angegeben. Anschließend werden die GSM- und UMTS-Mobilfunkimmissionen (hier sind bei den ersten 5 MP alle berücksichtigt und bei den letzten 5 nur diejenigen des Standortes "Kreuthfeldstraße 8"), sowie für die ersten 5 Punkte die Gesamtimmissionen im Frequenzbereich 100 kHz - 3 GHz (mit LTE) dargestellt.

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
9.1_ST	0,16	0,42	69,4
9.2_ST	1,50	3,85	5.978,0
9.3_ST	0,69	1,77	1.270,3
9.4_ST	1,04	2,68	2.887,0
9.5_ST	0,13	0,35	48,1
9.6_ST	0,69	1,77	1.268,4
9.7_ST	1,42	3,65	5.376,8
9.8_ST	0,87	2,24	2.029,3
9.9_ST	1,20	3,08	3.815,4
9.10_ST	0,82	2,10	1.733,8

Tabelle 3.9b: Szenario 9, statistische MP: LTE-Immission

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
9.1_ST	0,23	0,52	139,1
9.2_ST	0,87	2,04	1.997,5
9.3_ST	0,96	1,98	2.421,2
9.4_ST	0,70	1,66	1.290,9
9.5_ST	0,16	0,38	67,5
9.6_ST	0,76	1,79	1.540,8
9.7_ST	1,24	2,87	4.076,5
9.8_ST	1,61	3,50	6.884,0
9.9_ST	0,80	1,90	1.691,5
9.10_ST	0,96	1,88	2.446,4

Tabelle 3.9c:Szenario 9, statistische MP: GSM- und UMTS-Immission (bei den ersten 5 MP wurden
alle berücksichtigt und bei den letzten 5 MP nur die des LTE-Standortes)

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
9.1_ST	0,31	0,79	253,0
9.2_ST	1,74	4,37	8.012,2
9.3_ST	1,19	2,70	3.747,9
9.4_ST	1,26	3,16	4.187,7
9.5_ST	0,22	0,57	137,3

Tabelle 3.9d: Szenario 9, statistische MP: Gesamtimmission im Bereich 100 kHz - 3 GHz (mit LTE)





An 5 der 10 statistischen Messpunkte dominiert der Anteil von GSM/UMTS-Mobilfunkanlagen gegenüber LTE.

Abschließend sind die Ergebnisse der Momentanwertmessung dargestellt. Der Unterschied zwischen örtlich und zeitlich maximierter LTE-Immission und örtlich und zeitlich gemittelter LTE-Immission entspricht feldstärkebezogen einem Faktor 5,7.

Messpunktbeschreibung				
	Messpunk 9.1_SY: 91606	Geslau, Parkplatz Schule	•	
Horizontalabstand zur Anlage Sichtverhältnisse				
203 m Sicht			cht	
örtlich und	örtlich und zeitlich maximierte Immission (max. Anlagenauslastung)			
	1,61	V/m		
örtlich u	und zeitlich gemittelte In	nmission (Momentanimn	nission)	
1,1 m Höhe	1,5 m Höhe	1,7 m Höhe	Mittelwert	
0,232 V/m	0,331 V/m	0,283 V/m	0,28 V/m	

 Tabelle 3.9e:
 Szenario 9: Unterschied zwischen der örtlich und zeitlich gemittelten und der örtlich und zeitlich maximierten LTE-Immission

3.1.10 Hoher Maststandort im ländlichen Umfeld (Ortsrand)

Die Messungen zum Szenario "Hoher Maststandort im ländlichen Umfeld (Ortsrand)" wurden an der Anlage Flurstück 356/5 in 95355 Presseck (Landkreis Kulmbach) durchgeführt. Auf einem Gittermast sind in zirka 24 bis 30 Meter Höhe 3 dreisektorige LTE-Mobilfunksysteme der Betreiber A, B und C installiert. Bezüglich LTE-800 ist dieser Standort somit maximal ausgebaut.

Außerdem befinden sich am Mast noch verschiedene GSM- und UMTS-Systeme aller 4 in Deutschland tätigen Mobilfunknetzbetreiber.

Die nähere Umgebung des Standortes, die horizontale Ausrichtung der LTE-Sendeantennen, sowie die Lage der systematischen Messpunkte sind in folgendem Bild dargestellt.



Bild 3.10a: Szenario 10: Lageplan mit Anlagenstandort und Lage der systematischen Messpunkte

Für dieses Szenario wurden systematische Messungen an 4 Außen-Messpunkten mit sowie 6 Außen-Messpunkten ohne direkte Sicht bei verschiedenen Entfernungen zur Anlage durchgeführt. Nachfolgende Tabelle beschreibt die Lage der systematischen Messpunkte.

Punkt Nr.	Messort	Sicht (zu LTE)	Horizontal- entfernung zur LTE-Anlage
10.1_SY	Wildensteiner Straße 25 (Einmündung Feldweg)	ja	887 m
10.2_SY	Höhe 6 (Feldweg südlich des Anwesens)	nein	1.021 m
10.3_SY	Schöndorfer Weg 24 (Ortsrand)	nein	1.150 m
10.4_SY	Stadtsteinacher Str. (Einmündung Frankenwaldstraße)	nein	1.074 m
10.5_SY	Fabrikstraße (Einfahrt Sportplatz)	ja	556 m
10.6_SY	Fabrikstraße 17 (Hofeinfahrt)	ja	734 m
10.7_SY	Fabrikstraße 25 (Parkplatz)	ja	716 m
10.8_SY	Trottenreuther Str. 25 (Einmündung Am Sonnenhang)	nein	387 m
10.9_SY	Am Sonnenhang 14 (Spielplatz)	nein	259 m
10.10_SY	Am Sonnenhang 13 (Einfahrt Anwesen)	nein	322 m

Tabelle 3.10a: Szenario 10: Beschreibung der systematischen Messpunkte

In folgender Tabelle ist zunächst nur die LTE-Immission für die 10 Punkte angegeben. Die Summenimmission aus GSM- und UMTS-Signalen vom selben Standort wird anschließend in einer zweiten Tabelle dargestellt.

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
10.1_SY	0,68	1,74	1.211,3
10.2_SY	0,14	0,35	49,0
10.3_SY	0,07	0,17	12,0
10.4_SY	0,10	0,25	25,2
10.5_SY	0,40	1,03	426,3
10.6_SY	0,64	1,66	1.100,5
10.7_SY	0,64	1,65	1.087,5
10.8_SY	0,30	0,78	243,9
10.9_SY	0,24	0,60	146,7
10.10_SY	0,18	0,47	89,0

Tabelle 3.10b: Szenario 10, systematische MP: LTE-Immission

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
10.1_SY	0,65	1,47	1.124,5
10.2_SY	0,10	0,24	27,0
10.3_SY	0,08	0,18	16,0
10.4_SY	0,10	0,24	27,5
10.5_SY	0,49	1,17	634,4
10.6_SY	0,58	1,34	882,6
10.7_SY	0,55	1,31	808,1
10.8_SY	0,41	0,97	454,1
10.9_SY	0,21	0,50	120,2
10.10_SY	0,24	0,58	157,7

Tabelle 3.10c: Szenario 10, systematische MP: Summenimmission GSM + UMTS

In folgendem Bild sind die Resultate aus den obigen beiden Tabellen visualisiert. An 6 der 10 Messpunkte dominieren grenzwertbezogen die LTE-Immissionen im Vergleich zu den GSM-/UMTS-Immissionen. Absolut gesehen sind an 5 der 10 Messpunkte die LTE-Immissionen höher. Der leistungsgemittelte grenzwertbezogene Unterschiedsfaktor zwischen LTE-Immissionen und GSM-/UMTS-Immissionen beträgt etwa 0,5 dB.





Zusätzlich zu den systematischen Messpunkten wurden 10 statistische Messpunkte ausgewürfelt, an denen die LTE-Immissionen gemessen wurden. An den ersten 5 dieser 10 Messpunkte wurden - zusätzlich zu den LTE-Immissionen - auch sämtliche anderen nennenswert vorhandenen Hochfrequenzimmissionen im Frequenzbereich 100 kHz bis 3 GHz erfasst. Nachfolgende Tabelle beschreibt die Lage der statistischen Messpunkte. Die Lage der Zufallsmesspunkte ist in Bild 3.10c dargestellt.

Punkt Nr.	Messort	Sicht (zu LTE)	Horizontal- entfernung zur LTE-Anlage
10.1_ST	Schulstraße (Einmündung Birkenweg)	nein	1.269 m
10.2_ST	Wallenfelser Straße (Einmündung Schulstraße)	nein	1079 m
10.3_ST	Knockstraße 27	nein	244 m
10.4_ST	Industriestraße 8	nein	698 m
10.5_ST	Wildensteiner Straße 14	ja	877 m
10.6_ST	Burgstraße (Einmündung Bergstraße)	nein	898 m
10.7_ST	Wallenfelser Straße (Einmündung Gartenfeld)	nein	850 m
10.8_ST	Helmbrechtser Straße 4 (Gasthof)	nein	771 m
10.9_ST	Lautengrundweg 2	ja	702 m
10.10_ST	Postwiesenweg 30	nein	550 m

Tabelle 3.10d: Szenario 10: Beschreibung der statistischen Messpunkte



Bild 3.10c: Szenario 10: Lageplan mit Anlagenstandort und Lage der statistischen Messpunkte

In folgender Tabelle ist zunächst nur die LTE-Immission für die 10 Punkte angegeben. Anschließend werden die GSM- und UMTS-Mobilfunkimmissionen (hier sind bei den ersten 5 MP alle berücksichtigt und bei den letzten 5 nur diejenigen des Standortes "Flurstück 365/5"), sowie für die ersten 5 Punkte die Gesamtimmissionen im Frequenzbereich 100 kHz - 3 GHz (mit LTE) dargestellt.

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
10.1_ST	0,24	0,62	150,8
10.2_ST	0,06	0,14	8,2
10.3_ST	0,18	0,46	85,6
10.4_ST	0,06	0,15	8,5
10.5_ST	0,94	2,42	2342,9
10.6_ST	0,03	0,07	1,8
10.7_ST	0,06	0,15	9,3
10.8_ST	0,09	0,23	22,1
10.9_ST	0,53	1,38	754,5
10.10_ST	0,09	0,23	20,4

Tabelle 3.10e: Szenario 10, statistische MP: LTE-Immission

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
10.1_ST	0,17	0,41	79,9
10.2_ST	0,07	0,17	13,5
10.3_ST	0,18	0,43	87,4
10.4_ST	0,06	0,13	8,3
10.5_ST	0,94	2,17	2.343,1
10.6_ST	0,03	0,06	1,7
10.7_ST	0,08	0,19	16,8
10.8_ST	0,10	0,22	24,0
10.9_ST	0,81	1,92	1.739,8
10.10_ST	0,11	0,26	31,0

Tabelle 3.10f:Szenario 10, statistische MP: GSM- und UMTS-Immission (bei den ersten 5 MP
wurden alle berücksichtigt und bei den letzten 5 MP nur die des LTE-Standortes)

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
10.1_ST	0,30	0,75	242,9
10.2_ST	0,11	0,23	30,2
10.3_ST	0,26	0,64	182,7
10.4_ST	0,12	0,24	33,4
10.5_ST	1,33	3,26	4704,9

Tabelle 3.10g: Szenario 10, statistische MP: Gesamtimmission im Bereich 100 kHz - 3 GHz (mit LTE)





An 6 der 10 statistischen Messpunkte dominiert der Anteil von LTE-Mobilfunkanlagen gegenüber GSM/UMTS.

Abschließend sind die Ergebnisse der Momentanwertmessung dargestellt. Der Unterschied zwischen örtlich und zeitlich maximierter LTE-Immission und örtlich und zeitlich gemittelter LTE-Immission entspricht feldstärkebezogen einem Faktor 8,5.

Messpunktbeschreibung				
	Messpunkt 10.11_SY: 95355 Presseck, Irrgarten			
Horizontalabstand zur Anlage Sichtverhältnisse				
560 m		Sicht		
örtlich und	d zeitlich maximierte Imr	nission (max. Anlagena	uslastung)	
	0,21	V/m		
örtlich u	örtlich und zeitlich gemittelte Immission (Momentanimmission)			
1,1 m Höhe	1,5 m Höhe	1,7 m Höhe Mittelwert		
0,025 V/m	0,025 V/m	0,023 V/m	0,02 V/m	

 Tabelle 3.10h:
 Szenario 10: Unterschied zwischen der örtlich und zeitlich gemittelten und der örtlich und zeitlich maximierten LTE-Immission

3.1.11 Hoher freistehender Maststandort im ländlichen Umfeld

Die Messungen zum Szenario "Hoher freistehender Mast im ländlichen Umfeld" wurden an der Anlage Flurstück 873 in 85737 Ismaning (Landkreis München) durchgeführt. Auf einem Gittermast ist in 28 Meter Höhe ein dreisektoriges Mobilfunksystem des Betreibers A installiert, von dem LTE-1800 und UMTS abgestrahlt werden. Aufgrund der Verwendung von Multibandantennen sind die horizontalen Hauptsenderichtungen für die beiden Mobilfunktechnologien identisch. Zusätzlich hat Betreiber A noch 2 GSM-900-Sektorantennen am Mast installiert.

Für dieses Szenario wurden systematische Messungen an 10 Außen-Messpunkten mit direkter Sicht bei verschiedenen Orientierungen und Entfernungen zur Anlage durchgeführt. Die Messpunkte wurden in einer radialen Linie bezüglich des Anlagenstandortes angeordnet, um die Entfernungsabhängigkeit der Immission untersuchen zu können.

Die nähere Umgebung des Standortes, die horizontale Ausrichtung der LTE-Sendeantennen, sowie die Lage der Messpunkte sind in Bild 3.11a dargestellt. Statistische Messpunkte wurden an diesem Standort nicht gemessen.



Bild 3.11a: Szenario 11: Lageplan mit Anlagenstandort und Lage der statistischen Messpunkte

Punkt Nr.	Messort	Sicht (zu LTE)	Horizontalentfernung zur LTE-Anlage
11.1_SY	Feldweg nördlich des Standortes	ја	112 m
11.2_SY	Feldweg nördlich des Standortes	ја	66 m
11.3_SY	Feldweg neben dem Standort	ја	11 m
11.4_SY	Feldweg südlich des Standortes	ја	69 m
11.5_SY	Feldweg südlich des Standortes	ја	121 m
11.6_SY	Feldweg südlich des Standortes	ја	187 m
11.7_SY	Feldweg südlich des Standortes	ја	238 m
11.8_SY	Feldweg südlich des Standortes	ја	312 m
11.9_SY	Feldweg südlich des Standortes	ја	381 m
11.10_SY	Feldweg südlich des Standortes	ја	443 m

Tabelle 3.11a: Szenario 11: Beschreibung der systematischen Messpunkte

In folgender Tabelle ist zunächst nur die LTE-Immission für die 10 Punkte angegeben. Die Summenimmission aus GSM- und UMTS-Signalen vom selben Standort wird anschließend in einer zweiten Tabelle dargestellt.

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
11.1_SY	0,55	0,94	794,7
11.2_SY	0,50	0,86	661,0
11.3_SY	0,68	1,17	1.230,8
11.4_SY	0,78	1,34	1.622,6
11.5_SY	0,72	1,24	1.381,0
11.6_SY	0,69	1,18	1.259,5
11.7_SY	0,36	0,62	346,9
11.8_SY	0,34	0,58	302,1
11.9_SY	0,64	1,10	1.097,0
11.10_SY	1,08	1,85	3.091,7

Tabelle 3.11b: Szenario 11, systematische MP: LTE-Immission

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
11.1_SY	1,58	3,72	6.598,4
11.2_SY	0,81	1,79	1.735,4
11.3_SY	1,19	2,51	3.753,6
11.4_SY	0,99	1,82	2.618,3
11.5_SY	1,23	2,82	4.044,8
11.6_SY	1,42	2,94	5.343,9
11.7_SY	1,51	2,78	6.012,8
11.8_SY	1,49	2,58	5.882,3
11.9_SY	1,15	2,01	3.511,1
11.10_SY	1,07	1,87	3.062,3

Tabelle 3.11c: Szenario 11, systematische MP: GSM- und UMTS-Immission

In folgendem Bild sind die Resultate aus den obigen beiden Tabellen visualisiert. An allen 10 Messpunkten dominieren grenzwertbezogen die GSM-/UMTS-Immissionen im Vergleich zu den LTE-Immissionen. Absolut gesehen sind an 9 der 10 Messpunkte die GSM-/UMTS-Immissionen höher. Der leistungsgemittelte grenzwertbezogene Unterschiedsfaktor zwischen GSM-/UMTS-Immissionen und LTE-Immissionen beträgt etwa 7,4 dB.





In Bild 3.11c sind speziell die Ergebnisse der Messungen zur Untersuchung der Entfernungsabhängigkeit dargestellt. Die LTE-Immissionen werden dabei mit den GSM-900- und UMTS-Immissionen verglichen.

An den beiden Messpunkten nördlich des Standortes dominiert deutlich die GSM-900-Immission aufgrund der Antennenausrichtung (40° bzw. 270°), südlich des Standortes nehmen die LTE- und UMTS-Immissionen mit zunehmendem Abstand gegenüber GSM-900 mehr und mehr zu. Die Hauptkeule bei UMTS erreicht in etwa bei 300 Meter den Boden. Bei LTE hingegen reicht die Messstrecke nicht aus, um die Lage des Feldstärkemaximums in Bodennähe messtechnisch einzugrenzen. Offensichtlich ist in Richtung 200° beim LTE-1800-System ein geringerer Downtiltwinkel eingestellt als bei der UMTS-Antenne.



Bild 3.11c: Szenario 11, systematische MP: Abstandsabhängigkeit der Messergebnisse

Abschließend sind die Ergebnisse der Momentanwertmessung dargestellt. Der Unterschied zwischen örtlich und zeitlich maximierter LTE-Immission und örtlich und zeitlich gemittelter LTE-Immission entspricht feldstärkebezogen einem Faktor 5,4.

Messpunktbeschreibung				
Messpunkt 11.11_SY: 85737, Ismaning (südlich Maststandort)				
Horizontalabstand zur Anlage		Sichtverhältnisse		
310 m		Sicht		
örtlich und zeitlich maximierte Immission (max. Anlagenauslastung)				
0,26 V/m				
örtlich und zeitlich gemittelte Immission (Momentanimmission)				
1,1 m Höhe	1,5 m Höhe	1,7 m Höhe	Mittelwert	
0,052 V/m	0,046 V/m	0,043 V/m	0,05 V/m	

Tabelle 3.11d: Szenario 11: Unterschied zwischen der örtlich und zeitlich gemittelten und der örtlich und zeitlich maximierten LTE-Immission

3.2 Untersuchung von Einflussfaktoren für die Größe der Immission

Im Rahmen der hier durchgeführten Messungen wurden bei den einzelnen Szenarien teilweise sehr unterschiedliche LTE-Immissionswerte gefunden. Auch beim Vergleich der Szenarien untereinander kann man feststellen, dass sich im Mittel zum Teil deutliche Immissionsunterschiede ergeben, wie aus folgenden Bildern ersichtlich wird.



Bild 3.12: Zusammenfassende Darstellung der in den 11 untersuchten Szenarien gemessenen LTE-Immissionswerte (in logarithmischer und linearer Darstellung), systematische und statistische Messpunkte

Nachfolgend soll der Einfluss verschiedener Faktoren auf die Größe der Immission näher untersucht werden. Im Wesentlichen sind es die folgenden Einflussfaktoren, die entweder nur von der Sendeanlage oder nur vom Empfangsort oder von beiden bestimmt werden:

Einflussfaktoren seitens der Sendeanlage:

- Sendeleistung der Anlage (Frequenzband, Anzahl der Betreiber, Anzahl der Kanäle, Sendeleistung pro Kanal),
- Höhe der Sendeantennen über Grund,
- verwendete Antennentypen,
- Downtilt der Antennen,
- horizontale Ausrichtung der Antennen.

Einflussfaktoren seitens des Immissionsortes:

- Abstand zur Sendeanlage,
- Höhe des Empfängerortes über Grund (bzw. relativer Höhenunterschied zur Sendeanlage),
- horizontale Ausrichtung zur Anlage,
- Vorhandensein von dämpfenden Hindernissen (Sichtbarkeit der Anlage).

Von diesen Einflussfaktoren sollen im Folgenden der (laterale) Abstand zur Sendeanlage, der relative Höhenunterschied vom Messpunkt (MP) zur Sendeanlage, die Sichtverhältnisse (freie Sicht oder Sicht durch Hindernisse verdeckt) und das verwendete Frequenzband untersucht werden. Der relative Höhenunterschied wird hierbei durch den Vertikalwinkel charakterisiert, der (falls möglich) während der Messungen mit einem Winkelmesser mit protokolliert bzw. aus der Montagehöhe der Antennen und dem lateralen Abstand errechnet wurde. Die 3 näher untersuchten räumlichen Faktoren sind in Bild 3.13 veranschaulicht.



Bild 3.13: Untersuchte Einflussfaktoren

Im Folgenden soll überprüft werden, ob sich gewisse Gesetzmäßigkeiten in der Verteilung der Immission finden lassen. Insbesondere soll geprüft werden, ob die in [WUS 04] bzw. [BOR 06] für GSM- bzw. UMTS-Anlagen mittels teilweise deutlich größeren Messpunktanzahlen (>1.000) erarbeiteten Gesetzmäßigkeiten tendenziell auch bei LTE zu finden sind. Die im Folgenden dargestellten LTE-Immissionswerte sind immer als prozentuale Grenzwertausschöpfung bezüglich der elektrischen Feldstärke für Vollausbau und Maximalauslastung der verursachenden Sendeanlagen angegeben.

3.2.1 Allgemeine Eigenschaften der Messergebnisse

Bevor die Messergebnisse speziell bezüglich der oben genannten Einflussfaktoren ausgewertet werden, sollen hier zunächst einige grundsätzliche Eigenschaften der an den Messpunkten gefundenen Immissionswerte dargestellt werden.

Die 177 systematischen und statistischen Messpunkte können wie folgt charakterisiert werden:

Lage der Messpunkte	Davon mit Sicht zu Antennen	Davon ohne bzw. mit einge- schränkter Sicht zu Antennen
Indoor (33 Punkte)	20	13
Outdoor (144 Punkte)	78	66

Tabelle 3.12:Eigenschaften der Messpunkte

Folgende Tabelle gibt einen Überblick über die gemessenen Maximal- bzw. Minimalimmissionen sowie die sich daraus ergebenden Spannweiten:

Kennwert	Resultat
Maximalwert über alle MP [% vom Feldstärkegrenzwert]	7,28
Minimalwert über alle MP [% vom Feldstärkegrenzwert]	0,002
Spannweite [dB] über alle MP	71,2
Maximalwert über alle Outdoor-MP [% vom Feldstärkegrenzwert]	7,28
Minimalwert über alle Outdoor-MP [% vom Feldstärkegrenzwert]	0,02
Spannweite [dB] über alle Outdoor-MP	51,2
Maximalwert über alle Indoor-MP [% vom Feldstärkegrenzwert]	6,26
Minimalwert über alle Indoor-MP [% vom Feldstärkegrenzwert]	0,002
Spannweite [dB] über alle Indoor-MP	69,9
Maximalwert bei Sicht [% vom Feldstärkegrenzwert]	7,28
Minimalwert bei Sicht [% vom Feldstärkegrenzwert]	0,16
Spannweite [dB] bei Sicht	33,2
Maximalwert ohne Sicht [% vom Feldstärkegrenzwert]	1,76
Minimalwert ohne Sicht [% vom Feldstärkegrenzwert]	0,002
Spannweite [dB] ohne Sicht	58,9

Tabelle 3.13: Extremwerte der gemessenen LTE-Immissionen

Die größte festgestellte LTE-Immission beträgt 7,28 % vom Feldstärkegrenzwert, die geringste ist 0,002 Prozent. Die Spannweite der Immission ist sehr groß, sie beträgt über alle Messpunkte mehr als 70 dB.

Die statistischen Mittelwerte sind in folgender Tabelle aufgelistet. Die durchschnittliche Immission wurde als leistungsgemittelter Wert gebildet.

Statistischer Mittelwert	Resultat
Durchschnittliche Immission über alle MP [% vom Feldstärkegrenzwert]	1,79
Median über alle MP [% vom Feldstärkegrenzwert]	0,70
Durchschn. Immission über die systematischen MP [% vom Feldstärke-GW]	2,10
Median über die systematische MP [% vom Feldstärkegrenzwert]	1,10
Durchschn. Immission über die statistischen MP [% vom Feldstärke-GW]	1,25
Median über die statistischen MP [% vom Feldstärkegrenzwert]	0,24

Tabelle 3.14: Durchschnittlicher LTE-Immissionswerte und Mediane für alle Messpunkte

Aus Tabelle 3.14 wird deutlich, dass die systematischen Messpunkte im Mittel eine deutlich höhere Immission (ca. 13 dB bezüglich des Median) aufweisen als die statistischen Messpunkte. Die statistischen Messpunkte wurden nach dem Zufallsprinzip "ausgewürfelt" und entsprechen eher einer flächengemittelten Immission. Die systematischen Messpunkte hingegen wurden nach systematischen Gesichtspunkten ausgewählt, wie z.B. horizontale Linienmessungen zur Untersuchung der Entfernungsabhängigkeit oder vertikale Linienmessungen zur Untersuchung der Höhenabhängigkeit bzw. des Dämpfungsverlaufs. Offensichtlich führt diese Systematik dazu, dass die systematischen Messpunkte überdurchschnittlich hoch exponiert sind, z.B. durch überdurchschnittlich häufige Auswahl von Messpunkten mit Sicht auf die Anlage. Die Dominanz der Immission der systematischen Messreihe wie auch anderer Messreihen mit ähnlich gewählter Systematik zu berücksichtigen.

Weiterhin kann festgestellt werden, dass der durchschnittliche Immissionswert jeweils deutlich größer als der Median ist, was auf eine unsymmetrische Verteilung der Immissionswerte hindeutet. Dies wird aus folgender Abbildung für alle Messpunkte deutlich:



Bild 3.14: Verteilung der LTE-Messergebnisse in Grenzwertklassen

Das Bild zeigt alle Messpunkte in einem Verteilungsdiagramm. Die Balken zeigen an, wie viele Messpunkte in eine bestimmte Grenzwertklasse fallen. Der überwiegende Teil der Messergebnisse liegt bei weniger als 1 % vom Grenzwert. Zu höheren Grenzwertklassen fällt die Anzahl der zugehörigen Messpunkte sehr schnell ab.

3.2.2 Lateraler Abstand des Messpunktes zur Sendeanlage

Häufig wird versucht, die Immission eines Messpunktes aufgrund seines Abstandes zur Sendequelle zu charakterisieren. Hierbei wird nach dem Prinzip verfahren, dass die Immission umso geringer sein müsste, je weiter der Messpunkt von der Quelle entfernt ist. Ob dies im unmittelbaren Umfeld einer LTE-Anlage zutrifft, soll die folgende Auswertung zeigen.

Dazu wurde das Messresultat jedes Outdoor-Messpunktes mit Sichtverbindung zur Antenne zusammen mit seinem Abstand zur LTE-Anlage in ein Diagramm eingetragen. Messpunkte ohne Sicht wurden hier nicht einbezogen, da fehlende Sichtbedingungen, wie später noch gezeigt wird, ebenfalls einen großen Einfluss auf die Immission haben. Das Ergebnis ist in folgendem Bild dargestellt. Als Immission ist wieder die Grenzwertausschöpfung bezüglich der elektrischen Feldstärke dargestellt.



Bild 3.15: Immission als Funktion des lateralen Abstands für die 78 Outdoor-Messpunkte mit Sichtverbindung zur LTE-Antenne

Als Ergebnis wird deutlich, dass es bei den Outdoormesspunkten 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. Die höchsten Immissionen der Messreihe finden sich 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 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.

3.2.3 Einfluss des Vertikalwinkels

In folgendem Bild ist für alle Messpunkte mit Sicht, für die Vertikalwinkelwerte aufgenommen wurden, die Immission als Funktion des Vertikalwinkels dargestellt. Der Vertikalwinkel ist derjenige Winkel, unter dem man vom Messpunkt aus die Sendeanlage sieht (Bild 3.13). 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 ein großer Höhenunterschied. Der Vertikalwinkel kann damit als Maß dafür dienen, ob der Messpunkt in Hauptstrahlrichtung (Vertikalwinkel im Bereich des Downtilts, d.h. typisch 0 bis 10 Grad) oder außerhalb der Hauptstrahlrichtung liegt.



Bild 3.16: Immission als Funktion des Vertikalwinkels an allen Messpunkten mit Sicht. Über den Balken ist die mittlere Entfernung der Messpunkte zur LTE-Sendeanlage bei der jeweiligen Vertikalwinkelklasse angegeben.

In Bild 3.16 ist die Immission jeweils gemittelt über verschiedene Vertikalwinkel*bereiche* angegeben. Über den Balken ist die mittlere Entfernung der Messpunkte zur Sendeanlage (lateraler Abstand) bei der jeweiligen Vertikalwinkelklasse angegeben.

Es ist zu erkennen, dass im hier betrachteten Entfernungsbereich an Messpunkten mit Vertikalwinkeln im Bereich typischer Downtiltwinkel trotz im Mittel größeren Messpunktabständen höhere Messwerte auftreten, als an Punkten mit größerem Vertikalwinkel. Damit zeigt sich, dass der Vertikalwinkel ein wichtiger Einflussfaktor für die Immission ist. Auch hier wird erneut demonstriert, dass im näheren Umfeld einer Mobilfunksendeanlage der Abstand zur Charakterisierung der Immission nur sehr eingeschränkt geeignet ist.

3.2.4 Einfluss der Sichtverhältnisse

Hindernisse im Ausbreitungsweg zwischen Basisstationsantenne und Messpunkt, wie z.B. Gebäude oder auch Bäume, führen theoretisch zu einer Abschwächung der Signale und Verringerung der Immission. Die Funkverbindung ist in der Praxis jedoch nicht vollständig unterbrochen, da die Signale der Basisstation oftmals über Reflexionen z.B. an benachbarten Gebäuden (Mehrwegeausbreitung) zum Messpunkt gelangen. Wie sich der abschattende Effekt bezüglich der Immission auswirkt, soll im Folgenden untersucht werden.

In Bild 3.17 ist die entfernungsabhängige Immission als Funktion der Sichtverbindung zur LTE-Anlage dargestellt.



Bild 3.17: LTE-Immission als Funktion der Sichtverhältnisse

Bei dieser Auswertung ist eine deutliche Tendenz dahingehend festzustellen, dass Messpunkte mit Sichtbedingungen im Mittel eine größere Immission aufweisen als Messpunkte, bei denen keine oder eingeschränkte Sicht zur Sendeanlage besteht. Bei Sicht ergibt sich ein Medianwert von 1,38 %, bei fehlender Sichtverbindung beträgt der Median hingegen nur noch 0,17 %, der Unterschied beträgt also etwa 18,2 dB.

3.2.5 Einfluss des Frequenzbereichs

Die im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Immissionsmessungen führten zu einer etwa gleich großen Anzahl von Messpunkten in der Umgebung von LTE-800 Anlagen und LTE-1800 Anlagen. Im Folgenden wird untersucht, ob das Frequenzband wesentliche Einflüsse auf die Immission hat.

In Bild 3.18 sind die Verteilungsdiagramme für beide Frequenzbänder dargestellt. Gravierende Unterschiede zwischen beiden Frequenzbändern sind nicht zu erkennen, allerdings ist eine leichte Verschiebung der LTE-800 Immissionen hin zu höheren Grenzwertklassen erkennbar (vor allem in den Klassen 2-3, 3-4 und 5-6 % vom Grenzwert).



Bild 3.18: Verteilung der Messergebnisse in Grenzwertklassen, getrennt nach Frequenzbereich

Dies schlägt sich auch in den Mittel- bzw. Medianwerten nieder, wie folgende Tabelle zeigt. Der Medianwert bei LTE-800 ist etwa 4,1 dB höher als der Medianwert bei LTE-1800. Ähnlich wie bei den Untersuchungen zu GSM-900 und UMTS [BOR 06] kann vermutet werden, dass dies neben dem niedrigeren Grenzwert bei LTE-800 im Vergleich zu LTE-1800 durch die größere Breite der vertikalen Hauptstrahlrichtung von LTE-800 im Vergleich zu LTE-1800 begründet sein könnte: Bei LTE-800 ist die Wahrscheinlichkeit größer als bei LTE-1800, dass die Messpunkte im direkten Umfeld der Anlage in oder nahe zur vertikalen Hauptstrahlrichtung liegen, was nach den Ergebnissen von Abschnitt 3.2.3 zu einer höheren Immission führt als bei Punkten außerhalb der vertikalen Hauptstrahlrichtung.

Kennwert	LTE-800	LTE-1800
Maximalwert [% vom Feldstärkegrenzwert]	7,28	6,26
Minimalwert [% vom Feldstärkegrenzwert]	0,04	0,002
Spannweite [dB]	45,2	69,9
Mittelwert [% vom Feldstärkegrenzwert]	2,00	1,55
Median [% vom Feldstärkegrenzwert]	0,93	0,58

Tabelle 3.15: Extremwerte für die beiden Frequenzbereiche, alle Messpunkte

Fazit:

Von den untersuchten Einflussfaktoren

- lateraler Abstand des Messpunktes von der Sendeanlage,
- Vertikalwinkel, mit dem man vom Messpunkt aus die Sendeanlage sieht,
- Sichtbedingungen zwischen Messpunkt und Sendeanlage und
- Frequenzband der Sendeanlage (LTE-800 und LTE-1800)

ist der *Abstand* im unmittelbaren Umfeld der Anlage (bis zu einigen hundert Meter, abhängig von Montagehöhe und Downtilt) offenbar als Maß zur Abschätzung der entstehenden LTE-Immission wenig geeignet. Grund dafür ist, dass in diesem Entfernungsbereich die Immission sehr stark durch die Nebenzipfel und Einzüge des stark bündelnden vertikalen Antennendiagramms geprägt ist und daher einen sehr 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. Die Immissionsreduzierung, die der Messpunkt erfährt, ist dabei abhängig von der Dämpfungswirkung des Objektes, aber auch von der Frage, in wie weit die Signale der Basisstation auch über Reflexionen z.B. an benachbarten Gebäuden oder Wänden zum Messpunkt gelangen können.

Der Einfluss des *Vertikalwinkels* ist ebenfalls nachweisbar: Messpunkte, die in oder nahe der vertikalen Hauptstrahlrichtung liegen, erfahren eine größere Immission als Messpunkte außerhalb der Hauptstrahlrichtung. Dies ist neben dem niedrigeren Grenzwert bei LTE-800 auch Ursache dafür, dass im *Frequenzbereich* von LTE-800 Anlagen im Durchschnitt etwas höhere Immissionen gemessen wurden als im Frequenzbereich von LTE-1800 Anlagen.

3.3 Vergleich von LTE-Immissionen zu anderen Funkdiensten

3.3.1 Vergleich von LTE- und GSM-/UMTS-Immissionen

Bereits in den Abschnitten 3.1 und 3.2 bei der Vorstellung der Messergebnisse und deren statistischer Auswertung wurde festgestellt, dass die LTE-Immissionen von ihrer Größenordnung und ihrer örtlichen Verteilung (Abstandsverhalten, Abhängigkeit vom Vertikalwinkel, Sichtverhältnisse) den Immissionen durch GSM- und UMTS-Mobilfunkbasisstationen stark ähneln. Dieser Vergleich soll in diesem Abschnitt systematisiert und vertieft werden. Für den Vergleich werden sowohl bereits publizierte Daten herangezogen, als auch die umfangreichen in vorliegender Studie erhobenen Daten zu GSM- und UMTS-Immissionen verwendet.

3.3.1.1 Vergleich anhand bereits publizierter Daten

Zur messtechnischen Erfassung von Immissionen im Umfeld von GSM- und UMTS-Basisstationen wurde vom Auftragnehmer im Auftrag des Bundesamts für Strahlenschutz eine umfangreiche Studie durchgeführt [BOR 06], die für einen Vergleich mit den in vorliegender Arbeit erhobenen LTE-Immissionen herangezogen werden kann. Die in [BOR 06] erhobenen GSM- und UMTS-Daten zeichnen sich dadurch aus, dass sie mit demselben Messverfahren (Schwenkmethode mit Hochrechnung auf die maximale Anlagenauslastung) ermittelt wurden und von ein und demselben Standort stammen.

Im nachfolgenden Bild und in Tabelle 3.16 sind die statistischen Daten der in [BOR 06] ermittelten GSM- und UMTS-Immissionen dargestellt.



Bild 3.19: Verteilungsdiagramm der GSM- und UMTS-Immissionen aus [BOR 06]

Kennwert	GSM	UMTS
Maximalwert [% vom Feldstärkegrenzwert]	12,81	8,38
Minimalwert [% vom Feldstärkegrenzwert]	0,01	0,01
Spannweite [dB]	62,2	58,5
Median [% vom Feldstärkegrenzwert]	1,75	0,72

Tabelle 3.16: Statistische Kennwerte der GSM- und UMTS-Immissionen aus [BOR 06]

Ein Vergleich mit Bild 3.14 und den Tabellen 3.13 und 3.14 dieses Berichts zeigt ein qualitativ ähnliches Verhalten der Messpunkte, d.h. die größte Zahl der Messpunkte fällt in die unteren Grenzwertklassen. Bezüglich des Maximalwertes liegt LTE mit 7,28 % geringfügig unterhalb der Ergebnisse für GSM und UMTS; der Median ist für LTE mit 0,70 % fast identisch zu den UMTS-Ergebnissen und damit deutlich kleiner als der GSM-Median.

Aus diesem ersten Vergleich kann abgeleitet werden, dass die in diesem Bericht erhobenen LTE-Immissionen offenbar in derselben Größenordnung liegen wie die mit demselben Messverfahren in [BOR 06] ermittelten GSM- und UMTS-Immissionen. Weitergehende Aussagen sind jedoch problematisch, da die GSM- und UMTS-Immissionen einerseits und die LTE-Immissionen andererseits an unterschiedlichen Standorten ermittelt wurden. Wie bereits beschrieben, hängt die Immissionsverteilung um Mobilfunksendeanlagen von zahlreichen, darunter auch geometrischen Einflussfaktoren ab, so dass diese bei unterschiedlichen Standorten bzw. Messpunkten schon an sich zu unterschiedlichen Immissionen führen können. Deswegen soll im nachfolgenden Abschnitt der Immissionsvergleich auf Basis von GSM- und UMTS-Messdaten erfolgen, die im Rahmen vorliegender Studie an *denselben* Standorten bzw. Messpunkten erhoben wurden wie die LTE-Immissionen. Hierdurch ist eine wesentlich bessere Vergleichbarkeit gegeben, da sich die zu vergleichende Funkdienste alle auf demselben Standort befinden und die Immissionsbeiträge aller Funkdienste jeweils am selben Messpunkt ermittelt wurden.

3.3.1.2 Vergleich anhand von GSM-/UMTS-Immissionen vom selben Standort

Laut Betreiber wird beim Rollout von LTE eine hohe Nutzung bestehender GSM- und UMTS-Standorte angestrebt. Bei vorliegenden Untersuchungen hat sich diese Aussage bestätigt; an allen untersuchten LTE-Standorten waren zusätzlich auch mehrere GSM- und UMTS-Systeme installiert. Somit ist es möglich, an den Messpunkten einen Vergleich zwischen GSM-/UMTS-Immissionen und den LTE-Immissionen vom gleichen Standort vorzunehmen. In diesen Vergleich werden primär die systematischen Messpunkte einbezogen, da die an den statistischen Messpunkten ebenfalls ermittelte Immission durch umliegende GSM- und UMTS-Anlagen den Immissionsvergleich verzerren würde (Entfall von Szenario 9).

Fasst man alle systematischen Messpunkte zusammen, ergibt sich im Mittel ein Zuwachs der Immissionen durch LTE von 37 % (Median bzgl. der Ausschöpfung des Leistungsflussdichte-Grenzwertes, Standardabweichung 56 %) bezogen auf die vom selben Standort verursachten GSM- und UMTS-Immissionen.

In Abschnitt 3.1 ist für jedes Szenario bereits ein mittlerer Unterschiedsfaktor GSM/UMTS zu LTE (gemittelt über alle Messpunkte des jeweiligen Szenarios) ausgewiesen worden. Dieser beträgt je nach Szenario zwischen -0,5 dB und 13,0 dB. Positive Werte bedeuten, dass die GSM-/UMTS-Immissionen im Mittel größer als die LTE-Immissionen sind. Nur an einem der 10 für den Vergleich herangezogenen Szenarien waren die LTE-Immissionen geringfügig größer. Die Unterschiedsfaktoren sind als rote Punkte in Bild 3.20 grafisch dargestellt und bilden die Basis für die folgenden Untersuchungen. Die Idee hierbei ist es, verschiedene anlagenseitige technische Parameter der GSM-/UMTS-Anlagen auszuwerten und den entsprechenden Parametern der LTE-Anlage gegenüberzustellen. Hieraus werden, vergleichbar mit dem Immissionsverhältnis, entsprechende Verhältnisse der technischen Parameter gebildet und ebenfalls in das Diagramm eingetragen. Sofern sich hier ein ähnliches Verhältnis wie beim Immissionsverhältnis ergibt (für alle Parameter wird ein linearer Einfluss auf die Immission angenommen), das entsprechende Parameterverhältnis also nahe

beim das Immissionsverhältnis kennzeichnenden roten Punkt liegt, ist der untersuchte technische Parameter offensichtlich mit der Immission korreliert.



Bild 3.20: Ergebnisse der Untersuchung zu den Einflussfaktoren für das Verhältnis von GSM-/UMTS-Immissionen zu LTE-Immissionen

Für die Frage, welche anlagenseitigen technischen Einflussfaktoren das Immissionsverhältnis bestimmen können, werden folgende Parameter untersucht:

- Die Anzahl der pro Sektor installierten GSM- und UMTS-Systeme in Vergleich zur Anzahl der installierten LTE-Systeme: Ist am Standort neben einem LTE-System noch ein GSM-900 und eine UMTS-System installiert, entspricht das Verhältnis der GSM-/UMTS-Systeme zu den LTE-Systemen einem Faktor 2 bzw. in logarithmischer Darstellung 3 dB. Bild 3.20 zeigt, dass es vor allem in den Szenarien 1, 2, 7 und 8 eine gute Übereinstimmung besser 2 dB des Parameters "Anzahl der Systeme" zum Immissionsverhältnis gibt. In den Szenarien 3 bis 6 und 11 ist die Übereinstimmung mit einer Differenz von über 4 dB geringer.
- Die Anzahl der Frequenzkanäle pro Sektor von GSM- und UMTS-Systemen im Vergleich zur Anzahl der LTE-Kanäle: Hier wird die Anzahl der GSM- und UMTS-Kanäle aufaddiert und mit der Anzahl der LTE-Kanäle (bei allen LTE-Systemen bis auf das Indoorszenario war MIMO aktiv, so dass hier pro LTE-System die Zahl der Kanäle 2 ist) verglichen. Die Korrelation ist hier insgesamt schlechter im Vergleich zur Anzahl der installierten Systeme.
- Die Differenz der Sendeleistungen pro Sektor zwischen den GSM-/UMTS-Systemen und dem LTE-System. Wird beispielsweise am Standort neben LTE (z.B. 2 Kanälen mit je 30 W) noch ein UMTS-System (z.B. 2 Kanäle mit je 30 W) und ein GSM-900 System

(z.B. 4 Kanäle mit je 15 W) betrieben, entspricht das Verhältnis der Sendeleistungen einem Faktor 2 bzw. 3 dB. Hier gibt es vor allem für die Szenarien 1, 2, 7 und 8 eine gute Übereinstimmung. Bei den Szenarien 7 und 8, bei denen sich eine besonders gute Korrelation zeigte, haben die installierten GSM- und UMTS-Systeme die gleichen horizontalen Abstrahlrichtungen wie das jeweilige LTE-System.

 Die Übertragungsbandbreite pro Sektor, hier definiert als Kanalbandbreite (200 kHz für GSM, 5 MHz für UMTS, 10 bzw. 20 MHz für LTE-800 bzw. LTE-1800). Der Unterschiedsfaktor ergibt sich als Verhältnis der aufsummierten Bandbreiten der Systeme. Die Übereinstimmungen sind für die Szenarien 6 bis 8 gut, für andere Szenarien aber teilweise extrem gering. Die Immissionsverhältnisse sind bis auf Szenario 6 durchweg größer als die Bandbreitenverhältnisse, was bedeutet, dass die LTE-Technologie für die gleiche übertragene Bandbreite weniger Immission verursacht.

Fazit:

Von den untersuchten Einflussfaktoren

- Anzahl der Systeme,
- Anzahl der Frequenzkanäle,
- Höhe der Sendeleistung und
- Verhältnis der Bandbreiten

gibt es die besten Übereinstimmungen hinsichtlich des Verhältnisses von GSM-/UMTS-Immissionen zu LTE-Immissionen bei der Anzahl der Systeme und der Größe der Sendeleistung. Hieraus kann geschlussfolgert werden, dass für die Frage, wie groß die durch LTE hinzukommenden Immissionen eines Mobilfunkstandorts sind, primär das Verhältnis der Sendeleistungen und der Anzahl der Mobilfunksysteme von GSM und UMTS im Vergleich zu LTE eine maßgebende Rolle spielt.

Über alle systematischen Messpunkte gemittelt ergibt sich ein Zuwachs von 37 % (Median bzgl. der Ausschöpfung des Leistungsflussdichte-Grenzwertes) durch LTE bezogen auf die vom selben Standort verursachten GSM- und UMTS-Immissionen.

3.3.2 Anteil der LTE-Immission an der Gesamtimmission

An 10 Szenarien mit insgesamt 50 Zufallsmesspunkten wurde - zusätzlich zur LTE-Immission - auch die gesamte Hochfrequenzimmission im Frequenzbereich von 100 kHz bis 3 GHz bestimmt. Somit kann für diese Punkte ermittelt werden, welchen Anteil an der Gesamtimmission die Felder der LTE-Anlagen ausmachen.

Im Mittel über alle Punkte ergab sich für die LTE-Immissionen leistungsbezogen ein Anteil von 22 % an der gesamten grenzwertbezogenen Hochfrequenzimmission.

Aus folgendem Bild sind die prozentualen Anteile für jedes der 10 untersuchten Szenarien getrennt dargestellt.


Bild 3.21: Prozentualer Anteil der LTE-Immission an der Gesamtimmission im Frequenzbereich von 100 kHz - 3 GHz (leistungsbezogen)

Immissionen von anderen als Mobilfunksendeanlagen (z.B. Ton und Fernsehrundfunk) trugen an den Messpunkten nur in untergeordnetem Maß zur Gesamtimmission bei.

Je nachdem, wie stark am selben Standort bzw. in der Umgebung befindliche GSM- und UMTS-Sendeanlagen zur Gesamtimmission beitragen, ergeben sich Szenarien, bei denen die LTE-Immissionen prozentual nur einen vergleichsweise geringen Anteil an der Gesamtimmission hatten (hier typisch ca. 1 bis 20 %), aber auch Standorte mit einem deutlich höheren Anteil von LTE an der Gesamtimmission (hier typisch ca. 30 bis 80 %). Bei Betrachtung von Bild 3.21 könnte der Eindruck entstehen, dass der Anteil der LTE-Immissionen an der Gesamtimmission im städtischen Umfeld (Szenarien 1 bis 5) typisch deutlich geringer ausfällt als im ländlichen Umfeld (Szenarien 6 -bis 10). Dieser Schluss ist jedoch nicht richtig, da, wie beispielsweise Szenario 7 (ländliches Szenario) zeigt, der prozentuale Anteil primär von der Frage bestimmt wird, ob in der Umgebung der LTE-Anlage noch weitere Funksender betrieben werden oder nicht.

3.3.3 Umwidmung eines Teils des DVB-T-Frequenzbereichs für LTE-800

Die ersten in Deutschland in Betrieb genommenen LTE-Sendeanlagen dienten besonders der Versorgung des ländlichen Bereichs, um noch vorhandene Lücken in der flächendeckenden Breitbandversorgung zu schließen. Hierbei sollte es auch möglich werden, vergleichsweise große Funkzellen zu realisieren. Daher war es wichtig, den Frequenzbereich für die LTE-Anlagen möglichst niedrig zu wählen, um möglichst große Versorgungsreichweiten zu ermöglichen (LTE-800). Die Wahl fiel auf den oberen Frequenzbereich des terrestrischen TV-Bandes (790 - 862 MHz), da hier Bandbreite durch die Einführung des digitalen Fernsehens (DVB-T) frei wurde ("Digitale Dividende"). Die bisher auf den Kanälen 61 bis 69 in Deutschland betriebenen DVB-T-Sender wurden auf andere Kanäle unterhalb 790 MHz verschoben.

Somit kann grundsätzlich davon ausgegangen werden, dass in der Summe eine Zunahme der Exposition der Bevölkerung mit Hochfrequenzsignalen durch die Einführung von LTE-800 erfolgte, da die DVB-T-Sender nicht ersatzlos abgeschaltet wurden, sondern nur in einen anderen Frequenzbereich umgelagert wurden und zusätzlich die LTE-800-Anlagen in Betrieb genommen wurden.

Im Rahmen dieses Projektes soll jedoch auch untersucht werden, ob die Umwidmung des Frequenzbereichs der "Digitalen Dividende" zu einer im Verhältnis über- oder unterproportionalen Veränderung der Exposition der Bevölkerung durch Hochfrequenzsignale führt. Die DVB-T-Versorgung wird im Regelfall durch einen Grundnetzsender mit einigen Kilowatt Leistung für einen Radius von typisch etwa 60 Kilometer sichergestellt, LTE-bedient sich hingegen einer viel größeren Anzahl von Sendern mit Leistungen von typisch bis zu 100 Watt pro Funkzelle. Die Radien der Funkzellen liegen bei weniger als einem Kilometer im städtischen Bereich und bis zu etwa 10 Kilometer im ländlichen Umfeld. Die Antennen von DVB-T-Grundnetzsendern befinden sich meist in exponierter Lage auf hohen Sendetürmen (>100 m), während die LTE-Antennen üblicherweise auf bereits vorhandenen Mobil-funkstandorten installiert werden.

Aufgrund dieser Unterschiede ist es durchaus denkbar, dass die Immissionen von LTE im Vergleich zu DVB-T im Mittel unterschiedlich ausfallen. Dieser Frage soll im Folgenden näher nachgegangen werden.

Die Umwidmung der "Digitalen Dividende" führte dazu, dass in der Region Nürnberg an den DVB-T-Senderstandorten "Fernmeldeturm Nürnberg" und "Dillberg" der Sender im Kanal 66 (834 MHz) in einen niedrigeren Kanal verschoben wurde. Ebenso wurde in der Region München/Oberbayern an den Senderstandorten "Olympiaturm München" und "Wendelstein" ein DVB-T-Signal vom Kanal 66 in den niedrigeren Frequenzbereich verschoben. Somit waren in diesen beiden Regionen keine DVB-T-Signale mehr im Frequenzbereich 790 bis 862 MHz vorhanden, das Band war für LTE frei.

Im Projekt "Bestimmung der Exposition der Bevölkerung in der Umgebung von digitalen Rundfunk und Fernsehsendern" [BOR 06-1], das vom Auftragnehmer für das Bundesamt für Strahlenschutz im Rahmen des DMF in den Jahren 2004 bis 2006 bearbeitet wurde, fanden genau in diesen beiden Regionen umfangreiche Immissionsmessungen im Frequenzbereich des digitalen Fernsehens statt. Gemessen wurden die DVB-T-Immissionen an insgesamt ca. 200 zufällig ausgewählten Punkten in der Umgebung der 4 oben genannten Senderstandorte. Da die Messungen frequenzselektiv vorgenommen wurden, kann aus den damaligen Daten die Immission im Kanal 66 separiert werden.

Unter Zuhilfenahme von im Internet verfügbaren Versorgungsinformationen der 3 LTE-Netzbetreiber wurden aus den ca. 200 Messpunkten 50 Punkte derart ausgewählt, dass für sie jeweils ein oder mehrere Betreiber eine LTE-Versorgung (mindestens im Outdoorbereich) angeben. Die LTE-Versorgung in diesen Regionen ist aktuell bereits so weit flächendeckend, dass aus den 200 Punkten 50 geeignete Punkte festgelegt werden konnten. Die Punkte befanden sich im Stadtgebiet von München bzw. Nürnberg, sowie im umliegenden ländlichen Bereich. Ihre ungefähre Lage kann den folgenden beiden Bildern entnommen werden.



Bild 3.22: Immissionsvergleich LTE / DVB-T: Messpunkte in der Region Nürnberg



Bild 3.23: Immissionsvergleich LTE / DVB-T: Messpunkte in der Region München

Für den Vergleich wurden die an den 50 Punkten im Jahr 2006 gemessenen Immissionen, verursacht durch den DVB-T-Kanal 66, herangezogen. Diese Werte wurden zu den im Sommer 2012 an den gleichen Punkten gemessenen LTE-800-Immissionen (auf maximale Anlagenauslastung extrapolierte Summenimmission aller vorhandenen LTE-800-Signale) ins Verhältnis gesetzt. An 5 der 50 Punkte lag die LTE-Immission unter der Nachweisgrenze des Messgerätes, daher wurde als Messergebnis der Wert der Nachweisgrenze (0,004 % Grenzwertausschöpfung bzgl. E) verwendet. Für jeden Messpunkt wurde das Verhältnis aus



LTE- und DVB-T-Immission in dB errechnet, es ergibt sich das in folgendem Bild dargestellte Ergebnis.

Bild 3.24: Immissionsvergleich LTE / DVB-T: Unterschiedsfaktor in dB

An 23 der 50 untersuchten Punkte überwiegen die LTE-800-Immissionen. Im Mittel sind die aktuellen LTE-800-Immissionen um etwa 1,4 dB größer, als es vorher die DVB-T-Immissionen im Kanal 66 waren. Absolut gesehen wurde als größte LTE-800-Immission eine feldstärkebezogene Grenzwertausschöpfung von 2,94 % gemessen. Hier befand sich in unmittelbarer Umgebung des Messpunktes ein LTE-800-Standort. Die größte gemessene DVB-T-Immission erreichte eine Grenzwertausschöpfung von 0,14 %. Minimal fanden sich an den Messpunkten Immissionen mit 0,004 % (LTE-800) bzw. 0,002 % (DVB-T) Grenzwertausschöpfung.

Trotz deutlich geringerer Sendeleistung (und vermutlich noch nicht abgeschlossenem Netzausbau) werden in den beiden betrachteten Regionen derzeit offensichtlich an den Messpunkten im Mittel etwas höhere Immissionen durch die aktuell vorhandenen LTE-800-Anlagen generiert, als es vorher durch die im Frequenzbereich der "digitalen Dividende" betriebenen DVB-T-Sender der Fall war. Der Grund dafür ist in der größeren Anzahl an Senderstandorten (kleinere Zellradien, sowie drei Netzbetreiber parallel) sowie den niedriger montierten Sendeantennen bei LTE zu suchen.

Für obigen Vergleich wurde die auf maximale Anlagenauslastung hochgerechnete LTE-Immission verwendet. Die Minimalimmission bei LTE-Anlagen liegt typisch etwa 6 dB unter der Maximalimmission. Daher beträgt im täglichen Mittel (d.h. die LTE-Anlagen senden nicht permanent mit maximaler Sendeleistung) der Unterschiedsfaktor zwischen LTE- und DVB-T-Immission nicht - wie oben angegeben - 1,4 dB, sondern der Unterschied ist geringer, er liegt (je nach momentaner Auslastung der LTE-Anlagen) in etwa zwischen -4,6 und 1,4 dB. d.h. die LTE-800-Immission kann im typischen Tagesverlauf auch geringer sein, als es die früher in diesem Frequenzbereich vorhandene DVB-T-Immission war

Es ist auch zu berücksichtigen, dass die vergleichenden Untersuchungen nur in zwei kleinen Regionen Deutschlands durchgeführt wurden und mit einer Anzahl von 50 Messpunkten die statistische Aussagekraft der Ergebnisse insbesondere bezüglich des absoluten Unterschiedsfaktors eingeschränkt ist.

3.4 Langzeitmessungen

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse von 2 Langzeitmessungen an einer LTE-1800 Anlage in städtischer Umgebung und einer LTE-800 Anlage in ländlicher Umgebung vorgestellt.

3.4.1 Städtisches Szenario

Die Langzeitmessung über 24 Stunden wurde in einer Entfernung von ca. 140 m zu einer LTE-1800 Mobilfunksendeanlage in einer Großstadt des Ruhrgebietes ohne Sichtverbindung im 5. OG eines Gebäudes durchgeführt. Der Aufbau der Messungen ist in folgendem Bild dokumentiert.



Bild 3.25: Aufbau der Langzeitmessung mit Ausrichtung zur LTE-Mobilfunksendeanlage in einer Entfernung von ungefähr 140 m, NLOS

Die Messung des zeitlichen Verlaufs der LTE-Sendesignale wurde vom 19.10.2012, Startzeit 19:00 Uhr, bis zum 20.10.2012, Endzeit 19:00 Uhr, durchgeführt. Es wurden die LTE-Signale bei einer Mittenfrequenz von 1815 MHz und einer Bandbreite von 20 MHz mit dem Narda SRM-3006 im Modus "LevelRecorder" über den oben genannten Zeitraum jeweils in einem zeitlichen Abstand von 30 Sekunden aufgenommen.

Im folgenden Bild ist der resultierende Verlauf der LTE-Immissionen über den oben genannten Zeitraum zu sehen.



Bild 3.26: Verlauf der LTE-Immission (Mittenfrequenz: 1815 MHz; Bandbreite: 20 MHz) über einen Zeitraum von 24 Stunden

Insgesamt zeigt das obige Bild, dass der LTE-Immissionsverlauf mehr oder weniger auf einer "glatten" Linie bei ca. 0,008 V/m verläuft, d.h. zeitlich konstant ohne nennenswerte Variationen ist. Dies deutet darauf hin, dass die Anlage während dieser Zeit nur die (zeitlich konstanten) Signalisierungskanäle abgestrahlt hat und kein Datenverkehr abgewickelt wurde. Lediglich in der Zeit von etwa 11 – 15 Uhr sind leichte Schwankungen zu erkennen, die auf Verkehrsauslastungen hindeuten.

Auffällig ist das dreimalige Einbrechen der Immission in den Nachstunden. Da es sich hierbei um eine Reduzierung von konstant ca. 1,5 dB handelt, liegt der Grund höchstwahrscheinlich in einem Wartungseingriff des Anlagenbetreibers in die LTE-Sendeanlage.

Die kurzzeitige deutliche Immissionserhöhung während eines 30-sekündigen Messzeitpunktes um ca. 21:30 Uhr könnte in einem Betreten des Raumes durch z.B. Wachpersonal begründet sein. Darüber hinaus wurde um kurz nach 11 Uhr vom Messgerät für eine kurze Zeit nur das Grundrauschen aufgenommen. In dieser Zeit war die Sendeanlage offensichtlich abgeschaltet. Insgesamt zeigt der Immissionsverlauf, dass zum Zeitpunkt der Messung nur sehr wenig Verkehr über diese LTE-1800 Sendestation abgewickelt wurde und offenbar noch Wartungseingriffe in die Anlage seitens des Betreibers durchgeführt wurden.

3.4.2 Ländliches Szenario

Eine zweite Langzeitmessung über 24 Stunden, diesmal im ländlichen (kleinstädtischen) Umfeld wurde in einer Entfernung von ca. 890 m zu einer LTE-800 Mobilfunksendeanlage "Kulmbach-Rehberg" mit Sichtverbindung auf dem Balkon im 3. OG eines Wohnhauses in 95326 Kulmbach durchgeführt. Der Aufbau der Messungen ist in folgendem Bild dokumentiert.





Bild 3.27: Aufbau der Langzeitmessung (links), Messantenne mit LTE-Mobilfunksendeanlage in einer Entfernung von ungefähr 890 m im Hintergrund (rechts)

Neben der LTE-Anlage sind am Standort auch noch diverse GSM-/UMTS-Systeme sowie Funkruf- und ein UKW-Lokalradiosender in Betrieb. Daher bietet sich hier ein messtechnischer Vergleich der verschiedenen Immissionen an.

Die Messung des zeitlichen Verlaufs der Signale wurde vom 07.10.2012, Startzeit 18:30 Uhr, bis zum 08.10.2012, Endzeit 18:30 Uhr, durchgeführt. Die verschiedenen Signale wurden frequenzselektiv mit dem Narda SRM-3006 im Modus "Safety Evaluation" über den oben genannten Zeitraum jeweils in einem zeitlichen Abstand von 30 Sekunden aufgenommen.

Im folgenden Bild ist der resultierende Verlauf der Immissionen der verschiedenen Funkdienste über den oben genannten Zeitraum zu sehen. Aufgrund der großen Pegelunterschiede (>30 dB) werden die Messergebnisse nicht linear in V/m, sondern logarithmisch in dBµV/m angegeben.



Bild 3.28: Vergleich des zeitlichen Verlaufs der Immission verschiedener Funkdienste über einen Zeitraum von 24 Stunden

Die größte am Messort feststellbare Immission wird durch den UKW-Lokalradiosender verursacht, darunter liegen die Immissionen, verursacht durch GSM- und UMTS-Anlagen sowie dem Funkrufsender. Die geringsten Immissionen erzeugt das LTE-System. Mehrere Tatsachen lassen diesen Unterschied plausibel erscheinen: Am Sendemast befindet sich derzeit nur ein LTE-System, dagegen insgesamt 8 GSM-/UMTS-Systeme verschiedener Netzbetreiber. Zudem liegt der Messort deutlich außerhalb der horizontalen Hauptsenderichtungen der LTE-Antennen, die Antenne des UKW-Lokalradios ist hingegen horizontal nahezu direkt auf den Balkon ausgerichtet.

Das LTE-Signal zeigt signifikante zeitliche Schwankungen (man bedenke, dass im Vergleich z.B. zu Bild 3.26 durch die logarithmische Darstellung zeitliche Feldstärkevariationen hier nur vergleichsweise schwach ausgeprägt dargestellt werden). Zurückzuführen sind diese auf tatsächliche Auslastungsschwankungen, wie durch Beobachten des Signals im Zeitbereich nachgewiesen werden konnte. Der hier gemessene Standort versorgt aufgrund seiner exponierten Lage auf einem Berg eine vergleichsweise große Funkzelle, so dass die Wahrscheinlichkeit, dass in der Zelle Teilnehmer eingebucht sind, durchaus vergleichsweise groß ist.

Es zeigen sich sowohl kleinskalige Schwankungen von Messwert zu Messwert (verursacht durch die paketorientierte Datenkommunikation), als auch großskalige Änderungen der Immission mit einem Maximum in den Abendstunden. Möglicherweise nutzen die Teilnehmer den LTE-Dienst insbesondere nach Feierabend zum Surfen im Internet.

Das kurzzeitige Absinken des LTE-Messwertes um ca. 10:30 Uhr bzw. 14:00 Uhr auf Werte um 71 dB μ V/m deutet auf ein Fehlen des Hochfrequenzsignals hin, da die Nachweisgrenze für das LTE-800-Signal bei dieser Messung etwa bei 71 dB μ V/m liegt.

3.5 Momentanimmission bei unterschiedlichen Auslastungszuständen der LTE-Basisstation

In diesem Abschnitt wird untersucht, wie sich die Momentanimmission bei unterschiedlichen Auslastungszuständen der LTE-Basisstation ändert. Die Messungen wurden bei der Firma E-Plus in Düsseldorf durchgeführt, die in ihrem Gebäude eine Indoor-LTE-Versorgung im Frequenzbereich LTE-1800 bei 18 MHz Signalbandbreite betreibt. Der Verkehr wurde dabei definiert mit einem LTE-Surfstick in einem Notebook erzeugt. Die Untersuchungen fanden in einem Besprechungsraum statt, vor dem auf dem Gang eine LTE-Indoor-Antenne an der Decke montiert war. Für die Messungen wurde ein Spektrumanalysator (Rohde & Schwarz FSP-7) verwendet, an den eine logarithmisch-periodische Empfangsantenne (Schwarzbeck USLP-9142) angeschlossen war. Antennenfaktoren wurden bei der Messung nicht berücksichtigt, so dass die Ergebnisse im Folgenden als Empfangsleistung in dBm dokumentiert sind. Die Messungen erfolgten mit einer Auflösebandbreite von 10 MHz.

Bild 3.29 zeigt das LTE-Signal im Zeitbereich ohne Verkehrslast der Basisstation. Vergleichbar zu Bild 3.7 des Zwischenberichtes zu vorliegendem Projekt [BOR 12] weist das Signal eine periodische, pulsartige Struktur auf, die durch die Signalisierungskanäle und -signale bedingt ist.



Bild 3.29: LTE-Signal im Zeitbereich, Szenario "ohne Verkehr"

Das Signalmuster verändert sich, wenn Last auf die Basisstation geschaltet wird. Bild 3.30 zeigt das Signal im Zeitbereich bei einem Szenario, bei dem im Internet gebrowst wird. Dieser Zustand zeichnet sich dadurch aus, dass während des Aufrufs einer Internetseite kurzzeitig Daten geladen und Verkehr an der Basisstation erzeugt wird, wohingegen beim Betrachten der Seite weitgehend Inaktivität herrscht (Basisstation für den betreffenden Nutzer im Ruhezustand), bis eine neue Seite aufgerufen wird. Für das Laden einer neuen Seite sind offensichtlich nur geringe Ressourcen notwendig, da der Maximalpegel in Bild 3.30 nahezu unverändert bleibt.



Bild 3.30: LTE-Signal im Zeitbereich, Szenario "Browsen im Internet"

Zusätzlich zu den dargestellten Signalformen im Zeitbereich wurde auch ein "Aktivitätsprofil" aufgenommen. Hierzu wurde eine extrem große Sweepzeit (hier 20 Sekunden) eingestellt, die dazu führt, dass über eine Zeitspanne von 20 Sekunden (x-Achse) ein zeitgemitteltes LTE-Signal dargestellt wird. Beim verwendeten Spektrumanalysator FSP-7 mit 501 Horizon-talpixeln stellt jedes Bildschirmpixel eine zeitliche Mittelung des aktuellen LTE-Signals über 40 ms dar. Dieses solchermaßen erzeugte Aktivitätsprofil lässt sich z.B. mit der bei Computern verfügbaren Darstellungsart "Verlauf der CPU-Auslastung" vergleichen. Die Kurven wurden als ASCII-Daten ausgelesen und daraus ein linearer Leistungsmittelwert über die gesamte Beobachtungsdauer (hier 20 Sekunden) gebildet (siehe Tabelle 3.17).

In Bild 3.31 ist zu erkennen, dass offensichtlich zu den Zeitpunkten erhöhter Downloadaktivität die über 40 ms-Intervalle gemittelte Immission kurzzeitig um bis zu etwa 8 dB über das "Grundrauschen" ansteigt. Beim Szenario "Browsen im Internet" ist allerdings die Auslastung der LTE-Basisstationen im Vergleich zu den nachfolgenden Szenarien nur gering, wie aus den entsprechenden Aktivitätsprofilen abgelesen werden kann. Das in Bild 3.33 erkennbare "Plateau" bei etwa -47 dBm wird zu keiner Zeit erreicht.





In einem nächsten Schritt wurde über einen FTP-Download maximaler Datenverkehr mit ca. 60 MBit/s erzeugt. Bild 3.32 zeigt den entsprechenden Signalverlauf und Bild 3.33 das zugehörige Aktivitätsprofil. Im Vergleich zu den vorangegangen Bildern ist zu erkennen, dass der Pegel im Zeitbereich deutlich ansteigt und eine nahezu konstante Linie aufweist, die nur von kurzen Einbrüchen unterbrochen ist.



Bild 3.32: LTE-Signal im Zeitbereich, Szenario "FTP-Download"



Bild 3.33: Aktivitätsprofil beim Szenario "FTP Download"

Abschließend wurde ein Download eines Videos in Standardqualität gestartet. Das Aktivitätsprofil ist in Bild 3.34 dargestellt (Zeitspanne 100 Sekunden). Hierbei war zu beobachten, dass der Download nicht kontinuierlich lief. Während kurzer Zeitintervalle wurden die Videodaten mit hoher Datenrate geladen und in den Cache des Notebooks gespeichert, danach wurde die Datenübertragung bis zum nächsten Ladevorgang nahezu komplett gestoppt. Das sich ergebende Aktivitätsprofil weist Ähnlichkeiten zum Szenario "Surfen im Internet" auf, wobei im Videodownload während der Downloadzeiten eine höhere Amplitude vorhanden ist. Im feinskaligen zeitlichen Verlauf des LTE-Signals am Spektrumanalysator ergab sich eine Kombination von Bild 3.29 und Bild 3.32, d.h. lange Inaktivitätszeiten ohne Verkehr wechselten mit kurzen Perioden maximalen Datenverkehrs.



Bild 3.34: Aktivitätsprofil beim Szenario "SD-Video Download"

In Tabelle 3.17 sind die mittleren Immissionen als Empfangsleistung in dBm für die untersuchten Szenarien dargestellt.

Szenario	kein Verkehr	Browsen	SD-Video Download	FTP Download
mittlere Empfangsleistung	-58,3 dBm	-57,5 dBm	-56,4 dBm	-47,8 dBm
Differenz zu "kein Verkehr"	0,0 dB	0,8 dB	1,9 dB	10,5 dB

Tabelle 3.17: Mittlere Immissionen bei unterschiedlicher Auslastung der LTE-Basisstation

Fazit:

- Im hier untersuchten Szenario führt ein einzelner Nutzer durch typische Internetnutzungen (Browsen, SD-Video Download) nur zu einer vergleichsweise geringen Änderung der zeitgemittelten Immission (0,8 bis 1,9 dB) durch die Basisstation. Der Momentanwert der Immission kann zwar um über 10 dB ansteigen, allerdings erfolgt dies nur kurzzeitig.
- Neben der Zahl der Nutzer und ihrer Kapazitätsanforderungen bestimmt vor allem auch die Konfiguration des Netzes die Differenz zwischen Momentan- und Maximalimmission. Parameter wie Kanalbandbreite, PDCCH-Konfiguration (1 oder 3 Symbole), MIMO und EPRE-Einstellungen bestimmen das Verhältnis von Signalisierung zu maximal möglichem Verkehr, so dass sich in anderen Netzen andere Zahlenwerte ergeben können.

3.6 Immission durch Basisstationen von Femtozellen

3.6.1 Grundsätzliches

Der in den letzten 5 Jahren zu beobachtende Wandel im Bereich der Benutzerendgräte (Stichwort: "Smartphones") führte zu einer massiven Zunahme der mittels Mobilfunknetze zu übertragenden Datenmenge. Im Bereich der Indoorversorgung besteht die Herausforderung auf Seiten der Betreiber nun nicht mehr nur in der Sicherstellung eines ausreichenden Versorgungspegels, sondern auch in der Zurverfügungstellung genügender Datenüber-tragungskapazitäten.

Ein unzureichender Versorgungspegel im Gebäude kann beispielsweise durch die Verwendung eines Indoorrepeaters ausgeglichen werden. Hierbei wird das Signal der lokalen Funkzelle außerhalb des Gebäudes mittels einer Antenne aufgenommen, verstärkt und im Gebäudeinneren durch eine oder mehrere Antennen wieder abgestrahlt. Analog gilt dies auch für den Rückkanal. Der Repeater kompensiert somit die Gebäudedämpfung und verbessert damit die Funkversorgung im Gebäudeinneren.

Der Teilnehmer im Gebäude nutzt in dieser Konfiguration jedoch weiterhin das Signal der Außenzelle, er muss die verfügbare Kapazität (Bandbreite) also mit allen anderen Teilnehmern, die ebenfalls in dieser Zelle eingebucht sind, teilen. Ein Repeater kann somit das Problem eines unzureichenden Versorgungspegels lösen, nicht aber auftretende Kapazitätsengpässe.

Daher wurden in den letzten Jahren Lösungen vorgeschlagen, im Indoorbereich mittels so genannter "Femtozellen" eine eigenständige Funkzelle zu realisieren, die unabhängig von der Außenzelle im Gebäudeinneren ausreichend Pegel <u>und</u> zusätzliche Bandbreite zur Verfügung stellt. Femtozellen stellen quasi extrem kleine Pikozellen dar, die bereits aus der GSM-Technik seit langem bekannt sind und häufig zur Versorgung von Orten mit besonders hohem Verkehrsaufkommen (Bahnhöfe, Flugplätze, Stadien) eingesetzt werden. Mit Femtozellen reduziert sich der Versorgungsbereich auf einen oder wenige Räume innerhalb eines Gebäudes, also beispielsweise den privaten Wohnbereich, kleine Büros und Geschäfte. Femtozellen können so konfiguriert werden, dass sie den Zugang zum Netz nur einem beschränkten Personenkreis gestatten oder - wie eine öffentliche Funkzelle - auch jeden Kunden des Betreibers annehmen.

Zum Betrieb einer Femtozelle benötigt man einen oder mehrere Accesspoints (AP), die für die Abwicklung der Funkkommunikation im Gebäude verantwortlich sind (siehe Bild 3.35).

Mit dem Kernnetzwerk des Betreibers ist der AP im Regelfall über eine oder mehrere xDSL-Leitungen des öffentlichen Telekommunikationsnetzes verbunden.



Bild 3.35: Immissionsmessung in der Nähe eines UMTS-Femtozellen-AP

Nachfragen bei den deutschen Netzbetreibern ergaben, dass derzeit nur ein Betreiber in Deutschland eine größere Zahl an Femtozellen (ca. 150) in Betrieb hat. Dabei handelt es sich ausschließlich um UMTS-Femtozellen. LTE-Femtozellen sind derzeit nicht verfügbar. Ein nur sehr geringer Teil davon wird an Kundenstandorten (z.B. kleinere Büros oder Privatwohnungen) eingesetzt, die meisten dienen der Sicherstellung einer ausreichenden Funkversorgung für konzerneigne Telefonläden oder Partnershops. Die Femtozelle wurde vom Betreiber nie im Privat- oder Geschäftskundenbereich aktiv vermarktet, da der Betreiber bisher die Probleme dieses Netzelementes gegenüber dem Nutzen als dominant ansah. Allerdings hat ein zweiter deutscher Betreiber im August 2012 öffentlich angekündigt, in absehbarer Zukunft UMTS-Femtozellen Geschäftskunden zur Verfügung zu stellen [VOD 12].

Für die vergleichenden Immissionsmessungen konnten daher keine Femtozellenstandorte in Privatwohnungen herangezogen werden, da der Betreiber keine geeigneten Standorte benennen konnte. Stattdessen wurden eine Femtozelle im Bereich einer kleinen Firma (Büroumfeld) sowie 3 Femtozellen in Telefonläden vermessen. An allen Standorten war als Accesspoint der gleiche Typ im Einsatz (Hersteller: Huawei). Vom Betreiber wurde angegeben, dass dieser mit einer maximalen Sendeleistung von 0,1 Watt arbeitet. Die Ergebnisse der Immissionsmessungen sind in den Abschnitten 3.6.2 und 3.6.3 dargestellt.

Ab dem Jahr 2008 konnte ein gewisser Hype um Femtozellen in den Fachmedien festgestellt werden. Man stieß immer wieder auf Artikel, die den Durchbruch der Femtozellentechnologie auf dem Markt als unmittelbar bevorstehend ankündigten. Gelegentlich war von einer völligen Revolution der Zellstruktur zu lesen, bis hin zu der Vision, dass ein Netz in manchen Regionen nur noch aus Femtozellen bestehen würde. Im Lauf der Jahre kristallisierte sich jedoch mehr und mehr heraus, das Femtozellen nur bei Schwachstellen in der klassischen Makrozellstruktur sinnvoll eingesetzt werden können. Eine Schwäche der Femtozelle liegt darin, dass die Betreiber bei UMTS bisher meist keinen Frequenzkanal zur Verfügung haben, den sie exklusiv für die Femtozellen zur Verfügung stellen können. Damit im Gesamtnetz ein störungsfreier Betrieb erhalten bleibt, müssen hinzukommende Femtozellen bei einer schon bestehenden Makrozellenstruktur bezüglich ihrer verwendeten Scramblingcodes geplant werden. Dies führt zu gesteigerten Kosten für den Einsatz der Femtozellen. In Ländern, in denen Betreiber Kanäle exklusiv für Femtozellen zur Verfügung stellen können, fällt dieser Planungsaufwand nicht an.

Die aktuell in Betrieb befindlichen Femtozellen werden im derzeitigen Einsatzszenario auch vom Betreiber fernüberwacht, damit dieser den im Nutzungsvertrag zugesicherten Service auch garantieren kann. Schaltet ein Kunde beispielsweise seine Femtozelle ab, weil er sie längere Zeit nicht nutzt (Urlaub), erscheint beim Netzbetreiber ein Alarm. Der Anbieter erhält keine Informationen über die Gründe der Abschaltung vom Kunden, so dass er eventuell weitere Schritte veranlasst, um die scheinbare Störung zu beheben. Dies produziert wiederum zusätzliche Kosten für den Anbieter.

Ein weiteres Problem, das für den Betreiber von großer Bedeutung ist, liegt in der Sicherheit. Durch die Anbindung der Femtozellen über das Internet ergeben sich große Herausforderungen, um entsprechende Schutzmechanismen zu installieren, damit keine unerlaubten Zugriffe auf das Kernnetz des Betreibers stattfinden. Nach Auskunft eines Betreibers sind bereits Fälle bekannt, bei denen es Sicherheitsexperten gelungen ist, über eine Femtozelle in das Kernnetzwerk des Mobilfunkanbieters einzudringen. Es ist eigentlich vorgesehen, dass der AP die gleiche Internetverbindung nutzt, die auch der Kunde für seine privaten Zwecke verwendet. Diesem Risiko entziehen sich aber meist die Netzbetreiber, indem sie für den AP einen eigenen Breitbandzugang bereitstellen. Dies wiederum bringt auch einen Vorteil für den Kunden am Standort, da seine private Leitung nicht mit dem Verkehr der Femtozelle belastet wird.

Außerdem ist der sinnvolle Einsatz von Femtozellen an das Vorhandensein einer ausreichend schnellen xDSL-Verbindung gekoppelt. Potenzielle Kunden im ländlichen Umfeld, die beispielsweise nur xDSL-Anschlüsse mit weniger als 2 Mbit/s zur Verfügung haben, können auch keine UMTS-Femtozelle sinnvoll betreiben. Eine Verbesserung der Mobilfunkversorgung ist somit nicht möglich.

Es bleibt also abzuwarten, ob in Zukunft in Deutschland Femtozellen im Privat- und kleingewerblichen Bereich überhaupt in nennenswerter Anzahl eingesetzt werden.

Grundsätzlich ist die Exposition der Allgemeinbevölkerung bezüglich hochfrequenter elektromagnetischer Felder für Deutschland in der 26. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV) geregelt [26. BImSchV]. Dabei ist allerdings zu beachten, dass für Kleinleistungsfunksendeanlagen (z.B. GSM-/UMTS-Indoorrepeater, DECT- oder WLAN-Basisstationen, aber auch die hier betrachteten Femtozellenbasisstationen) bzw. die dazugehörigen Endgeräte, anders als z.B. für die auf Dächern oder Masten installierten Mobilfunk-Basisstationen, in Deutschland die 26. BImSchV nicht anwendbar ist, solange es sich hierbei nicht um fest installierte Hochfrequenzanlagen mit einer Sendeleistung von 10 W isotroper Strahlungsleistung (EIRP) oder mehr handelt (was bei den hier betrachteten Femtozellen-, DECT- und WLAN-Basisstationen der Fall ist). Anzuwenden sind daher für Funksysteme kleiner Leistung vielmehr die Normen DIN EN 50392 [EN 50392] bzw. auch DIN EN 50385 [EN 50385], die bezüglich der Grenzwerte auf die EU-Ratsempfehlung 99/519/EG [99/519/EG] verweisen, die ihrerseits auf den ICNIRP-Empfehlungen basieren [ICNIRP 98]. Die Grenzwerte dieser beiden Empfehlungen sind im relevanten Frequenzbereich jedoch identisch mit den Grenzwerten der 26. BlmSchV.

Somit sind letztlich dieselben Grenzwerte anzuwenden, die durch die 26. BImSchV für Sendeanlagen über 10 Watt EIRP vorgegeben werden. Dennoch werden in den folgenden Ergebnistabellen die Immissionen formal nicht auf die 26. BImSchV, sondern auf die EU-Ratsempfehlung bezogen, um keine Missverständnisse bezüglich der Anwendbarkeit der 26. BImSchV aufkommen zu lassen.

3.6.2 UMTS-Femtozelle im Büroumfeld

Die Messungen wurden in den Geschäftsräumen einer Firma im Südwesten von München durchgeführt. Der UMTS-Femtozellen-Accesspoint ist an einer Wand in der Teeküche der Firma installiert (siehe Bild 3.34 im vorherigen Abschnitt). Zusätzlich werden in den Geschäftsräumen auch WLAN/DECT-Systeme betrieben. Nach Auskunft der Standortdatenbank der BNetzA sind im näheren Umfeld des Bürogebäudes keine externen Mobilfunksendeanlagen vorhanden. Ein grober Grundriss der Geschäftsräume mit den Messpunkten und dem Standort des Femtozellen-AP sowie der lokalisierten firmeneigenen WLAN-Accesspoints ist in Bild 3.36 zu sehen.



Bild 3.36: Szenario 1: Immissionsmessung im Büroumfeld

Alle Immissionen wurden mit der Schwenkmethode gemessen. Die GSM- und UMTS-Immissionen wurden mit dem in [BOR 07] beschriebenen Verfahren auf maximale Anlagenauslastung hochgerechnet (Annahme typischer Kanalzahlen). Bei WLAN-Signalen wurde ebenfalls der Wert bei höchster Download-Anlagenauslastung angegeben, DECT wurde auf die Immission bei Abwicklung einer Gesprächsverbindung extrapoliert [SCHM 05]. Alle Messwerte werden als

- Elektrische Feldstärke in V/m,
- Elektrische Feldstärke in % vom Grenzwert der 26. BlmSchV und
- Elektrische Leistungsflussdichte in µW/m²

für den vorstehend beschriebenen Betriebszustand der Anlagen angegeben.

Nachfolgende Tabelle beschreibt die Lage der Messpunkte.

Punkt Nr.	Messort	Sicht (zum AP)	Horizontal- entfernung zum AP
1.1	Teeküche	ja	ca. 2 m
1.2	Teeküche	ja	ca. 6 m
1.3	Büro 1	nein	ca. 10 m
1.4	Büro 2	nein	ca. 17 m
1.5	Büro 3	nein	ca. 2 m

In folgender Tabelle ist die Immission, verursacht durch den Femtozellen-Accesspoint, für die 5 untersuchten Punkte angegeben.

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach EU-Ratsempfehlung	Leistungsflussdichte S in µW/m²
1.1	1,29	2,11	4.402,1
1.2	0,78	1,27	1.598,3
1.3	0,11	0,17	29,8
1.4	0,02	0,04	1,6
1.5	0,68	1,12	1.240,7

Tabelle 3.19: Szenario 1: Femtozellen-Immission

Die nächsten beiden Tabellen dokumentieren die Immissionen, verursacht durch andere interne Quellen (WLAN/DECT), sowie durch die von außen einwirkenden Immissionen (Frequenzbereich 100 kHz - 3 GHz).

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach EU-Ratsempfehlung	Leistungsflussdichte S in µW/m²
1.1	0,12	0,20	37,6
1.2	0,12	0,19	35,6
1.3	0,11	0,18	33,5
1.4	0,71	1,17	1354,6
1.5	0,29	0,48	225,4

Tabelle 3.20: Szenario 1: Andere interne Immissionen (WLAN/DECT)

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach EU-Ratsempfehlung	Leistungsflussdichte S in µW/m²
1.1	0,05	0,09	6,1
1.2	0,04	0,08	4,9
1.3	0,08	0,15	16,1
1.4	0,08	0,17	18,4
1.5	0,07	0,14	11,6

Tabelle 3.21: Szenario 1: Von außen einwirkende Summenimmission (100 kHz - 3 GHz)

In folgendem Bild sind die Resultate aus den obigen 3 Tabellen visualisiert. An 4 Messpunkten dominiert grenzwertbezogen die Femtozellen-Immission im Vergleich zu den von außen einwirkenden Immissionen.

Der leistungsgemittelte grenzwertbezogene Unterschiedsfaktor zwischen Femtozellen-Immissionen und externen Immissionen beträgt 11,6 dB.

Der Immissionsvergleich zwischen Femtozelle und anderen internen Hochfrequenzquellen (WLAN/DECT) fällt differenzierter aus. Je nach Abstand zu den Emissionsquellen überwiegt entweder die Femtozellen- oder die WLAN/DECT-Immission. An den hier gemessenen 5 Punkten dominiert die Femtozellen-Immission gegenüber den sonstigen internen Immissionen an 3 Punkten, bzw. im Mittel um 2,9 dB. Zu beachten ist allerdings, dass dieses Ergebnis aufgrund der zu geringen Zahl an Messpunkten, die sich zudem auf die unmittelbare Nähe des Femtozellen-Accesspoints fokussieren, nicht als repräsentativ angesehen werden kann. Generell überwiegt jeweils die Immission der internen Hochfrequenzquelle, die die kürzeste Entfernung zum betrachteten Messpunkt hat.



Bild 3.37: Szenario 1: Vergleichende grafische Darstellung der gemessenen Immission

3.6.3 UMTS-Femtozellen in Telefonläden

Die Messungen wurden in 3 typischen Telefonläden in Bayreuth, Lauf (Landkreis Nürnberger Land) und Roding (Landkreis Cham) durchgeführt. Die Läden bestanden jeweils aus einem großen Verkaufsraum mit mehreren Arbeitsplätzen (Beratung, Kasse), sowie teilweise zusätzlich aus benachbarten Lager-, Sozial- oder Büroräumen. Der Femtozellen-Accesspoint war entweder an der Wand montiert (Szenario 2), in einem Schrank untergebracht (Szena-

rio 3) bzw. auf einem Schrank platziert. In den Läden wurden zusätzlich noch WLAN/DECT-Systeme betrieben.

Bei Szenario 3 und 4 waren keine externen Mobilfunkantennen in der unmittelbaren Nachbarschaft des Ladens auszumachen (BNetzA-Datenbank). In unmittelbarer Nachbarschaft, sowie auf den Dach des Gebäudes, in dem der Telefonladen von Szenario 2 untergebracht ist, waren Mobilfunkantennen vorhanden (siehe Bild 3.38).



Bild 3.38: Szenario 2: Mobilfunkantenne auf einem gegenüberliegenden Gebäude

Grobe Grundrisse der Geschäftsräume von Szenario 2 bis 4 mit den Messpunkten und dem Standort des Femtozellen- und der lokalisierten firmeneigenen WLAN/DECT-Systeme sind in den Bildern 3.38 bis 3.40 zu sehen.







Bild 3.40: Szenario 3: Immissionsmessung in einem Telefonladen (Roding)



Bild 3.41: Szenario 4: Immissionsmessung in einem Telefonladen (Lauf/Pegnitz)

Die Immissionsmessungen wurden wie in Abschnitt 2.6.2 beschrieben durchgeführt.

Nachfolgende Tabelle beschreibt die Lage der Messpunkte in den Telefonläden.

Punkt Nr.	Messort	Sicht (zum AP)	Horizontal- entfernung zum AP
2.1	Kasse	ja	ca. 2 m
2.2	Beratung 2	ja	ca. 6 m
2.3	Beratung 1	nein	ca. 7 m
2.4	Büro 1	nein	ca. 8 m
2.5	Büro 2	nein	ca. 10 m
3.1	Kasse	nein	ca. 1,5 m
3.2	Beratung 2	nein	ca. 5 m
3.3	Beratung 1	nein	ca. 6 m
3.4	nahe AP	ja	ca. 1 m
3.5	Eingang	nein	ca. 7 m
4.1	Computerarbeitsplatz	ja	ca. 6 m
4.2	Teeküche	ja	ca. 10 m
4.3	nahe AP	ja	ca. 1,5 m
4.4	Kasse	nein	ca. 2 m
4.5	Beratung	nein	ca. 10 m

Tabelle 3.22: Szenarien 2-4: Beschreibung der Messpunkte

In folgender Tabelle ist die Immission, verursacht durch den Femtozellen-Accesspoint für die 15 Punkte angegeben.

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach EU-Ratsempfehlung	Leistungsflussdichte S in µW/m²
2.1	0,91	1,50	2.206,3
2.2	0,57	0,93	858,3
2.3	0,19	0,31	92,0
2.4	0,05	0,08	5,9
2.5	0,02	0,04	1,4
3.1	1,02	1,68	2.777,5

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach EU-Ratsempfehlung	Leistungsflussdichte S in µW/m²
3.2	0,41	0,67	440,2
3.3	0,22	0,35	124,1
3.4	2,57	4,21	17.525,0
3.5	0,22	0,37	132,9
4.1	0,47	0,77	580,3
4.2	0,58	0,94	878,3
4.3	2,00	3,27	10.559,9
4.4	1,45	2,37	5.541,9
4.5	0,22	0,35	124,1

Tabelle 3.23: Szenarien 2-4: Femtozellen-Immission

Die nächsten beiden Tabellen dokumentieren die Immissionen, verursacht durch andere interne Quellen (WLAN/DECT), sowie durch die von außen einwirkenden Immissionen (Frequenzbereich 100 kHz - 3 GHz).

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach EU-Ratsempfehlung	Leistungsflussdichte S in μW/m²
2.1	0,51	0,83	681,8
2.2	0,13	0,21	43,0
2.3	0,06	0,09	8,6
2.4	0,02	0,04	1,5
2.5	0,02	0,04	1,4
3.1	0,76	1,25	1.544,6
3.2	0,32	0,52	264,5
3.3	0,34	0,57	315,3
3.4	3,31	5,43	29.084,0
3.5	0,21	0,35	121,8
4.1	0,43	0,70	489,5
4.2	0,17	0,27	72,9

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach EU-Ratsempfehlung	Leistungsflussdichte S in µW/m²
4.3	2,43	3,98	15.637,0
4.4	0,25	0,41	162,1
4.5	0,43	0,70	484,7

Tabelle 3.24: Szenarien 2-4: Andere interne Immissionen (WLAN/DECT)

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenz- wert nach EU-Ratsempfehlung	Leistungsflussdichte S in μW/m²
2.1	1,02	2,37	2.741,2
2.2	1,34	3,18	4.790,2
2.3	1,11	2,61	3.247,5
2.4	1,81	4,27	8.673,3
2.5	1,32	3,10	4.640,0
3.1	0,11	0,08	31,2
3.2	0,11	0,08	31,2
3.3	0,11	0,08	31,2
3.4	0,11	0,08	31,2
3.5	0,11	0,08	31,2
4.1	0,07	0,06	12,8
4.2	0,07	0,07	13,2
4.3	0,07	0,08	14,2
4.4	0,07	0,08	14,1
4.5	0,12	0,24	37,7

Tabelle 3.25: Szenarien 2-4: Von außen einwirkende Summenimmission (100 kHz - 3 GHz)

Aufgrund der vergleichsweise kleinen Abmessung des Verkaufsraums in Szenario 3 wurde die von außen einwirkende Immission repräsentativ für alle 5 Punkte an nur einem Punkt (Raummitte) gemessen.

In folgendem Bild sind die Resultate aus den obigen 3 Tabellen visualisiert.





Bei Szenario 3 und 4 dominiert an allen 10 Messpunkten grenzwertbezogen die Femtozellen-Immission im Vergleich zu den von außen einwirkenden Immissionen (Unterschiedsfaktor: 21,1 bzw. 21,9 dB). Bei Szenario 2 ist die Situation genau umgekehrt: Aufgrund der Tatsache, dass in unmittelbarer Umgebung des Telefonladens mehrere Mobilfunksendeanlagen betrieben werden, sind die von außen einwirkenden Hochfrequenzfelder deutlich stärker (im Mittel um 21,1 dB) als die Femtozellen-Immissionen.

Der Immissionsvergleich zwischen Femtozelle und anderen internen Hochfrequenzquellen (WLAN/DECT) fällt vergleichbar zu Szenario 1 aus. Je nach Anordnung der Emissionsquellen bzw. Abstand der Messpunkte zu den Emissionsquellen überwiegt entweder die Femtozellen- oder die WLAN/DECT-Immission. An 11 der hier gemessenen 15 Punkte in Telefonläden dominiert die Femtozellen-Immission gegenüber den sonstigen internen Immissionen. Im Mittel sind die Femtozellen-Immissionen um 3,5 dB größer als die sonstigen internen Hochfrequenzquelle, die die kürzeste Entfernung zum Messpunkt hat.

3.6.4 Zusammenfassung

Die vergleichenden Messungen wurden für 4 Szenarien durchgeführt, 3 Szenarien befanden sich in typischen Telefonläden, ein Szenario im Büroumfeld. In folgendem Bild sind die gefundenen Immissionswerte (Femtozelle, externe Quellen, interne Quellen) für alle 4 Szenarien zusammenfassend vergleichend gegenübergestellt. Tabelle 3.25 gibt zusätzlich einige Kennwerte der Messergebnisverteilungen wieder.

Kennwert	Femtozelle	externe Funksignale	DECT/WLAN (Intern)
Minimalimmission [% bzgl. E]	0,04	0,06	0,04
Maximalimmission [% bzgl. E]	4,21	4,27	5,43
Spannweite [dB]	40,4	37,0	42,7
Median [% bzgl. E]	0,85	0,09	0,45

Tabelle 3.26: Szenario 1-4: Vergleich der verschiedenen Emissionsquellen



Bild 3.43: Szenario 1-4: Gemessene Immissionen für die 3 verschiedenen Emissionsquellen

Der Spannweitenbereich ist für alle 3 Typen von Emissionsquellen nicht sehr unterschiedlich (ca. 37 bis 43 dB). Auch die Maximal- bzw. Minimalimmissionen liegen für alle 3 Emissionsquellen in etwa in vergleichbaren Größenordnungen. Absolut gesehen können die Immissionswerte je nach Messpunkt sehr unterschiedlich ausfallen. Betrachtet man die Mediane, so ist der Median der externen Signale deutlich am kleinsten. Allerdings liegt dies hauptsächlich daran, dass bei 3 der 4 Szenarien keine externen Sendeanlagen (z.B. Mobilfunksender) in der unmittelbaren Umgebung vorhanden waren, so dass sich sehr geringe externe Immissionswerte ergaben. Bei Szenario 2 hingegen dominierten die externen Immissionen, da in der Nachbarschaft mehrere Mobilfunkanlagen vorhanden waren. Der Median der Femtozellen-Immissionen fällt etwa um 5,5 dB größer aus als der Median der internen WLAN/DECT-Signale. Hier ist jedoch zu berücksichtigen, dass eine überdurchschnittliche Zahl an Messpunkten sehr nah am Femtozellen-AP lag. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Immissionen, verursacht durch aktuell verwendete Femtozellen-Accesspoints, typisch nicht signifikant höher ausfallen, als die von ebenfalls im Gebäude betriebenen WLAN/DECT-Systemen. Letztlich hängt es vom Abstand der jeweiligen Geräte zum Messpunkt ab, ob die Femtozellenimmission oder die Signale der sonstigen internen Quellen dominieren. Diese Tatsache ist nicht besonders verwunderlich, denn die an den untersuchten Szenarien betriebenen Femtozellen-Accesspionts besitzen mit einer Leistung von 0,1 Watt etwa die gleiche Maximalleistung, wie es in der Summe auch die vorhandenen WLAN- und DECT-Basisstationen besitzen.

Auch der Vergleich mit externen Quellen ergibt ein differenziertes Bild. Sind in der näheren Umgebung des Gebäudes, in dem die Femtozelle betrieben wird, keine externen Sendeanlagen (z.B. Mobilfunksender) vorhanden, dominieren im Gebäude mit großer Wahrscheinlichkeit die Immissionen der Femtozelle (Szenario 3 und 4, sowie teilweise auch Szenario 1). Sind aber im Umfeld z.B. Mobilfunksender vorhanden kann sich die Immissionssituation auch umkehren (siehe Szenario 2).

3.7 Exposition durch LTE-Endgeräte

3.7.1 Vorgehensweise

Zur Beurteilung der Exposition bei körpernahen bzw. Körperkontakt-Betriebsbedingungen wurden SAR-Messungen an 2 LTE-Endgeräten durchgeführt, die derzeit in operativen LTE-Netzen eingesetzt werden. Es handelt sich hierbei um folgende Geräte:

- LTE Router "Speedport LTE", Huawei, Modell B390s-2
- LTE-Surfstick "Speedstick LTE", Huawei, Modell E398

Ungeachtet der Tatsache, dass der LTE-Router üblicherweise im Abstand von mindestens einigen Zentimetern vom Körper betrieben wird, wurden die Messungen in unmittelbarem Körperkontakt durchgeführt. Natürlich sind bei dieser Vorgehensweise höhere Werte als in einigen Zentimetern Abstand zu erwarten; trotzdem geben sie einen guten Eindruck über die maximal zu erwartende Exposition. Der LTE-Surfstick wurde in einem Abstand von 25 mm zur Gehäuseoberfläche vermessen; dieser Mindestabstand ist in der Bedienungsanleitung des Gerätes angegeben. Hierbei ist aber anzumerken, dass unter ungünstigen Betriebsbedingungen in der Praxis auch kleinere Abstände zum Nutzer vorhersehbar sind.

Für die Durchführung von SAR-Messungen wurde die Norm EN 62209-2 angewendet [EN 62209-2]. Bild 3.44 zeigt den Messaufbau mit Phantom sowie das für die Messungen eingesetzte SAR-Messsystem DASY4 (SPEAG).



Bild 3.44: Phantom und DASY4 für SAR-Messungen an LTE-Endgeräten

Als Messsonde im DASY4 wurde eine E-Feld Sonde des Typs EX3DV4 verwendet, die vom Hersteller mit einer Mindestempfindlichkeit von 10 μ W/g (entsprechend 0,01 W/kg) spezifiziert ist.

Die Ansteuerung der Endgeräte in den Dauersendezustand mit maximaler, konstanter Sendeleistung (23 dBm) wurde mit einem LTE-Basisstationssimulator Anritsu MT8820C realisiert.

Die SAR-Messung erfolgte für beide Endgeräte in jeweils 5 unterschiedlichen Gerätepositionen, die in den Bildern 3.45 und 3.46 dokumentiert sind. Der LTE-Router wurde als "stand alone" Gerät betrieben; der LTE-Surfstick wurde über ein USB-Kabel an ein Notebook angeschlossen.



Bild 3.45: Positionierung des LTE-Routers für die SAR-Messungen am Phantom: Übersichtsschema (oben), Position 1 (links unten) und Position 4 (rechts unten)



Bild 3.46: Positionierung des LTE-Surfsticks für die SAR-Messungen am Phantom: Übersichtsschema (oben), Position 1 (links unten) und Position 2 (rechts unten)

Da die EN 62209-2 keine LTE-spezifischen Messanweisungen enthält, wurden die Messungen an die KDB 941225D05 "SAR Test Considerations for LTE Handsets and Data Modems", v01, 15.12.2010 angelehnt. KDBs (Knowledge Database) entstammen der amerikanischen FCC-Zulassungswelt und erweitern die Regelungen des "Supplement C (Edition 01-01)" des "OET Bulletin 65 (Edition 97-01)". Diese KDB stellt quasi eine Verfahrensanweisung dar, wie bei den SAR-Messungen an LTE-Endgeräten vorzugehen ist. Als ersten Schritt schreiben sie Leistungsmessungen am Endgerät bei verschiedenen Kombinationen von Bandbreiten, Kanälen, Resource Block (RB) Belegungen und Modulationen vor. Die SAR ist dann bei der maximalen Bandbreite in den Modulationen QPSK und 16-QAM bei 50 % RB-Belegung (symmetrisch um die Kanalmitte) sowie 1 RB-Belegung (am untersten und obersten Ende des Kanals) durchzuführen. In Abhängigkeit von den hierbei erzielten SAR-Werten (d.h. wenn der SAR-Wert größer als 50 % des Grenzwertes ist) sind die Messungen mit 100 % RB-Belegung auch am untersten und obersten Ende des Frequenzbandes zu wiederholen. In Abhängigkeit von den Ergebnissen der Leistungsmessungen können auch zusätzliche SAR-Messungen bei anderen Kombinationen von Bandbreiten, Kanälen, RB-Belegungen und Modulationen erforderlich sein. Maßgeblich ist der maximale über alle SAR-Messungen ermittelte SAR-Wert; dieser wird für die beiden untersuchten Geräte im nächsten Abschnitt dokumentiert.

3.7.2 Messergebnisse

In den Bildern 3.47-3.50 sind die Ergebnisse der SAR-Messungen exemplarisch dargestellt. Gezeigt sind hier nur die jeweiligen Messpositionen, bei denen sich der maximale, normgerecht über 10 g gemittelte SAR-Wert bei LTE ergeben hat.







Bild 3.49: SAR-Messergebnisse LTE-Surfstick, LTE-1800, Position 2





In den folgenden Tabellen sind die Messwerte bei allen Gerätepositionen absolut und grenzwertbezogen dargestellt.

LTE-Router, LTE-800					
Position	gemessene SAR 10 g	Grenzwert	Grenzwertausschöpfung		
1	0,465 W/kg	2 W/kg	23,3 %		
2	0,169 W/kg	2 W/kg	8,5 %		
3	0,142 W/kg	2 W/kg	7,1 %		
4	0,750 W/kg	2 W/kg	37,5 %		
5	0,634 W/kg	2 W/kg	31,7 %		

Tabelle 3.27: Über 10 g gemittelte SAR-Werte für LTE, LTE-Router, 0 mm Abstand zum Phantom

LTE-Surfstick, LTE-800					
Position	gemessene SAR 10 g	Grenzwert	Grenzwertausschöpfung		
1	0,164 W/kg	2 W/kg	8,2 %		
2	0,106 W/kg	2 W/kg	5,3 %		
3	0,088 W/kg	2 W/kg	4,4 %		
4	0,069 W/kg	2 W/kg	3,5 %		
5	0,010 W/kg	2 W/kg	0,5 %		
LTE-Surfstick, LTE-1800					
Position	gemessene SAR 10 g	Grenzwert	Grenzwertausschöpfung		
1	0,165 W/kg	2 W/kg	8,3 %		
2	0,283 W/kg	2 W/kg	14,2 %		
3	0,167 W/kg	2 W/kg	8,4 %		
4	0,117 W/kg	2 W/kg	5,9 %		
5	0,023 W/kg	2 W/kg	1,2 %		
LTE-Surfstick, LTE-2600					
Position	gemessene SAR 10 g	Grenzwert	Grenzwertausschöpfung		
1	0,123 W/kg	2 W/kg	6,2 %		
2	0,076 W/kg	2 W/kg	3,8 %		
3	0,060 W/kg	2 W/kg	3,0 %		
4	0,069 W/kg	2 W/kg	3,5 %		
5	0,017 W/kg	2 W/kg	0,9 %		

Tabelle 3.28:Über 10 g gemittelte SAR-Werte für LTE, LTE-Surfstick,
25 mm Abstand zum Phantom

Im Unterschied zum LTE-Router, der als einzigen Mobilfunkdienst LTE-800 implementiert hat, kann der LTE-Surfstick neben 3 LTE-Bändern (LTE-800, LTE-1800 und LTE-2600) auch mit den Mobilfunkdiensten GSM-900 (GPRS-900), GSM-1800 (GPRS-1800) und UMTS (WCDMA I FDD) betrieben werden. Die bei diesen Funkdiensten resultierenden SAR-Werte wurden ebenfalls gemessen und sind in nachfolgender Tabelle dokumentiert.

LTE-Surfstick, GPRS-900 (Class 12/4TX)					
Position	gemessene SAR 10 g	Grenzwert	Grenzwertausschöpfung		
1	0,128 W/kg	2 W/kg	6,4 %		
2	0,134 W/kg	2 W/kg	6,7 %		
3	0,096 W/kg	2 W/kg	4,8 %		
4	0,117 W/kg	2 W/kg	5,9 %		
5	0,023 W/kg	2 W/kg	1,2%		
LTE-Surfstick, GPRS-1800 (Class 12/4TX)					
Position	gemessene SAR 10 g	Grenzwert	Grenzwertausschöpfung		
1	0,174 W/kg	2 W/kg	8,7 %		
2	0,233 W/kg	2 W/kg	11,7 %		
3	0,176 W/kg	2 W/kg	8,8 %		
4	0,113 W/kg	2 W/kg	5,7 %		
5	0,024 W/kg	2 W/kg	1,2 %		
LTE-Surfstick, WCDMA I (FDD)					
Position	gemessene SAR 10 g	Grenzwert	Grenzwertausschöpfung		
1	0,233 W/kg	2 W/kg	11,7 %		
2	0,272 W/kg	2 W/kg	13,6 %		
3	0,168 W/kg	2 W/kg	8,4 %		
4	0,214 W/kg	2 W/kg	10,7 %		
5	0,024 W/kg	2 W/kg	1,2 %		

Tabelle 3.29:Über 10 g gemittelte SAR-Werte für GPRS-900, GPRS-1800 und WCDMA I (FDD),
LTE-Surfstick, 25 mm Abstand zum Phantom

Fazit:

Die SAR-Grenzwerte werden für alle gemessenen Positionen und Funkdienste sowohl für den Router (direkter Kontakt), als auch für den Surfstick (25 mm Abstand zum Körper) eingehalten. Die höchste gemessene LTE-Exposition für den Router beträgt 37,5 % bezüglich des SAR-Grenzwertes; andere Expositionen können bei Verwendung von WLAN auftreten (in diesem Vorhaben nicht gemessen). Beim Surfstick werden maximal 14,2 % erreicht. Der maximal gemessene SAR-Wert der Funkdienste GSM-900, GSM-1800 und UMTS beträgt beim Surfstick 13,6 % des SAR-Grenzwertes.Zahlenmäßige Herstellerangaben zur SAR liegen für beide Geräte nicht vor, so dass kein Vergleich der hier erhobenen Daten mit Herstellerdaten möglich ist.

4 Bestimmung und Analyse von TETRA BOS-Immissionen

4.1 Messergebnisse in 5 verschiedenen Szenarien

In vorliegendem Kapitel werden die Ergebnisse umfangreicher Messungen an verschiedenen TETRA BOS-Stationen vorgestellt. Bei den untersuchten Anlagenkonfigurationen wurde Wert auf möglichst unterschiedliche Szenarien gelegt: Die Messungen erfolgten an insgesamt 5 unterschiedlichen, für TETRA BOS-Netze typischen Anlagenkonfigurationen, davon 2 im städtischen und 3 im ländlichen Umfeld. Die untersuchten Szenarien sind:

- 1. Anlage auf einem Mast im städtischen Umfeld
- 2. Anlage auf einem Gebäudedach im städtischen Umfeld
- 3. Anlage auf einem Schlauchturm im ländlichen Umfeld
- 4. Anlage auf einem Wasserturm im ländlichen Umfeld
- 5. Anlage auf einem freistehenden Mast im ländlichen Umfeld

In jedem Szenario wurden mehrere unterschiedliche Messungen vorgenommen, die nachfolgend beschrieben sind:

Systematische Messungen

Bei den systematischen Messungen erfolgte die Auswahl der Messpunkte nach systematischen Gesichtspunkten, d.h. die Messpunkte weisen verschiedene Abstände, Orientierungen, Höhenunterschiede, Sichtverbindungen usw. zur Sendeanlage auf. Anhand von Immissionsmessungen entlang einer Linie oder in verschiedenen Stockwerken eines Gebäudes wird es möglich, die grundsätzliche Entfernungs- bzw. Höhenabhängigkeit der Immission analysieren zu können. Durch diesen systematischen Ansatz wird in gewissen Grenzen eine Übertragbarkeit der ermittelten Immissionen auf ähnliche Szenarien ermöglicht.

Als Messverfahren wurden das spektrale Messverfahren mit Schwenkmethode und Hochrechnung auf die höchste betriebliche Anlagenauslastung angewendet [BOR 12]. Alle Messwerte werden als
- Elektrische Feldstärke in V/m,
- Elektrische Feldstärke in % vom Grenzwert der 26. BlmSchV und
- Elektrische Leistungsflussdichte in µW/m²

für den maximalen Betriebszustand der Anlage angegeben.

Bei der Auswahl der zu untersuchenden Anlagen wurden solche bevorzugt, bei denen *am selben Standort* zusätzlich zum TETRA BOS-System auch GSM- und/oder UMTS-Systeme installiert waren. Dadurch ist es möglich, die TETRA BOS-Immissionssituation mit der GSM/UMTS-Immissionssituation *der identischen Anlage* zu vergleichen. Mit der Schwenkmethode wurden die GSM-Immissionen spektral und die UMTS-Immissionen codeselektiv mit gemessen und mit dem in [BOR 07] beschriebenen Verfahren auf maximale Anlagenaus-lastung hochgerechnet.

Messung an statistisch verteilten Messpunkten

Zusätzlich zu den Messungen an solchen Punkten, die aus systematischen Gesichtspunkten ausgewählt wurden, erfolgten auch Messungen der TETRA BOS-Immission an statistisch verteilten Messpunkten. Diese Messpunkte wurden wie folgt ausgewählt: Um die Anlage wurde ein rechteckiger Bereich definiert, der im städtischen Bereich ein Quadrat mit einer Kantenlänge von 800 m ist. Im ländlichen Bereich wurde durch ein Rechteck die gesamte Ortschaft zusammenhängend umschlossen. Innerhalb dieses definierten Bereiches wurden mit einem Zufallszahlengenerator x-y-Wertepaare ausgewürfelt. Ein Messpunkt (Wertepaar) wurde für die Messung zugelassen, wenn er allgemein zugänglich war und sich in bebautem Gebiet befand. Traf eine von beiden Bedingungen nicht zu, wurde ein alternativer Messpunkt ausgewürfelt.

An allen statistischen Messpunkten wurden neben den TETRA BOS-Immissionen auch die Immissionen durch am selben Standort vorhandene GSM-/UMTS-Mobilfunkdienste mitgemessen. Als Messverfahren wurde die Schwenkmethode mit Hochrechnung auf die maximale Anlagenauslastung angewendet.

An einem Teil der statistisch verteilten Messpunkte wurde darüber hinaus auch die Immission durch relevante ortsfeste Funkdienste im Frequenzbereich 100 kHz bis 3 GHz frequenzselektiv erfasst. In diesem Frequenzbereich sind die wichtigsten Immissionen durch hochfrequente Sendeanlagen enthalten. Als Messverfahren wurde die Schwenkmethode mit Hochrechnung auf die maximale Anlagenauslastung angewendet, wobei die Extrapolation der GSM-Immissionen von anderen als dem primär untersuchten TETRA BOS-Standort anhand von typischen Kanalzahlen erfolgte. Bei UMTS wurde von einem Leistungsanteil des CPICH von 10 % der Gesamtleistung ausgegangen. LTE wurde spektral gemessen und mittels des Verhältnisses zwischen Messbandbreite und Signalbandbreite auf maximale Anlagenauslastung extrapoliert.

Momentanwertimmission

An je einem Messpunkt pro Szenario wurde zusätzlich zur örtlich (Schwenkmethode mit Aufzeichnung des Maximalwerts im durchschwenkten Volumen) und zeitlich (Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung) maximierten Immission auch der örtlich gemittelte Momentanwert der TETRA BOS-Immission ermittelt.

Für die örtliche Mittelung wurde das 3-Punkte-Raster aus der Norm EN 50492 [EN 50492] verwendet, d.h. 3 in den Höhen 1,1 m, 1,5 m und 1,7 m in einer vertikalen Linie über dem Boden angeordnete Messpunkte. Die Immission wird leistungsbezogen über diese 3 Messpunkte gemittelt, wodurch die Immission quasi einen "räumlich gemittelten Wert über den gesamten Körper des exponierten Individuums" zum Vergleich mit den Referenzwerten nach ICNIRP [ICNIRP 98] darstellt. Für die Messung an den 3 Punkten wurde eine isotrope Sonde verwendet.

Bezüglich der zeitlichen Mittelung wurde die üblicherweise bei der Schwenkmethode verwendete "Maxhold"-Funktion des Messgerätes deaktiviert und stattdessen eine Mittelung über mehrere Messdurchläufe angewendet.

Die so gemessene örtlich und zeitlich gemittelte TETRA BOS-Immission wird mit der örtlich und zeitlich maximierten TETRA BOS-Immission am selben Messpunkt verglichen.

Dosimetermessungen

In 2 der 5 Szenarien wurden während der Messungen an den statistischen Messpunkten auch Dosimeter mitgeführt und mit diesen frequenzselektive Messungen über eine Zeitspanne von etwa 2 Stunden vorgenommen. Die verwendeten Dosimeter vom Typ Antennessa EME Spy 120 wurden vom Bundesamt für Strahlenschutz zur Verfügung gestellt und sind bereits im Zwischenbericht zu vorliegendem Projekt [BOR 12] erfolgreich auf ihre prinzipielle Eignung zur Messung von TETRA BOS-Immissionen hin überprüft worden.

Summenimmission und Grenzwertvergleich

Die Ermittlung der Summenimmission und ihrer grenzwertbezogenen Ausschöpfung erfolgt wie in Abschnitt 3.1 für LTE beschrieben. Obwohl streng genommen für TETRA BOS-Anlagen nicht die 26. BlmSchV Anwendung findet, sondern die Verordnung über das Nachweisverfahren zur Begrenzung elektromagnetischer Felder [BEMFV], werden konform zum Kapitel 3 alle grenzwertbezogenen Immissionen bezogen auf die 26. BlmSchV angegeben. Dies ist deswegen gerechtfertigt, da die BEMFV bezüglich der Grenzwerte auf die 26. BlmSchV verweist. Der elektrische Feldstärke-Grenzwert für die Immissionen durch TETRA BOS-Basisstationen beträgt 27,5 V/m.

4.1.1 Anlage auf einem Mast im städtischen Umfeld

Die Messungen zum Szenario "Anlage auf einem Mast im städtischen Umfeld" wurden an einer Anlage in einer Großstadt des Ruhrgebietes durchgeführt. Die zweisektorige TETRA BOS-Anlage ist auf 41 m Höhe auf einem Mast installiert. Auf demselben Mast sind zwischen 33 und 38 m je ein dreisektoriges GSM-900- und UMTS-Mobilfunksystem von Betreiber A und ein UMTS-System von Betreiber C in Betrieb.

Die nähere Umgebung des Standortes, die horizontale Ausrichtung der TETRA BOS-Sendeantennen, sowie die Lage der systematischen Messpunkte sind in folgendem Bild dargestellt.



Bild 4.1a: Szenario 1: Lageplan mit Anlagenstandort, Ausrichtung der TETRA BOS-Sendeantennen und Verteilung der systematische Messpunkte

Für dieses Szenario wurden systematische Messungen an 10 Außen-Messpunkten mit und ohne Sicht bei verschiedenen Orientierungen und Entfernungen zur Anlage durchgeführt. Die Messpunkte wurden in einer Linie angeordnet, um die Entfernungsabhängigkeit der Immission untersuchen zu können. Der Messpunkt 1.8_SY befindet sich in gleicher Entfernung wie der Messpunkt 1.7_SY, hat jedoch keine Sicht auf die Anlage (gegenüberliegende Straßenseite, Sicht durch Bäume verdeckt). Hierdurch ist es möglich, den Einfluss der Sichtverhältnisse bei ansonsten gleicher Entfernung und Ausrichtung zur Anlage zu untersuchen. Nachfolgende Tabelle beschreibt die Lage der systematischen Messpunkte.

Punkt Nr.	Messort	Sicht (zu TETRA)	Horizontal- entfernung zur TETRA-Anlage
1.1_SY	Linienmessung	ja	391 m
1.2_SY	Linienmessung	ja	356 m
1.3_SY	Linienmessung	ja	315 m
1.4_SY	Linienmessung	ja	278 m
1.5_SY	Linienmessung	ja	246 m
1.6_SY	Linienmessung	ja	209 m
1.7_SY	Linienmessung	ja	138 m
1.8_SY	Linienmessung	Bäume	138 m
1.9_SY	Linienmessung	ja	81 m
1.10_SY	direkt unter der Anlage	ја	6 m

Tabelle 4.1a: Szenario 1: Beschreibung der systematischen Messpunkte

In folgender Tabelle ist zunächst nur die TETRA BOS-Immission für die 10 Punkte angegeben. Die Summenimmission aus GSM- und UMTS-Signalen vom selben Standort wird anschließend in einer zweiten Tabelle dargestellt.

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
1.1_SY	0,36	1,29	334,4
1.2_SY	0,41	1,48	440,8
1.3_SY	0,68	2,46	1.214,0
1.4_SY	0,84	3,06	1.880,3
1.5_SY	0,80	2,92	1.714,9
1.6_SY	1,27	4,63	4.307,6
1.7_SY	1,07	3,90	3.049,5
1.8_SY	0,58	2,12	900,0
1.9_SY	0,94	3,44	2.367,2
1.10_SY	0,23	0,85	146,0

Tabelle 4.1b: Szenario 1, systematische MP: TETRA BOS-Immission

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
1.1_SY	1,09	1,89	3.154,0
1.2_SY	0,80	1,44	1.714,6
1.3_SY	1,17	2,12	3.653,6
1.4_SY	1,91	3,53	9.681,0
1.5_SY	1,91	3,82	9.668,3
1.6_SY	1,63	3,37	7.049,1
1.7_SY	1,28	2,95	4.320,7
1.8_SY	0,53	1,23	744,1
1.9_SY	0,72	1,43	1.365,3
1.10_SY	0,55	1,19	804,4

Tabelle 4.1c: Szenario 1, systematische MP: Summenimmission GSM + UMTS

In folgendem Bild sind die Resultate aus den obigen beiden Tabellen visualisiert. An 6 der 10 Messpunkte dominieren grenzwertbezogen die TETRA BOS-Immissionen im Vergleich zu den GSM-/UMTS-Immissionen. Absolut gesehen sind die TETRA BOS-Immissionen an 2 der 10 Messpunkte größer als die GSM-/UMTS-Immissionen. Der leistungsgemittelte grenzwertbezogene Unterschiedsfaktor zwischen TETRA BOS-Immissionen und GSM-/UMTS-Immissionen beträgt ca. 0,9 dB.





In Bild 4.1c sind speziell die Ergebnisse der Messungen zur Untersuchung der Entfernungsabhängigkeit dargestellt. Hierbei wurden nur die Messpunkte mit direkter Sicht zur Anlage aufgenommen. Die TETRA BOS-Immissionen werden dabei mit den GSM-900 und UMTS-Immissionen des Mobilfunk-Betreibers A verglichen; die UMTS-Immissionen des Betreibers C bleiben unberücksichtigt. Ähnlich wie bei GSM und UMTS werden auch bei TETRA BOS die höchsten Immissionen nicht in direkter Nähe der Anlage erreicht, sondern hier in einem Abstandsbereich um etwa 200 m.



Bild 4.1c: Szenario 1, systematische MP: Abstandsabhängigkeit der Messpunkte mit freier Sicht auf die Anlage, nur TETRA BOS und Mobilfunk-Betreiber A

Am Messpunktepaar 1.7_SY sowie 1.8_SY kann der Einfluss der Sichtbedingungen vom Messpunkt zur Anlage bewertet werden. Aus einem Vergleich der Messwerte lässt sich ableiten, dass der Messpunkt ohne Sicht (Dämpfung durch Bäume) bei TETRA BOS eine um etwa 5 dB kleinere Immission aufweist als ein Messpunkt vergleichbarer Entfernung mit Sicht. Bei Dämpfung durch Gebäude sind höhere Dämpfungswerte zu erwarten.

Zusätzlich zu den systematischen Messpunkten wurden 10 statistische Messpunkte ausgewürfelt. An den ersten 5 dieser Messpunkte wurden neben den TETRA BOS-Immissionen auch sämtliche Immissionen im Frequenzbereich 100 kHz bis 3 GHz erfasst, bei den restlichen 5 nur die GSM- und UMTS-Immissionen von derselben Anlage. Nachfolgendes Bild sowie Tabelle 4.1d beschreiben die Lage der statistischen Messpunkte.



Bild 4.1d: Szenario 1: Lageplan mit Anlagenstandort, Ausrichtung der TETRA BOS-Sendeantennen und Verteilung der statistischen Messpunkte

Punkt Nr.	Messort	Sicht (zu TETRA)	Horizontal- entfernung zur TETRA-Anlage
1.1_ST	statistischer Messpunkt	ja	110 m
1.2_ST	statistischer Messpunkt	nein	245 m
1.3_ST	statistischer Messpunkt	Bäume	240 m
1.4_ST	statistischer Messpunkt	nein	175 m
1.5_ST	statistischer Messpunkt	ja	130 m
1.6_ST	statistischer Messpunkt	ja	140 m
1.7_ST	statistischer Messpunkt	ja	150 m
1.8_ST	statistischer Messpunkt	Bäume	350 m
1.9_ST	statistischer Messpunkt	nein	300 m
1.10_ST	statistischer Messpunkt	ја	55 m

Tabelle 4.1d: Szenario 1: Beschreibung der statistischen Messpunkte

In folgender Tabelle ist zunächst nur die TETRA BOS-Immission für die 10 Punkte angegeben. Anschließend werden die GSM- und UMTS-Mobilfunkimmissionen (hier sind bei den ersten 5 MP alle berücksichtigt und bei den letzten 5 nur diejenigen des TETRA BOS-Standorts) sowie die Gesamtimmissionen im Frequenzbereich 100 kHz bis 3 GHz (mit TETRA BOS) dargestellt.

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
1.1_ST	1,11	4,04	3.267,6
1.2_ST	0,10	0,37	27,1
1.3_ST	0,12	0,44	39,0
1.4_ST	0,05	0,19	7,5
1.5_ST	0,15	0,54	58,9
1.6_ST	0,50	1,80	652,0
1.7_ST	1,26	4,59	4.229,0
1.8_ST	0,40	1,45	419,0
1.9_ST	0,05	0,17	5,9
1.10_ST	0,51	1,85	685,9

Tabelle 4.1e: Szenario 1, statistische MP: TETRA BOS-Immission

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
1.1_ST	0,46	1,02	554,7
1.2_ST	0,20	0,45	102,3
1.3_ST	0,72	1,45	1.370,4
1.4_ST	0,39	0,83	407,2
1.5_ST	0,60	1,35	953,6
1.6_ST	0,72	1,64	1.365,6
1.7_ST	1,20	2,76	3.806,6
1.8_ST	0,44	0,84	511,6
1.9_ST	0,06	0,12	8,3
1.10_ST	0,49	1,02	628,7

Tabelle 4.1f:Szenario 1, statistische MP: GSM- und UMTS-Immission (bei den ersten 5 MP wurden
alle berücksichtigt und bei den letzten 5 MP nur die des TETRA BOS-Standortes)

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
1.1_ST	1,20	4,16	3.826,0
1.2_ST	0,22	0,58	130,4
1.3_ST	0,73	1,52	1.410,9
1.4_ST	0,40	0,85	416,1
1.5_ST	0,62	1,46	1.017,7

Tabelle 4.1g: Szenario 1, statistische MP: Gesamtimmission im Bereich 100 kHz – 3 GHz (mit TETRA BOS)





An 6 der 10 statistischen Messpunkte dominiert der Anteil der TETRA BOS-Anlage gegenüber GSM/UMTS.

Abschließend sind die Ergebnisse der Momentanwertmessung dargestellt. Der Unterschied zwischen örtlich und zeitlich maximierter TETRA BOS-Immission und örtlich und zeitlich gemittelter TETRA BOS-Immission entspricht feldstärkebezogen einem Faktor 3. Es ist zu berücksichtigen, dass abweichend vom sonstigen Vorgehen bei der zeitlichen Maximierung der örtlich und zeitlich maximierten Exposition nur die Kanalzahl, jedoch nicht der Unter-

schied zwischen aktueller und beantragter Sendeleistung berücksichtigt wurde, da dieser auch nicht in eine Bewertung der Momentanimmission einging.

Messpunktbeschreibung					
	Messpunkt in der Nähe	der TETRA BOS-Anlage			
Horizontalabstand zur Anlage Sichtverhältnisse					
152 m keine Sicht					
örtlich und zeitlich maximierte Immission (max. Anlagenauslastung)					
	0,35	V/m			
örtlich u	und zeitlich gemittelte In	nmission (Momentanimn	nission)		
1,1 m Höhe 1,5 m Höhe 1,7 m Höhe Mittelwert					
0,168 V/m	0,108 V/m	0,077 V/m	0,12 V/m		

Tabelle 4.1h:Szenario 1: Unterschied zwischen der örtlich und zeitlich gemittelten und der örtlich
und zeitlich maximierten TETRA BOS-Immission. Bei der zeitlichen Maximierung wur-
de der Unterschied zwischen aktueller und beantragter Sendeleistung nicht berück-
sichtig.

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Langzeitmessungen mit dem Dosimeter dargestellt. Das Dosimeter wurde während der Messungen der statistisch verteilten Messpunkte in einem Rucksack getragen. Es sind 2 Zeitverläufe (9:20 Uhr bis 11:45 Uhr und 12:15 Uhr bis 13:30 Uhr) dokumentiert. Neben TETRA BOS sind in Übereinstimmung mit den anderen Bildern dieses Abschnitts auch die Immissionen durch GSM-900- und UMTS-Basisstationen dargestellt. Die Messempfindlichkeit der Dosimeter ist auf 0,05 V/m begrenzt; kleinere Werte werden als 0,05 V/m (bzw. als waagerechte Linie) angezeigt.

In den grafischen Auswertungen der Dosimetermessungen spielt die Immission durch TETRA BOS gegenüber GSM-900 und UMTS eine eher untergeordnete Rolle. Diese im scheinbaren Widerspruch zu den Auswertungen an den systematischen und statistischen Messpunkten stehende Aussage ist dadurch begründet, dass die systematischen und statistischen Messpunkte mit der Kanalzahl sowie einem Faktor zur Berücksichtigung des Unterschieds zwischen beantragter und aktueller Sendeleistung hochgerechnet wurden, wohingegen die Dosimetermessung den Augenblickszustand repräsentiert. Im vorliegenden Fall war der Hochrechnungsfaktor von TETRA BOS wesentlich größer als bei den GSM- und UMTS-Funkdiensten. Die Ergebnisse der Dosimetermessungen liegen jedoch in derselben Größenordnung wie die in Tabelle 4.1h dokumentierten Ergebnisse der örtlich und zeitlich gemittelten Immission.



Bild 4.1f: Szenario 1, Dosimetermessung zwischen 09:20 Uhr und 11:45 Uhr



Bild 4.1g: Szenario 1, Dosimetermessung zwischen 12:15 Uhr und 13:30 Uhr

4.1.2 Anlage auf einem Gebäudedach im städtischen Umfeld

Die Messungen zum Szenario "Anlage auf einem Gebäudedach im städtischen Umfeld" wurden an einer Anlage in einer Großstadt des Ruhrgebietes durchgeführt. Die omnidirektional strahlende TETRA BOS-Anlage ist auf etwa 29 m Höhe auf dem Dach eines Gebäudes installiert. Auf demselben Träger sind keine weiteren Mobilfunkanlagen in Betrieb.

Die nähere Umgebung des Standortes, die horizontale Ausrichtung der Sendeantennen, sowie die Lage der systematischen und statistischen Messpunkte sind in folgendem Bild dargestellt.



Bild 4.2a: Szenario 2: Lageplan mit Anlagenstandort und Messpunktverteilung

Für dieses Szenario wurden systematische Messungen an 9 Innen- und einem Außen-Messpunkt durchgeführt. Die Innenmesspunkte wurden dabei in verschiedenen Geschosshöhen desjenigen Gebäudes gewählt, auf dem die Anlage installiert ist. Hierdurch ist es möglich, den Verlauf der Immission über der Geschosshöhe zu untersuchen. Dabei wurden die Stockwerke in 2 verschiedenen vertikalen Linien durchlaufen: Eine Linie (Linie 1) befindet sich direkt in einer Flucht mit der Anlage, wohingegen sich die zweite Linie (Linie 2) in einem benachbarten Gebäudeflügel befindet, von dem vom obersten Messpunkt sogar Sicht auf die Anlage bestand. Nachfolgende Tabelle beschreibt die Lage der systematischen Messpunkte.

Punkt Nr.	Messort	Sicht (zu TETRA)	Horizontal- entfernung zur TETRA-Anlage
2.1_SY	Höhenmessung, 5. OG, Linie 1	nein	unter Anlage
2.2_SY	Höhenmessung, 5. OG, Linie 2	ja	60 m
2.3_SY	Höhenmessung, 4. OG, Linie 1	nein	unter Anlage
2.4_SY	Höhenmessung, 4. OG, Linie 2	nein	60 m
2.5_SY	Höhenmessung, 3. OG, Linie 1	nein	unter Anlage
2.6_SY	Höhenmessung, 3. OG, Linie 2	nein	60 m
2.7_SY	Höhenmessung, 2. OG, Linie 1	nein	unter Anlage
2.8_SY	Höhenmessung, 2. OG, Linie 2	nein	60 m
2.9_SY	Höhenmessung, 1. OG, Linie 1	nein	unter Anlage
2.10_SY	Höhenmessung, vor dem Gebäude, Flucht mit Linie 1	nein	unter Anlage

Tabelle 4.2a: Szenario 2: Beschreibung der systematischen Messpunkte

In folgender Tabelle ist die TE	ETRA BOS-Immission für die	10 Punkte angegeben.

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
2.1_SY	0,02	0,07	0,9
2.2_SY	1,00	3,65	2672,2
2.3_SY	0,01	0,04	0,3
2.4_SY	0,41	1,49	443,5
2.5_SY	0,01	0,05	0,5
2.6_SY	0,53	1,92	736,0
2.7_SY	0,01	0,04	0,4
2.8_SY	0,37	1,34	360,5
2.9_SY	0,01	0,04	0,3
2.10_SY	0,12	0,44	39,5

Tabelle 4.2b: Szenario 2, systematische MP: TETRA BOS-Immission

In folgendem Bild sind die Resultate aus der Tabelle visualisiert. Im Unterschied zu den anderen Szenarien werden hier nur die TETRA BOS-Immissionen angegeben, da an der Anlage keine anderen Mobilfunkdienste installiert waren.





Im Bild 4.2c sind speziell die Ergebnisse der Messungen zur Untersuchung des Dämpfungsverlaufs für beide vertikalen Linien visualisiert.



Bild 4.2c: Szenario 2, systematische MP: Dämpfungsverlauf der Messpunkte in Abhängigkeit der Geschosshöhe, Linien 1 und 2

Linie 2 weist gegenüber Linie 1 deutlich höhere Immissionen auf, da sie nicht direkt unter der Anlage, sondern schräg dazu (der oberste Messpunkt hat Sichtverbindung zur Anlage) verläuft. Die theoretisch aufgrund der steigenden Deckendämpfung zu erwartende Immissionsabnahme hin zu tieferen Stockwerken ist bei Linie 2 im 3. OG gestört; Grund hierfür kann z.B. eine Reflexion an einem gegenüberliegenden Gebäude sein. Das Ansteigen der Immission am Messpunkt auf Erdbodenniveau von Linie 1 ist darauf zurückzuführen, dass sich dieser Messpunkt außerhalb des Gebäudes befindet und einen Teil seiner Immission durch Beugung und Reflexion erhält.

Zusätzlich zu den systematischen Messpunkten wurden 10 statistische Messpunkte ausgewürfelt. An den ersten 5 dieser Messpunkte wurden neben den TETRA BOS-Immissionen auch sämtliche Immissionen im Frequenzbereich 100 kHz bis 3 GHz erfasst, bei den restlichen 5 nur die GSM-, UMTS- und LTE-Immissionen einer etwa 50 m vom TETRA BOS-Träger entfernten Mobilfunkanlage mit 3 Betreibern mit je 1 bis 3 Funkdiensten. Bei den systematischen Messpunkten wurde diese Anlage nicht berücksichtigt, da sie für die Messpunkte im Gebäude zu weit von der TETRA BOS-Anlage entfernt war, um noch als "am selben Standort installiert" gewertet zu werden. Da die statistisch verteilten Messpunkte jedoch wesentlich weiter entfernt von der Anlage sind als die systematischen Messpunkte, können die GSM-, UMTS- und LTE-Immissionen zu Vergleichszwecken herangezogen werden. Nachfolgende Tabelle beschreibt die Lage der statistischen Messpunkte (siehe auch Bild 4.2a).

Punkt Nr.	Messort	Sicht (zu TETRA)	Horizontal- entfernung zur TETRA-Anlage
2.1_ST	statistischer Messpunkt	nein	320 m
2.2_ST	statistischer Messpunkt	nein	60 m
2.3_ST	statistischer Messpunkt	nein	210 m
2.4_ST	statistischer Messpunkt	nein	250 m
2.5_ST	statistischer Messpunkt	ja	118 m
2.6_ST	statistischer Messpunkt	nein	136 m
2.7_ST	statistischer Messpunkt	ja	300 m
2.8_ST	statistischer Messpunkt	nein	290 m
2.9_ST	statistischer Messpunkt	nein	113 m
2.10_ST	statistischer Messpunkt	ја	270 m

 Tabelle 4.2c:
 Szenario 2: Beschreibung der statistischen Messpunkte

In folgender Tabelle ist zunächst nur die TETRA BOS-Immission für die 10 Punkte angegeben. Anschließend werden die GSM-, UMTS- und LTE-Mobilfunkimmissionen (hier sind bei den ersten 5 MP alle berücksichtigt und bei den letzten 5 nur diejenigen der 50 m entfernten Mobilfunkanlage) sowie die Gesamtimmissionen im Frequenzbereich 100 kHz – 3 GHz (mit TETRA BOS) dargestellt.

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
2.1_ST	0,09	0,33	21,7
2.2_ST	0,18	0,65	83,9
2.3_ST	0,18	0,64	83,2
2.4_ST	0,11	0,42	34,8
2.5_ST	0,64	2,33	1093,6
2.6_ST	0,33	1,21	294,4
2.7_ST	0,33	1,19	285,7
2.8_ST	0,15	0,54	57,8
2.9_ST	0,13	0,46	41,7
2.10_ST	0,40	1,46	429,4

Tabelle 4.2d: Szenario 2, statistische MP: TETRA BOS-Immission

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
2.1_ST	0,18	0,35	83,7
2.2_ST	1,10	2,10	3220,6
2.3_ST	0,48	0,90	617,0
2.4_ST	0,31	0,56	255,7
2.5_ST	2,38	4,64	15071,3
2.6_ST	0,49	0,98	643,9
2.7_ST	2,10	3,81	11679,2
2.8_ST	0,14	0,30	54,8
2.9_ST	0,93	1,82	2275,1
2.10_ST	0,60	1,25	957,1

 Tabelle 4.2e:
 Szenario 2, statistische MP: GSM- UMTS- und LTE-Immission (bei den ersten 5 MP wurden alle berücksichtigt und bei den letzten 5 nur die des TETRA BOS-Standortes)

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
2.1_ST	0,20	0,49	106,5
2.2_ST	1,12	2,20	3305,8
2.3_ST	0,51	1,11	701,9
2.4_ST	0,33	0,70	291,7
2.5_ST	2,47	5,19	16166,5

Tabelle 4.2f:Szenario 2, statistische MP: Gesamtimmission im Bereich 100 kHz – 3 GHz (mit
TETRA BOS)



Bild 4.2d: Szenario 2, statistische MP: Grafische Darstellung der gemessenen Immission

An 3 der 10 statistischen Messpunkte dominiert die TETRA BOS-Immission gegenüber der Immission durch GSM-, UMTS- und LTE-Mobilfunkanlagen.

Anschließend sind die Ergebnisse der Momentanwertmessung dargestellt. Der Unterschied zwischen örtlich und zeitlich maximierter TETRA BOS-Immission und örtlich und zeitlich gemittelter TETRA BOS-Immission entspricht feldstärkebezogen einem Faktor 4,4. Es ist zu berücksichtigen, dass bei der zeitlichen Maximierung der örtlich und zeitlich maximierten Exposition nur die Kanalzahl, jedoch nicht der Unterschied zwischen aktueller und beantrag-

ter Sendeleistung berücksichtigt wurde, da dieser auch nicht in eine Bewertung der Momentanimmission einging.

Messpunktbeschreibung				
	Messpunkt in der Nähe	der TETRA BOS-Anlage		
Horizontalabstand zur Anlage Sichtverhältnisse				
233 m keine Sicht			Sicht	
örtlich und zeitlich maximierte Immission (max. Anlagenauslastung)				
	0,104	4 V/m		
örtlich u	örtlich und zeitlich gemittelte Immission (Momentanimmission)			
1,1 m Höhe	1,5 m Höhe	1,7 m Höhe Mittelwert		
0,014 V/m	0,025 V/m	0,029 V/m	0,02 V/m	

Tabelle 4.2g:Szenario 2: Unterschied zwischen der örtlich und zeitlich gemittelten und der örtlich
und zeitlich maximierten TETRA BOS-Immission. Bei der zeitlichen Maximierung wur-
de der Unterschied zwischen aktueller und beantragter Sendeleistung nicht berück-
sichtig.

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Langzeitmessungen mit dem Dosimeter dargestellt. Das Dosimeter wurde während der Messungen der statistisch verteilten Messpunkte in einem Rucksack getragen. Es ist ein Zeitverlauf (11:30 Uhr bis 14:10 Uhr) dokumentiert. Neben TETRA BOS (die Linie ist hervorgehoben) sind in Übereinstimmung mit den anderen Grafiken dieses Abschnitts die Immissionen durch GSM- und UMTS-Basisstationen dargestellt. Die Messempfindlichkeit der Dosimeter ist auf 0,05 V/m begrenzt; kleinere Werte werden als 0,05 V/m (bzw. als waagerechte Linie) angezeigt.



Bild 4.2e: Szenario 2, Dosimetermessung zwischen 11:30 Uhr und 14:10 Uhr

In den grafischen Auswertungen der Dosimetermessungen spielt die Immission durch TETRA BOS gegenüber GSM und UMTS eine eher untergeordnete Rolle. Diese im scheinbaren Widerspruch zu den Auswertungen an den statistischen Messpunkten stehende Aussage ist dadurch begründet, dass die statistischen Messpunkte mit der Kanalzahl sowie einem Faktor zur Berücksichtigung des Unterschieds zwischen beantragter und aktueller Sendeleistung hochgerechnet wurden, wohingegen die Dosimetermessung den Augenblickszustand repräsentiert. Im vorliegenden Fall war der Hochrechnungsfaktor von TETRA BOS wesentlich größer als bei den GSM- und UMTS-Funkdiensten. Die Ergebnisse der Dosimetermessungen liegen jedoch in derselben Größenordnung wie die in Tabelle 4.2g dokumentierten Ergebnisse der örtlich und zeitlich gemittelten Immission.

4.1.3 Anlage auf einem Schlauchturm im ländlichen Umfeld

Die Messungen zum Szenario "Anlage auf einem Schlauchturm im ländlichen Umfeld" wurden an einer Anlage in einer Gemeinde in der Nähe von München durchgeführt. Die omnidirektional strahlende TETRA BOS-Antenne ist in 33 m Höhe auf dem Schlauchturm des Feuerwehrzentrums installiert. Am Standort sind auch analoge BOS-Anlagen in Betrieb (4m-Band, 2m-Band).

Die nähere Umgebung des Standortes und die Lage der systematischen Messpunkte sind in folgendem Bild dargestellt.



Bild 4.3a: Szenario 3: Lageplan mit Anlagenstandort und Verteilung der systematischen Messpunkte

Für dieses Szenario wurden systematische Messungen an 10 Außen-Messpunkten mit Sichtverbindung zur TETRA BOS-Antenne durchgeführt, um die Entfernungsabhängigkeit der Immission zu dokumentieren. Vergleichsmessungen mit GSM-/UMTS-Systemen konnten nicht durchgeführt werden, da am Standort keine derartigen Systeme betrieben werden. Auch ein Vergleich mit dem analogen BOS-Funk war nicht möglich, da diese Anlagen nur sehr sporadisch sendeten.

Nachfolgende Tabelle beschreibt die Lage der systematischen Messpunkte.

Punkt Nr.	Messort	Sicht (zu TETRA)	Horizontalentfernung zur TETRA-Anlage
3.1_SY	Linienmessung	ja	343 m
3.2_SY	Linienmessung	ja	317 m
3.3_SY	Linienmessung	ja	292 m
3.4_SY	Linienmessung	ja	270 m
3.5_SY	Linienmessung	ja	246 m
3.6_SY	Linienmessung	ja	224 m
3.7_SY	Linienmessung	ja	199 m
3.8_SY	Linienmessung	ja	175 m
3.9_SY	Linienmessung	Nein (Bäume)	153 m
3.10_SY	Linienmessung	ja	108 m

Tabelle 4.3a: Szenario 3: Beschreibung der systematischen Messpunkte

In folgender Tabelle ist die TETRA BOS-Immission für die 10 Punkte angegeben.

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
3.1_SY	0,14	0,53	55,7
3.2_SY	0,15	0,53	57,0
3.3_SY	0,19	0,68	92,4
3.4_SY	0,17	0,61	75,1
3.5_SY	0,20	0,71	101,3
3.6_SY	0,16	0,58	68,5
3.7_SY	0,17	0,63	80,5
3.8_SY	0,15	0,56	62,5
3.9_SY	0,13	0,46	42,2
3.10_SY	0,08	0,30	18,0

Tabelle 4.3b: Szenario 3, systematische MP: TETRA BOS-Immission

In folgendem Bild sind die Resultate aus der Tabelle visualisiert.



Bild 4.3b: Szenario 3, systematische MP: Grafische Darstellung der gemessenen Immission



In Bild 4.3c ist die Entfernungsabhängigkeit der TETRA BOS-Immission dargestellt.

Bild 4.3c: Szenario 3, systematische MP: Entfernungsabhängigkeit der TETRA BOS-Immission

Die Immission in Bodennähe zeigt das typische Verhalten bei vertikal stark bündelnden Mobilfunkantennen mit geringem Downtiltwinkel der Hauptkeule: Im Nahbereich um den Standort treten geringere Immissionen auf, als in etwas weiterer Entfernung. Die Hauptkeule erreicht bei dem hier betrachteten Standort erst in einer Entfernung von etwa 250 Meter den Boden.

Zusätzlich zu den systematischen Messpunkten wurden 10 statistische Messpunkte ausgewürfelt. An den ersten 5 dieser Messpunkte wurden - neben den TETRA BOS-Immissionen auch sämtliche Immissionen im Frequenzbereich 100 kHz bis 3 GHz erfasst, bei den restlichen 5 nur die Immissionen der TETRA BOS-Anlage. Nachfolgende Tabelle beschreibt die Lage der statistischen Messpunkte. Die nähere Umgebung des Standortes und die statistischen Messpunkte sind in folgendem Bild dargestellt.



Bild 4.3d: Szenario 3: Anlagenstandort und Lage der statistischen Messpunkte

Punkt Nr.	Messort	Sicht (zu TETRA)	Horizontalentfernung zur TETRA-Anlage
3.1_ST	statistischer Messpunkt	ja	118 m
3.2_ST	statistischer Messpunkt	ja	213 m
3.3_ST	statistischer Messpunkt	nein	297 m
3.4_ST	statistischer Messpunkt	nein	345 m
3.5_ST	statistischer Messpunkt	nein	723 m
3.6_ST	statistischer Messpunkt	nein	560 m
3.7_ST	statistischer Messpunkt	ja	789 m
3.8_ST	statistischer Messpunkt	nein	740 m
3.9_ST	statistischer Messpunkt	nein	307 m
3.10_ST	statistischer Messpunkt	nein	286 m

Tabelle 4.3c: Szenario 3: Beschreibung der statistischen Messpunkte

In folgender Tabelle ist zunächst nur die TETRA BOS-Immission für die 10 Punkte angegeben. Anschließend werden für die ersten 5 Messpunkte die GSM-/UMTS-Mobilfunkimmissionen, sowie die Gesamtimmissionen im Frequenzbereich 100 kHz – 3 GHz (inklusive TETRA BOS) dargestellt.

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
3.1_ST	0,11	0,39	29,9
3.2_ST	0,10	0,35	24,9
3.3_ST	0,02	0,07	0,9
3.4_ST	0,07	0,25	12,8
3.5_ST	0,01	0,03	0,2
3.6_ST	0,01	0,05	0,6
3.7_ST	0,06	0,22	9,9
3.8_ST	0,01	0,05	0,6
3.9_ST	0,03	0,12	2,9
3.10_ST	0,02	0,08	1,3

Tabelle 4.3d: Szenario 3, statistische MP: TETRA BOS-Immission

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
3.1_ST	0,17	0,30	72,4
3.2_ST	0,07	0,15	11,4
3.3_ST	0,02	0,05	1,4
3.4_ST	0,05	0,10	5,6
3.5_ST	0,02	0,05	1,3

Tabelle 4.3e: Szenario 3, statistische MP: GSM- und UMTS-Immission

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
3.1_ST	0,23	0,52	129,3
3.2_ST	0,15	0,40	51,9
3.3_ST	0,09	0,14	23,2
3.4_ST	0,14	0,33	42,7
3.5_ST	0,10	0,18	24,1







An 4 der 5 vergleichend untersuchten statistischen Messpunkte dominiert grenzwertbezogen die TETRA BOS-Immission gegenüber der Immission durch GSM- und UMTS-Mobilfunkanlagen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass in der unmittelbaren Umgebung der Messpunkte keine GSM-/UMTS-Mobilfunksendeanlage betrieben wurde.

Abschließend sind die Ergebnisse der Momentanwertmessung dargestellt. Der Unterschied zwischen örtlich und zeitlich maximierter TETRA BOS-Immission und örtlich und zeitlich gemittelter TETRA BOS-Immission entspricht feldstärkebezogen einem Faktor 2,1.

Messpunktbeschreibung				
	Messpunkt in der Nähe	der TETRA BOS-Anlage		
Horizontalabstand zur Anlage Sichtverhältnisse				
319	9 m	Sid	cht	
örtlich und	örtlich und zeitlich maximierte Immission (max. Anlagenauslastung)			
	0,13	V/m		
örtlich u	und zeitlich gemittelte In	nmission (Momentanimn	nission)	
1,1 m Höhe	1,5 m Höhe	1,7 m Höhe	Mittelwert	
0,059 V/m	0,065 V/m	0,061 V/m	0,06 V/m	

 Tabelle 4.3g:
 Szenario 3: Unterschied zwischen der örtlich und zeitlich gemittelten und der örtlich und zeitlich maximierten TETRA BOS-Immission

4.1.4 Anlage auf einem Wasserturm im ländlichen Umfeld

Die Messungen zum Szenario "Anlage auf einem Wasserturm im ländlichen Umfeld" wurden an einer Anlage in einer oberbayerischen Gemeinde im Landkreis Erding durchgeführt. Die omnidirektional strahlende TETRA BOS-Antenne ist in etwa 38 m Höhe auf einem Wasserturm installiert.

Am Standort sind auch GSM-/UMTS-Mobilfunksender, ein UKW-Lokalradiosender, sowie analoge BOS-Anlagen in Betrieb.

Im Ortsgebiet wurden 10 statistische Messpunkte ausgewürfelt. Die nähere Umgebung des Standortes und die statistischen Messpunkte sind in folgendem Bild dargestellt.



Bild 4.4a: Szenario 4: Anlagenstandort und Lage der statistischen Messpunkte

Punkt Nr.	Messort	Sicht (zu TETRA)	Horizontalentfernung zur TETRA-Anlage
4.1_ST	statistischer Messpunkt	ја	310 m
4.2_ST	statistischer Messpunkt	nein	760 m
4.3_ST	statistischer Messpunkt	nein	962 m
4.4_ST	statistischer Messpunkt	nein	932 m
4.5_ST	statistischer Messpunkt	ја	1.105 m
4.6_ST	statistischer Messpunkt	nein	1.289 m
4.7_ST	statistischer Messpunkt	nein	1.971 m
4.8_ST	statistischer Messpunkt	nein	1.105 m
4.9_ST	statistischer Messpunkt	nein	1.024 m
4.10_ST	statistischer Messpunkt	ја	890 m

Tabelle 4.4a: Szenario 4: Beschreibung der statistischen Messpunkte

In folgender Tabelle ist zunächst nur die TETRA BOS-Immission für die 10 Punkte angegeben. Anschließend werden in Tabelle 4.4c für die ersten 5 Messpunkte alle nennenswert vorhandenen GSM-/UMTS-Mobilfunkimmissionen, für die restlichen 5 Punkte nur die GSM-/ UMTS-Immissionen, verursacht durch den betrachteten TETRA-BOS-Standort, angegeben. Tabelle 4.4d dokumentiert die Gesamtimmissionen im Frequenzbereich 100 kHz - 3 GHz (inklusive TETRA BOS).

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
4.1_ST	0,10	0,35	24,9
4.2_ST	0,02	0,06	0,8
4.3_ST	0,01	0,03	0,2
4.4_ST	0,02	0,07	0,9
4.5_ST	0,03	0,13	3,2
4.6_ST	0,01	0,04	0,3
4.7_ST	0,01	0,03	0,2
4.8_ST	0,01	0,04	0,4
4.9_ST	0,01	0,03	0,2
4.10_ST	0,06	0,22	9,9

Tabelle 4.4b: Szenario 4, statistische MP: TETRA BOS-Immission

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
4.1_ST	1,69	3,92	7.591,1
4.2_ST	0,16	0,32	68,2
4.3_ST	0,11	0,23	34,6
4.4_ST	0,29	0,55	226,3
4.5_ST	0,28	0,58	209,2
4.6_ST	0,19	0,39	95,6
4.7_ST	0,07	0,13	13,5
4.8_ST	0,11	0,21	30,4
4.9_ST	0,10	0,20	26,2
4.10_ST	0,89	1,85	2.100,6

 Tabelle 4.4c:
 Szenario 4, statistische MP: GSM- und UMTS-Immission (bei den ersten 5 MP wurden alle berücksichtigt und bei den letzten 5 MP nur die des BOS-Standortes)

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
4.1_ST	1,75	4,02	8.177,3
4.2_ST	0,48	0,63	600,8
4.3_ST	0,47	0,61	584,9
4.4_ST	0,44	0,68	514,4
4.5_ST	0,61	0,92	974,8





Bild 4.4b: Szenario 4, statistische MP: Grafische Darstellung der gemessenen Immission

An allen 10 untersuchten statistischen Messpunkten dominiert die GSM-/UMTS-Immission gegenüber der Immission durch den TETRA BOS-Sender deutlich.

Abschließend sind die Ergebnisse der Momentanwertmessung dargestellt. Der Unterschied zwischen örtlich und zeitlich maximierter TETRA BOS-Immission und örtlich und zeitlich gemittelter TETRA BOS-Immission entspricht feldstärkebezogen einem Faktor 2,2.

Messpunktbeschreibung					
Messpunkt in der Nähe der TETRA BOS-Anlage					
Horizontalabstand zur Anlage Sichtverhältnisse					
125 m Sicht			cht		
örtlich und zeitlich maximierte Immission (max. Anlagenauslastung)					
0,09 V/m					
örtlich und zeitlich gemittelte Immission (Momentanimmission)					
1,1 m Höhe	1,1 m Höhe 1,5 m Höhe 1,7 m Höhe Mittelwert				
0,038 V/m	0,046 V/m	0,042 V/m	0,04 V/m		

 Tabelle 4.4e:
 Szenario 4: Unterschied zwischen der örtlich und zeitlich gemittelten und der örtlich und zeitlich maximierten TETRA BOS-Immission

Anmerkung:

Am hier betrachteten Standort war auch eine analoge BOS-Sendeanlage in Betrieb, die jedoch nur sehr sporadisch sendete, was dazu führte, dass nur an drei der zehn Messpunkte die Immission, verursacht durch die analogen BOS-Signale, gemessen werden konnten. Aufgrund dieser geringen Anzahl wurde auf einen expliziten Vergleich der analogen und digitalen BOS-Immission verzichtet.

4.1.5 Anlage auf einem freistehenden Mast im ländlichen Umfeld

Die Messungen zum Szenario "Anlage auf einem freistehenden Mast im ländlichen Umfeld" wurden an einer Anlage am Rand einer Gemeinde im Umfeld von München durchgeführt. Die omnidirektional strahlende TETRA BOS-Antenne ist in 37 m Höhe auf einem Gittermast installiert. Am Standort sind auch GSM-, UMTS- und LTE-Anlagen in Betrieb.

Für dieses Szenario wurden systematische Messungen an 10 Außen-Messpunkten mit direkter Sicht bei verschiedenen Orientierungen und Entfernungen zur Anlage durchgeführt. Die Messpunkte wurden in einer radialen Linie bezüglich des Anlagenstandortes angeordnet, um die Entfernungsabhängigkeit der Immission untersuchen zu können.

Die nähere Umgebung des Standortes, sowie die Lage der Messpunkte sind in Bild 4.5a dargestellt. Statistische Messpunkte wurden an diesem Standort nicht gemessen.



Bild 4.5a: Szenario 5: Lageplan mit Anlagenstandort und Verteilung der systematischen Messpunkte

Nachfolgende Tabelle beschreibt die Lage der systematischen Messpunkte.

Punkt Nr.	Messort	Sicht (zu TETRA)	Horizontalentfernung zur TETRA-Anlage
5.1_SY	Linienmessung	ja	112 m
5.2_SY	Linienmessung	ja	66 m
5.3_SY	Linienmessung	ja	11 m
5.4_SY	Linienmessung	ja	69 m
5.5_SY	Linienmessung	ja	121 m
5.6_SY	Linienmessung	ja	187 m
5.7_SY	Linienmessung	ja	238 m
5.8_SY	Linienmessung	ja	312 m
5.9_SY	Linienmessung	ја	381 m
5.10_SY	Linienmessung	ja	443 m

Tabelle 4.5a: Szenario 5: Beschreibung der systematischen Messpunkte

In folgender Tabelle ist zunächst nur die TETRA BOS-Immission für die 10 Punkte angegeben. Die Summenimmission aus GSM-, UMTS und LTE-Signalen vom selben Standort wird anschließend in einer zweiten Tabelle dargestellt.

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
5.1_SY	0,12	0,43	36,8
5.2_SY	0,12	0,43	36,8
5.3_SY	0,15	0,53	57,0
5.4_SY	0,11	0,41	34,3
5.5_SY	0,10	0,38	29,2
5.6_SY	0,10	0,36	26,7
5.7_SY	0,13	0,46	43,2
5.8_SY	0,14	0,50	50,8
5.9_SY	0,12	0,43	37,6
5.10_SY	0,14	0,49	48,5

Tabelle 4.5b: Szenario 5, systematische MP: TETRA BOS-Immission

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
5.1_SY	1,67	3,83	7.393,1
5.2_SY	0,95	1,99	2.396,4
5.3_SY	1,37	2,77	4.984,5
5.4_SY	1,26	2,26	4.240,9
5.5_SY	1,43	3,08	5.425,8
5.6_SY	1,58	3,17	6.603,4
5.7_SY	1,55	2,85	6.359,7
5.8_SY	1,53	2,65	6.184,4
5.9_SY	1,32	2,29	4.608,1
5.10_SY	1,52	2,63	6.154,0

Tabelle 4.5c: Szenario 5, systematische MP: GSM-, UMTS- und LTE-Immission

In folgendem Bild sind die Resultate aus den obigen beiden Tabellen visualisiert. An allen 10 Messpunkten dominieren grenzwertbezogen die GSM-/UMTS/LTE-Immissionen im Vergleich zu den TETRA BOS-Immissionen sehr deutlich. Der leistungsgemittelte grenzwertbezogene Unterschiedsfaktor zwischen GSM-/UMTS-/LTE-Immissionen und TETRA BOS-Immissionen beträgt 26,9 dB, der Beitrag des TETRA BOS-Senders an der gesamten Hochfrequenzimmission ist also sehr gering.





In Bild 4.5c ist die Entfernungsabhängigkeit der TETRA BOS-Immission im Vergleich zur Mobilfunk-Immission dargestellt.



Bild 4.5c: Szenario 5, systematische MP: Entfernungsabhängigkeit der TETRA BOS- und der Mobilfunk-Immission

Die Entfernungsgrafik zeigt nochmals die deutliche Dominanz der Mobilfunk- gegenüber den TETRA BOS-Immissionen.

Abschließend sind die Ergebnisse der Momentanwertmessung dargestellt. Der Unterschied zwischen örtlich und zeitlich maximierter TETRA BOS-Immission und örtlich und zeitlich gemittelter TETRA BOS-Immission entspricht feldstärkebezogen einem Faktor 1,9.

Messpunktbeschreibung					
	Messpunkt in der Nähe der TETRA BOS-Anlage				
Horizontalabstand zur Anlage Sichtverhältnisse					
310 m Sicht			cht		
örtlich und zeitlich maximierte Immission (max. Anlagenauslastung)					
0,08 V/m					
örtlich und zeitlich gemittelte Immission (Momentanimmission)					
1,1 m Höhe	1,1 m Höhe 1,5 m Höhe 1,7 m Höhe Mittelwert				
0,034 V/m	0,042 V/m	0,043 V/m	0,04 V/m		

 Tabelle 4.5d:
 Szenario 5: Unterschied zwischen der örtlich und zeitlich gemittelten und der örtlich und zeitlich maximierten TETRA BOS-Immission

4.2 Untersuchung von Einflussfaktoren für die Größe der Immission

Im Rahmen der hier durchgeführten Messungen wurden bei den einzelnen Szenarien teilweise sehr unterschiedliche TETRA BOS-Immissionswerte gefunden. Auch beim Vergleich der Szenarien untereinander kann man feststellen, dass sich im Mittel zum Teil deutliche Immissionsunterschiede ergeben, wie aus folgenden Bildern deutlich wird.



Bild 4.6: Zusammenfassende Darstellung der in den 5 untersuchten Szenarien gemessenen TETRA BOS-Immissionswerte (in logarithmischer und linearer Darstellung), systematische und statistische Messpunkte

Nachfolgend soll der Einfluss verschiedener Faktoren auf die Größe der Immission näher untersucht werden. Im Wesentlichen sind es die folgenden Einflussfaktoren, die entweder nur von der Sendeanlage oder nur vom Empfangsort oder von beiden bestimmt werden:

Einflussfaktoren seitens der Sendeanlage:

- Sendeleistung der Anlage (Anzahl der Kanäle, Sendeleistung pro Kanal),
- Höhe der Sendeantennen über Grund,
- verwendete Antennentypen,
- Downtilt bzw. Öffnungswinkel der Antennen,
- horizontale Ausrichtung der Antennen.

Einflussfaktoren seitens des Immissionsortes:

- Abstand zur Sendeanlage,
- Höhe des Empfängerortes über Grund (bzw. relativer Höhenunterschied zur Sendeanlage),
- horizontale Ausrichtung zur Anlage,
- Vorhandensein von dämpfenden Hindernissen (Sichtbarkeit der Anlage).

Von diesen Einflussfaktoren sollen im Folgenden der (laterale) Abstand zur Sendeanlage, der relative Höhenunterschied vom Messpunkt (MP) zur Sendeanlage (Vertikalwinkel) und die Sichtverhältnisse (freie Sicht oder Sicht durch Hindernisse verdeckt) im Hinblick auf Gesetzmäßigkeiten in der Verteilung der Immission durch TETRA BOS-Sendeanlagen untersucht werden. Die im Folgenden dargestellten Immissionswerte sind immer als prozentuale Grenzwertausschöpfung bezüglich der elektrischen Feldstärke für Vollausbau und Maximalauslastung der verursachenden Sendeanlagen dargestellt.
4.2.1 Allgemeine Eigenschaften der Messergebnisse

Bevor die Messergebnisse speziell bezüglich der oben genannten Einflussfaktoren ausgewertet werden, sollen hier zunächst einige grundsätzliche Eigenschaften der an den Messpunkten gefundenen Immissionswerte dargestellt werden.

Die 80 systematischen und statistischen Messpunkte können wie folgt charakterisiert werden:

Lage der Messpunkte	Davon mit Sicht zu TETRA BOS-Antennen	Davon ohne bzw. mit einge- schränkter Sicht zu TETRA BOS-Antennen
Indoor (9 Punkte)	1	8
Outdoor (71 Punkte)	42	29

Tabelle 4.6:Eigenschaften der Messpunkte

Folgende Tabelle gibt einen Überblick über die gemessenen Maximal- bzw. Minimalimmissionen sowie die sich daraus ergebenden Spannweiten:

Kennwert	Resultat
Maximalwert über alle MP [% vom Feldstärkegrenzwert]	4,63
Minimalwert über alle MP [% vom Feldstärkegrenzwert]	0,03
Spannweite [dB] über alle MP	43,8
Maximalwert über alle Outdoor-MP [% vom Feldstärkegrenzwert]	4,63
Minimalwert über alle Outdoor-MP [% vom Feldstärkegrenzwert]	0,03
Spannweite [dB] über alle Outdoor-MP	43,8
Maximalwert über alle Indoor-MP [% vom Feldstärkegrenzwert]	3,65
Minimalwert über alle Indoor-MP [% vom Feldstärkegrenzwert]	0,04
Spannweite [dB] über alle Indoor-MP	39,2
Maximalwert bei Sicht [% vom Feldstärkegrenzwert]	4,63
Minimalwert bei Sicht [% vom Feldstärkegrenzwert]	0,13
Spannweite [dB] bei Sicht	31,0
Maximalwert ohne Sicht [% vom Feldstärkegrenzwert]	2,12
Minimalwert ohne Sicht [% vom Feldstärkegrenzwert]	0,03
Spannweite [dB] ohne Sicht	37,0

 Tabelle 4.7:
 Extremwerte der gemessenen 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 groß, sie beträgt über alle Messpunkte fast 44 dB.

Die statistischen Mittelwerte sind in folgender Tabelle aufgelistet. Die durchschnittliche Immission wurde als leistungsgemittelter Wert gebildet.

Statistischer Mittelwert	Resultat
Durchschnittliche Immission über alle MP [% vom Feldstärkegrenzwert]	1,45
Median über alle MP [% vom Feldstärkegrenzwert]	0,46
Durchschn. Immission über die systematischen MP [% vom Feldstärke-GW]	1,64
Median über die systematische MP [% vom Feldstärkegrenzwert]	0,55
Durchschn. Immission über die statistischen MP [% vom Feldstärke-GW]	1,22
Median über die statistischen MP [% vom Feldstärkegrenzwert]	0,34

 Tabelle 4.8:
 Durchschnittliche TETRA BOS-Immissionswerte und Mediane f
 ür alle 80 Messpunkte

Aus Tabelle 4.8 wird deutlich, dass die systematischen Messpunkte im Mittel eine höhere Immission (ca. 4 dB bezüglich des Median) aufweisen als die statistischen Messpunkte. Die statistischen Messpunkte wurden nach dem Zufallsprinzip "ausgewürfelt" und entsprechen eher einer flächengemittelten Immission. Die systematischen Messpunkte hingegen wurden nach systematischen Gesichtspunkten ausgewählt, wie z.B. horizontale Linienmessungen zur Untersuchung der Entfernungsabhängigkeit oder vertikale Linienmessungen zur Untersuchungen der Höhenabhängigkeit bzw. des Dämpfungsverlaufs. Offensichtlich führt diese Systematik dazu, dass die systematischen Messpunkte höher exponiert sind, z.B. durch eine häufigere Auswahl von Messpunkten mit Sicht auf die Anlage. Die Dominanz der Immission der systematischen Messpunkten gegenüber den statistisch ausgewählten ist bei der Bewertung dieser Messreihe wie auch anderer Messreihen mit ähnlich gewählter Systematik zu berücksichtigen.

Weiterhin kann festgestellt werden, dass der durchschnittliche Immissionswert jeweils deutlich größer als der Median ist, was auf eine unsymmetrische Verteilung der Immissionswerte hindeutet. Dies wird aus folgender Abbildung für alle Messpunkte deutlich:





Das Bild zeigt alle Messpunkte in einem Verteilungsdiagramm. Die Balken zeigen an, wie viele Messpunkte in eine bestimmte Grenzwertklasse fallen. Der überwiegende Teil der Messergebnisse liegt bei weniger als 1 % vom Grenzwert. Zu höheren Grenzwertklassen fällt die Anzahl der zugehörigen Messpunkte sehr schnell ab.

4.2.2 Lateraler Abstand des Messpunktes zur Sendeanlage

Zur Untersuchung, ob der laterale Abstand einen geeigneten Parameter zu Abschätzung der Immission darstellt, wurde das Messresultat jedes Outdoor-Messpunktes mit Sichtverbindung zur Antenne zusammen mit seinem Abstand zur TETRA BOS-Anlage in ein Diagramm eingetragen. Messpunkte ohne Sicht wurden hier nicht einbezogen, da fehlende Sichtbedingungen, wie später noch gezeigt wird, ebenfalls einen großen Einfluss auf die Immission haben. Das Ergebnis ist in folgendem Bild dargestellt. Als Immission ist wieder die Grenzwertausschöpfung bezüglich der elektrischen Feldstärke dargestellt.



Bild 4.8: Immission als Funktion des lateralen Abstands für die 42 Outdoor-Messpunkte mit Sichtverbindung zur TETRA BOS-Antenne

Als Ergebnis wird deutlich, dass es bei den Outdoormesspunkten im unmittelbaren Umfeld der Sendeanlage (Entfernungen bis ca. 1 Kilometer) offenbar nicht gerechtfertigt ist, den Abstand als maßgebliches Kriterium für die Beurteilung der Immissionsgröße zu verwenden. Die höchsten Immissionen der Messreihe finden sich bei Abständen von um oder über 100 Meter von der Anlage. Ab etwa 200 Meter ist zwar eine gewisse Abnahme der Immission mit dem Abstand erkennbar, für eine bestimmte Entfernung beträgt die Spannweite der Immission jedoch teilweise über 20 dB. Die Ursache für dieses Verhalten liegt in dem Umstand begründet, dass es sich bei TETRA BOS-Antennen nicht um isotrope (d.h. in alle Richtungen gleichmäßig abstrahlende) Antennen handelt, sondern um Richtantennen, die ihre Energie speziell in bestimmte Raumrichtungen verteilen.

4.2.3 Einfluss des Vertikalwinkels

In folgendem Bild ist für alle Messpunkte mit Sicht, für die Vertikalwinkelwerte aufgenommen wurden, die Immission als Funktion des Vertikalwinkels dargestellt. Der Vertikalwinkel kann damit als Maß dafür dienen, ob der Messpunkt in Hauptstrahlrichtung oder außerhalb der Hauptstrahlrichtung liegt.





In Bild 4.9 ist die Immission jeweils gemittelt über verschiedene Vertikalwinkel*bereiche* angegeben. Über den Balken ist die mittlere Entfernung der Messpunkte zur Sendeanlage (lateraler Abstand) bei der jeweiligen Vertikalwinkelklasse angegeben.

Im Vergleich zum entsprechenden Diagramm bei LTE (Bild 3.16) fällt auf, dass die Maxima der Immission hin zu größeren Vertikalwinkelbereichen verschoben sind.

Bei größeren Vertikalwinkeln als 20° und damit zusammenhängenden geringeren Abständen treten niedrigere Immissionen auf, wodurch auch hier erneut demonstriert wird, dass im näheren Umfeld einer Mobilfunksendeanlage der Abstand zur Charakterisierung der Immission nur sehr eingeschränkt geeignet ist.

4.2.4 Einfluss der Sichtverhältnisse

Im Folgenden werden die Sichtverhältnisse vom Messpunkt zur Sendeanlage und auf diese Weise der abschattende Effekt durch Hindernisse auf die Immission untersucht. In Bild 4.10 ist hierzu die entfernungsabhängige Immission als Funktion der Sichtverbindung zur TETRA BOS-Anlage dargestellt.



Bild 4.10: Immission als Funktion der Sichtverhältnisse

Bei dieser Auswertung ist eine deutliche Tendenz dahingehend festzustellen, dass Messpunkte mit Sichtbedingungen im Mittel eine größere Immission aufweisen als Messpunkte, bei denen keine oder eingeschränkte Sicht auf die Anlage besteht. Bei freier Sicht ergibt sich ein Medianwert von 0,58 %, bei fehlender Sichtverbindung beträgt der Median hingegen nur noch 0,17 %, der Unterschied beträgt also etwa 10,7 dB.

Fazit:

Von den untersuchten Einflussfaktoren

- lateraler Abstand des Messpunktes von der Sendeanlage,
- Vertikalwinkel, mit dem man vom Messpunkt aus die Sendeanlage sieht und
- Sichtbedingungen zwischen Messpunkt und Sendeanlage

ist der *Abstand* im unmittelbaren Umfeld der Anlage (bis zu einigen hundert Meter, abhängig von Montagehöhe und Downtilt) offenbar als Maß zur Abschätzung der entstehenden TETRA BOS-Immission wenig geeignet. 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. Die Immissionsreduzierung, die der Messpunkt erfährt, ist dabei abhängig von der Dämpfungswirkung des Objektes, aber auch von der Frage, inwieweit die Signale der TETRA BOS-Sendeanlage auch über Reflexionen z.B. an benachbarten Gebäuden oder Wänden zum Messpunkt gelangen können.

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.

4.3 Langzeitmessungen

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse von 2 Langzeitmessungen an TETRA BOS-Anlagen in städtischer und ländlicher Umgebung vorgestellt.

4.3.1 Städtisches Szenario

Die Langzeitmessung über 24 Stunden wurde in einer Entfernung von ca. 95 m zu einer TETRA BOS-Sendeanlage in einer Großstadt des Ruhrgebietes mit direkter Sicht im 5. OG eines Gebäudes durchgeführt.

Die Messung des zeitlichen Verlaufs der TETRA BOS-Sendesignale wurde vom 19.10.2012, Startzeit 19:00 Uhr, bis zum 20.10.2012, Endzeit 19:00 Uhr, durchgeführt. Es wurden die TETRA BOS-Signale mit dem Messgerät Narda SRM-3000 im Safety Evaluation Modus von 395-400 MHz über den oben genannten Zeitraum jeweils in einem zeitlichen Abstand von 30 Sekunden aufgenommen. Der Frequenzbereich umfasst den gesamten Downlink-Frequenzbereich von TETRA BOS. Im folgenden Bild ist der resultierende Verlauf der TETRA BOS-Immissionen über den oben genannten Zeitraum zu sehen:



Bild 4.11: Verlauf der TETRA BOS-Immissionen über einen Zeitraum von 24 Stunden

Im obigen Bild sind nur geringe Schwankungen der TETRA BOS Immissionen von etwa ±0,0015 V/m um einen Mittelwert von ca. 0,005 V/m zu sehen. Dies lässt darauf schließen, dass über die TETRA BOS-Station nur ein Kanal (der MCCH) abgestrahlt wurde und keine zusätzlichen Kanäle für ein erhöhtes "Verkehrsaufkommen" hinzu geschaltet wurden. Dieser Umstand konnte bei den Vorortmessungen im TETRA BOS Szenario 2 bestätigt werden: Während der gesamten Messungen war lediglich der MCCH "in der Luft"; zusätzliche Kanäle waren nicht aufgeschaltet.

4.3.2 Ländliches Szenario

Die Langzeitmessung im ländlichen Umfeld über 24 Stunden wurde in einer Entfernung von ca. 55 m zu einer TETRA BOS-Sendeanlage mit direkter Sicht im Dachgeschoss eines Gebäudes ein einer Mittelstadt in Bayern durchgeführt. Im Bereich des Gebäudes sind auch Antennen für den analogen BOS-Funk (4m- und 2m-Band) vorhanden, so dass sich dieser Standort für eine vergleichende Langzeitmessung anbietet. Der Aufbau der Messung und ein Teil der BOS-Antennen sind in Bild 4.12 zu sehen.



Bild 4.12: BOS Messung: Messaufbau (links), TETRA BOS-Antenne (auf der Mastspitze) und Analogdipol (4m) vom Messpunkt aus gesehen (rechts). Die 2m-Antenne befindet sich auf einem anderen Teil des Gebäudekomplexes.

Die Messung des zeitlichen Verlaufs der analogen und digitalen BOS-Sendesignale wurde vom 17.10.2012, Startzeit 16:00 Uhr, bis zum 18.10.2012, Endzeit 16:00 Uhr, durchgeführt. Die Signale wurden mit dem Messgerät Narda SRM-3006 im "Safety Evaluation" Modus über den oben genannten Zeitraum jeweils in einem zeitlichen Abstand von 30 Sekunden aufgenommen. Der gemessene Frequenzbereich umfasst den gesamten Downlink-Frequenzbereich von TETRA BOS sowie die für diesen Standort vorgesehenen Analogfunkfrequenzen. Im folgenden Bild ist der resultierende Verlauf der analogen und digitalen BOS-Immissionen über den oben genannten Zeitraum zu sehen:



Bild 4.13: Verlauf der der analogen und digitalen BOS-Immissionen über einen Zeitraum von 24 Stunden

Im 2m-Band konnte während der gesamten 24 Stunden keine Aktivität festgestellt werden, die Messkurve bleibt konstant auf den Höhe der Nachweisgrenze (ca. 0,003 V/m). Der 4m-Funk zeigt hingegen das für analoge Funksysteme typische Verhalten. Die absolut überwiegende Zeit wird von der Sendeanlage kein Signal abgegeben, gelegentlich jedoch können Immissionswerte im der Größenordnung bis zu etwa 0,14 V/m festgestellt werden. Immissionen entstehen also bei diesem Standort nur bei Sprachaktivität.

Die TETRA BOS-Immission hingegen ist messbar und zeitlich nahezu konstant, was darauf hinweist, das während der 24 Stunden kein oder nur sehr wenig Verkehr abgewickelt wurde. Dies liegt nahe, da sich der Netzabschnitt München, zu dem der Standort gehört, derzeit nur im Probebetrieb und noch nicht im taktischen Wirkbetrieb befindet. Es war über die 24 Stunden also nur der zeitkonstante Signalisierungsträger (MCCH-Träger) des Standortes in Betrieb. Möglicherweise sind am Standort auch noch keine Sendemodule für zusätzliche Gesprächskanäle installiert. Auch bei den Messungen an insgesamt 20 Punkten in der Umgebung dieses Standortes (Abschnitt 4.1.3) konnte immer nur der MCCH-Kanal festgestellt werden.

Dass die (kurzfristigen) Immissionen des Analogfunks höher ausfallen als die des TETRA BOS-Systems, kann durch die Art und Anordnung der Sendeantennen begründet werden: Die (aufgrund mehrerer vertikal übereinander angeordneter Einzeldipole unter einer Kunststoffhülle) vertikal stark bündelnde TETRA BOS-Antenne ist deutlich höher montiert als die 4m-Antenne, die auch nur aus einem einfachen Dipol plus (auf dem Foto oben nicht sichtbaren) Reflektorstab besteht, so dass es nicht verwunderlich ist, dass der Analogfunk am Messort größere Immissionen erzeugt als der Digitalfunk.

4.4 Vergleich TETRA BOS zu Analog BOS

Zum Vergleich der Immissionen zwischen TETRA BOS und Analog BOS wurde eine Messreihe im Umfeld einer Anlage im städtischen Umfeld durchgeführt, die nachfolgend dokumentiert ist.

Die Messungen im städtischen Umfeld wurden an der Anlage durchgeführt, die bereits in Abschnitt 4.1.2 beschrieben ist. Die omnidirektional strahlende TETRA BOS-Anlage ist auf etwa 29 m Höhe auf dem Dach eines Gebäudes installiert.

Speziell für dieses Forschungsprojekt wurde eine Analogfunkanlage im 2m-Band in Betrieb genommen. Die Signale wurden nicht über dieselbe Antenne wie TETRA BOS abgestrahlt, sondern über einen Halbwellendipol mit vertikaler Polarisation, der sich in etwa 45 m Höhe auf einem 50 m entfernten Antennenträger (Metallmast) befindet. Aufgrund der örtlichen Trennung beider Antennen wurden als Messpunkte für den Immissionsvergleich nicht diejenigen im Gebäude ausgewählt (systematische Messpunkte), sondern die in 60 bis 320 m Entfernung angeordneten statistischen Messpunkte aus Abschnitt 4.1.2. Die Sichtbedingungen waren bis auf MP 2.9_ST identisch; von diesem bestand Sicht auf die Analog BOS-Antenne, jedoch nicht auf die TETRA BOS-Antenne. Für die Messung wurde permanent ein Signal durch die Analog BOS-Anlage abgestrahlt. Dieser Zustand ist jedoch für die Realität nicht typisch, da Analogfunkanlagen in der Regel nur dann senden, wenn eine aktive

Gesprächsverbindung existiert. Dieser "Realfall" verursacht allerdings messtechnische Probleme, da an jedem Messpunkt unter Umständen eine längere Zeit gewartet werden muss, bis ein entsprechendes Signal "in der Luft" ist (siehe auch Bild 4.13).

In der nachfolgenden Gegenüberstellung werden beide "Momentanzustände" von TETRAund Analog BOS-Immissionen miteinander verglichen. Das bedeutet insbesondere, dass die TETRA BOS-Immissionen nicht mit der beantragten Kanalzahl und dem Unterschied zwischen derzeitiger und beantragter Sendeleistung auf den maximalen Anlagenzustand hochgerechnet werden. Dies hat deswegen seine Berechtigung, da für die Vergleichsmessung nur *ein* analoger Kanal im 2m-Band in Betrieb genommen wurde, im ehemaligen analogen Regelbetrieb aber durchaus auch noch andere Kanäle (z.B. im 4m-Band) aufgeschaltet sein können. Außerdem arbeitet die TETRA BOS-Anlage derzeit in einem gegenüber der Beantragung leistungsreduzierten Sendebetrieb, der jedoch den derzeitigen "erweiterten Probebetrieb" repräsentiert.

In den nachfolgenden beiden Tabellen werden die Immissionen durch die TETRA BOS-Anlage denjenigen durch die Analog BOS-Anlage gegenübergestellt.

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
2.1_ST	0,01	0,05	0,5
2.2_ST	0,03	0,10	1,9
2.3_ST	0,03	0,10	1,8
2.4_ST	0,02	0,06	0,8
2.5_ST	0,10	0,35	24,3
2.6_ST	0,05	0,18	6,5
2.7_ST	0,05	0,18	6,3
2.8_ST	0,02	0,08	1,3
2.9_ST	0,02	0,07	0,9
2.10_ST	0,06	0,22	9,5

Tabelle 4.9: Städtisches Szenario, statistische MP: TETRA BOS-Immission

Punkt Nr.	Elektr. Feldstärke E in V/m	Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert nach 26. BlmSchV	Leistungsflussdichte S in µW/m²
2.1_ST	0,01	0,02	0,1
2.2_ST	0,03	0,11	2,6
2.3_ST	0,04	0,15	4,4
2.4_ST	0,01	0,04	0,3
2.5_ST	0,10	0,38	28,4
2.6_ST	0,03	0,11	2,4
2.7_ST	0,03	0,12	2,9
2.8_ST	0,01	0,05	0,4
2.9_ST	0,10	0,36	25,3
2.10_ST	0,01	0,03	0,2

Tabelle 4.10: Städtisches Szenario, statistische MP: Analog BOS-Immission

In nachfolgendem Bild sind die Ergebnisse grafisch ausgewertet.



Bild 4.14: Vergleich von TETRA- und Analog BOS-Immission

Als Ergebnis dieser Auswertung sind grenzwertbezogen und absolut an 6 der 10 Messpunkte die TETRA BOS-Immissionen höher als die Analog BOS-Immissionen. Der mittlere Unterschiedsfaktor beträgt 2,1 dB.

In der Praxis ist zu berücksichtigen, dass für dieses Beispiel die Analog BOS-Immissionen noch wesentlich kleiner sind: Aufgrund der geltenden Grenzwertbestimmungen sind zur Beurteilung der mittleren Immissionen diese zeitlich leistungsbezogen über beliebige 6-Minuten-Intervalle zu mitteln. Während die Mittelung bei TETRA BOS aufgrund der konstanten Abstrahlung des MCCH zu keiner Verringerung der Immission führt, ist bei Analog BOS die gemessene Immission mit dem realen Duty Cycle zu gewichten. Der Grad der Verringerung der mittleren Immission gegenüber der oben ausgewiesenen ist dabei davon abhängig, in wie viel Prozent einer beliebigen 6-Minuten-Periode der Kanal aufgetastet ist (und ein Sendesignal in der Luft ist), und in wie viel Prozent der Zeit keine aktive Verbindung besteht. Eine entsprechende Verringerung der mittelern Immission gegenüber der auf den maximalen Betriebszustand extrapolierten Immission ist bei TETRA BOS natürlich dann gegeben, wenn mehrere Kanäle beantragt sind, bei der Messung aber nur der MCCH aktiv ist.

4.5 Vergleich von TETRA BOS-Immissionen zu anderen Funkdiensten

4.5.1 Vergleich von TETRA BOS-Immission und GSM-/UMTS-Immissionen

Ein Vergleich der Verteilungsdiagramme von TETRA BOS (Bild 4.7) und GSM/UMTS aus [BOR 06] (Bild 3.19) zeigt ein qualitativ ähnliches Verhalten, d.h. die größte Zahl der Messpunkte fällt jeweils in die untersten Grenzwertklassen. Bezüglich des Maximalwertes liegt TETRA BOS mit 4,63 % deutlich unter dem Maximalwert von GSM (12,81 %) und UMTS (8,38 %). Auch der Median ist bei TETRA BOS mit 0,46 % deutlich kleiner als von GSM (1,75 %) und UMTS (0,72 %).

Fasst man alle Messpunkte zusammen, an denen neben TETRA BOS auch die Immissionen durch andere Mobilfunkanlagen vom selben Standort gemessen wurde, ergibt sich im Mittel ein Zuwachs der Immission durch TETRA BOS von 47 % (Median bezüglich der Ausschöpfung des Leistungsflussdichte-Grenzwertes, Standardabweichung 137 %). Dabei gibt es jedoch einen deutlichen Unterschied zu den städtischen und den ländlichen Szenarien: Während in den städtischen Szenarien der mittlere Zuwachs aufgrund der stellenweise sehr großen Kanalzahl bzw. beantragten Sendeleistungen bei 144 % liegt, beträgt er in den ländlichen Szenarien nur 3 %. Hierbei ist aber anzumerken, dass diese Werte lediglich für das direkte Umfeld der untersuchten TETRA BOS-Anlagen, jedoch nicht für eine flächenbzw. bevölkerungsgemittelte Immissionszunahme gelten.

Ein ähnlich detaillierter Vergleich zu den Faktoren, die das Immissionsverhältnis maßgeblich beeinflussen, wie in Abschnitt 3.3.1.2 vorgenommen, wird hier nicht durchgeführt. Grund hierfür ist, dass die Zahl der relevanten Szenarien und die Zahl der für einen Vergleich geeigneten Messpunkte zu klein ist, als dass hier belastbare Aussagen getroffen werden können.

4.5.2 Anteil der TETRA BOS-Immission an der Gesamtimmission

An 4 Szenarien mit insgesamt 20 Zufallsmesspunkten wurde - zusätzlich zur TETRA BOS-Immission - auch die gesamte Hochfrequenzimmission im Frequenzbereich von 100 kHz bis 3 GHz bestimmt. Somit kann für diese Punkte ermittelt werden, welchen Anteil an der Gesamtimmission die Felder der TETRA BOS-Anlagen ausmachen.

Im Mittel über alle Punkte ergab sich für die TETRA BOS-Immissionen leistungsbezogen ein Anteil von 30 % an der gesamten grenzwertbezogenen Hochfrequenzimmission.

Aus folgendem Bild sind die prozentualen Anteile für jedes der 4 untersuchten Szenarien getrennt dargestellt.



Bild 4.15: Prozentualer Anteil der TETRA BOS-Immission an der Gesamtimmission im Frequenzbereich von 100 kHz - 3 GHz (leistungsbezogen)

Immissionen von anderen als Mobilfunksendeanlagen (z.B. Ton und Fernsehrundfunk) trugen an den Messpunkten nur in untergeordnetem Maß zur Gesamtimmission bei.

Je nachdem, wie stark am selben Standort bzw. in der Umgebung befindliche GSM- und UMTS-Sendeanlagen zur Gesamtimmission beitragen, ergeben sich Szenarien, bei denen die TETRA BOS-Immissionen prozentual nur einen vergleichsweise geringen Anteil an der Gesamtimmission hatten (insbesondere Szenario 4 mit typisch ca. 1 %), aber auch Standorte mit einem deutlich höheren Anteil von TETRA BOS an der Gesamtimmission (hier typisch ca. 20 bis 90 %).

5 Bedeutung der Projektergebnisse für die Normung

In vorliegendem Forschungsprojekt wurden neben umfangreichen Immissionserfassungen auch ausführliche Untersuchungen zu spektralen und codeselektiven LTE-Messverfahren durchgeführt, die nach Kenntnis der Autoren in diesem Umfang und Detaillierungsgrad noch nicht von anderer Seite her publiziert worden sind. Die dabei gewonnenen und im vorliegenden Bericht dokumentierten Erkenntnisse sollten in die Normung zu Immissionsmessungen im Umfeld von LTE-Basisstationen einfließen, z.B. in die derzeit in der Diskussion befindliche Ergänzung der Norm EN 50492 "Basic standard for the in-situ measurement of electromagnetic field strength related to human exposure in the vicinity of base stations" um einen Anhang zu LTE-Messungen.

Danksagung

An dieser Stelle sei all jenen Personen und Organisationen gedankt, die einen Anteil am Gelingen des vorliegenden Projektes hatten. Dank gilt vor allem

- dem Bundesamt für Strahlenschutz für die Finanzierung vorliegenden Vorhabens,
- Herrn D. Geschwentner vom Bundesamt für Strahlenschutz für die kompetente und konstruktiv kritische Betreuung des Projektes,
- den Herren J. Kausche und G. Mielke von der Firma Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG f
 ür die leihweise Bereitstellung des codeselektiven LTE-Messsystems "R&S[®]TS-EMF" sowie die zahlreichen Fachdiskussionen zur codeselektiven Messung von LTE-Signalen,
- Herrn H. Keller von der Firma Narda Safety Test Solutions GmbH für die zahlreichen Fachdiskussionen zur codeselektiven Messung von LTE-Signalen,
- den Herren. Dr. P. Unger, F. Weinbrenner, F. Buchholz sowie Frau K. Ehrhardt von der Firma Deutsche Telekom Technik GmbH f
 ür die Unterst
 ützung bei der Durchf
 ührung der LTE-Messungen und der Messungen an UMTS-Femtozellen,
- den Herren Chr. Schilling, Dr. T. Rechenbach und Dr. V. Bökelmann von der Firma Vodafone D2 GmbH für die Unterstützung bei der Durchführung von LTE-Messungen sowie die Möglichkeit, Messungen direkt an den Antennenausgängen einer LTE-Basisstation durchführen zu können.
- den Herren H. Möhlmann, B. Heideck und M. Krämer von der Firma E-Plus Mobilfunk GmbH & Co. KG für die Unterstützung bei der Durchführung der LTE-Messungen,
- Herrn Dr. F. Schönborn, Telefónica Germany GmbH & Co. OHG für die Unterstützung bei der Durchführung der LTE-Messungen,
- Herrn Chr. Börner vom Landesamt für Zentrale Polizeiliche Dienste Nordrhein-Westfalen für die Unterstützung bei der Durchführung der TETRA BOS-Messungen,
- den Herren J. Vogl und W. Gutsmiedl von der ITK-Werkstatt der Bundespolizei München für die Unterstützung bei der Durchführung der TETRA BOS-Messungen im Raum München.

Literaturverzeichnis

- [26. BImSchV] 26. BImSchV, Sechsundzwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV), BGBI. Jg. 1996 Teil I Nr. 66, 20.12.1996.
- [99/519/EG] 1999/519/EG, Empfehlung des Rates vom 12. Juli 1999 zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern (0 Hz – 300 GHz), Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften L 199/59, 30.07.1999.
- [BEMFV] **BEMFV**, Verordnung über das Nachweisverfahren zur Begrenzung elektromagnetischer Felder, BGBI. Jg. 2002 Teil I Nr. 60, 27.08.2002.
- [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. Wuschek 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 07] Chr. Bornkessel, M. Schubert, M. Wuschek und P. Schmidt, Determination of the general public exposure around GSM and UMTS base stations, Radiation Protection Dosimetry, vol. 124(2007)no. 1, S. 40-47.
- [BOR 12] Chr. Bornkessel, M. Schubert und M. Wuschek, Bestimmung der Exposition der allgemeinen Bevölkerung durch neue Mobilfunktechniken, Studie im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz, Zwischenbericht Aufarbeitung des relevanten Standes von Wissenschaft und Technik, Kamp-Lintfort, (2012).
- [EN 50385] EN 50385:2002 (VDE 0848 Teil 385), Produktnorm zur Konformitätsüberprüfung von Mobilfunk-Basisstationen und stationären Teilnehmergeräten für schnurlose Telekommunikationsanlagen im Hinblick auf die Basisgrenz- und Referenzwerte bezüglich der Exposition von Personen gegenüber elektromagnetischen Feldern (110 MHz bis 40 GHz) - Allgemeinbevölkerung; Deutsche Fassung EN50385:2002. DIN-Norm, VDE Verlag GmbH, 2003.
- [EN 50392] DIN EN 50392 (VDE 0848 Teil 392), Fachgrundnorm zur Demonstration der Konformität elektronischer und elektrischer Geräte mit den Basisgrenzwerten für die Exposition von Personen gegenüber elektromagnetischen Feldern (0 Hz bis 300 GHz); Deutsche Fassung EN 50392:2004. DIN-Norm, VDE Verlag GmbH, 2004.

- [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 62209-2] EN 62209-2, Sicherheit von Personen in hochfrequenten Feldern von handgehaltenen und am Körper getragenen schnurlosen Kommunikationsgeräten - Körpermodelle, Messgeräte und Verfahren - Teil 2: Verfahren zur Bestimmung der spezifischen Absorptionsrate (SAR) von schnurlosen Kommunikationsgeräten, die in enger Nachbarschaft zum menschlichen Körper verwendet werden (Frequenzbereich von 30 MHz bis 6 GHz) (IEC 62209-2:2010 + Cor. :2010); Deutsche Fassung EN 62209-2:2010
- [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).
- [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
- [METAS 12] **Frédéric Pythoud, Beat Mühlemann**, Measurement Method for LTE Base Stations, Technical Report, Federal Office of Metrology METAS, Section Electricity, Bern, METAS-Report 2012-218-808, Bern 2012.
- [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).
- [VOD 12] *Eigene Funkzelle: Volle Netzstärke innerhalb von Gebäuden*, Pressemitteilung der Vodafone D2 Mobilfunk GmbH, Düsseldorf, 17. August 2012
- [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).

Abkürzungsverzeichnis

BNetzA Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen
 BOS Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben
 DSL Digital Subscriber Line
 DVB-T Digital Video Broadcasting – Terrestrial (engl.) → Digitales terrestrisches Fernsehen

EPRE	Energy per Resource Element
FDD	Frequency Division Duplex (engl.) \rightarrow Frequenzduplex
GSM	Global System for Mobile Communication (engl.)
LOS	Line of Sight (engl.) \rightarrow Sichtverbindung
LTE	Long Term Evolution (engl.), Mobilfunkstandard
MCCH	Main Control Channel
MIMO	Multiple Input Multiple Output (engl.) \rightarrow Mehrantennentechnik
MP	Messpunkt
NB	Narrowband (engl.) \rightarrow Schmalband
NLOS	Non Line of Sight (engl.) \rightarrow keine Sichtverbindung
PDCCH	Physical Downlink Control Channel
P-SS	Primary Synchronization Signal
QAM	Quadrature Amplitude Modulation (engl.) \rightarrow Quadraturamplitudenmodulation
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying (engl.) \rightarrow Quadraturphasenumtastung
RB	Resource Block
RE	Resource Element
RS	Reference Signal
RSRP	Reference Signal Received Power
SAR	Spezifische Absorptionsrate
S-SS	Secondary Synchronization Signal
TETRA	Terrestrial Trunked Radio
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System (engl.) \rightarrow Universelles Mobiltelekommunikationssystem
W-CDMA	Wideband Code Division Multiple Access
WB	Wideband (engl.) \rightarrow Breitband

Verzeichnis häufig verwendeter Symbole

- E Elektrische Feldstärke
- S Leistungsflussdichte

| Verantwortung für Mensch und Umwelt |

Kontakt: Bundesamt für Strahlenschutz Postfach 10 01 49 38201 Salzgitter Telefon: + 49 30 18333 - 0 Telefax: + 49 30 18333 - 1885 Internet: www.bfs.de E-Mail: ePost@bfs.de Gedruckt auf Recyclingpapier aus 100 % Altpapier.

