



Elektromagnetische Felder in NRW **Feldmessungen im Umfeld von LTE-Mobilfunksendeanlagen**

LANUV-Fachbericht 47



Elektromagnetische Felder in NRW
Feldmessungen im Umfeld von LTE-Mobilfunkanlagen
LANUV-Fachbericht 47

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen
Recklinghausen 2013

IMPRESSUM

Herausgeber Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen (LANUV)
Leibnizstraße 10, 45659 Recklinghausen
Telefon 02361 305-0
Telefax 02361 305-3215
E-Mail: poststelle@lanuv.nrw.de

Dieser Fachbericht enthält den Abschlussbericht „Feldmessungen im Umfeld von LTE-Mobilfunksendeanlagen“, den die IMST GmbH im Auftrag des LANUV im Rahmen der Projektreihe „Elektromagnetische Felder in NRW – Untersuchungen der Immissionen durch Mobilfunk-Basisstationen“ verfasst hat.

Autoren Dr. Christian Bornkessel, Markus Schubert, IMST GmbH, Abteilung Prüfzentrum
Carl-Friedrich-Gauß-Straße 2-4, 47475 Kamp-Lintfort

Projektbetreuung/Red. Rainer Kindel (LANUV)

Fotos IMST GmbH; Rainer Kindel (Titelfoto)

ISSN 1864-3930 LANUV-Fachberichte

Informationsdienste Informationen und Daten aus NRW zu Natur, Umwelt und Verbraucherschutz unter
• www.lanuv.nrw.de

Aktuelle Luftqualitätswerte zusätzlich im
• WDR-Videotext Tafeln 177 bis 179

Bereitschaftsdienst Nachrichtenbereitschaftszentrale des LANUV
(24-Std.-Dienst): Telefon 0201 714488

Nachdruck – auch auszugsweise – ist nur unter Quellenangaben und Überlassung von Belegexemplaren nach vorheriger Zustimmung des Herausgebers gestattet. Die Verwendung für Werbezwecke ist grundsätzlich untersagt.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
0 Zusammenfassung	5
1 Einleitung	6
1.1 Zielsetzung des Forschungsvorhabens	6
1.2 Gliederung des vorliegenden Abschlussberichtes	6
2 Eingesetzte Untersuchungsverfahren.....	7
2.1 Messverfahren	7
2.1.1 Messgeräte und Messmethodik	7
2.1.2 Bestimmung der Maximalimmission	8
2.1.3 Messunsicherheit.....	9
2.2 Berechnungsverfahren	9
3 Messung der LTE-Immissionen und Vergleich mit der vom selben Standort erzeugten GSM- und UMTS-Immission....	12
3.1 Beschreibung der Standorte und der Messpunkte.....	13
3.1.1 57074 Siegen, Hauptstraße 20.....	13
3.1.2 59889 Eslohe, Don-Bosco-Straße	14
3.1.3 40217 Düsseldorf, Kronprinzenstraße 105a	15
3.1.4 40472 Düsseldorf, Oberrather Straße 45	16
3.1.5 32683 Barntrup, Im Wied 2.....	17
3.1.6 44137 Dortmund, Kampstraße 106.....	18
3.1.7 48157 Münster, Flugplatz 53.....	19
3.1.8 45130 Essen, Rüttenscheider Stern 5.....	20
3.1.9 47798 Krefeld, Ostwall 165	21
3.1.10 50668 Köln, Riehler Straße 3	22
3.2 Ergebnisse: Mobilfunk	23
3.2.1 57074 Siegen, Hauptstraße 20.....	23
3.2.2 59889 Eslohe, Don-Bosco-Straße	24
3.2.3 40217 Düsseldorf, Kronprinzenstraße 105a	24
3.2.4 40472 Düsseldorf, Oberrather Straße 45	25
3.2.5 32683 Barntrup, Im Wied 2.....	25
3.2.6 44137 Dortmund, Kampstraße 106.....	26
3.2.7 48157 Münster, Flugplatz 53.....	26
3.2.8 45130 Essen, Rüttenscheider Stern 5.....	27
3.2.9 47798 Krefeld, Ostwall 165	27
3.2.10 50668 Köln, Riehler Straße 3	28
3.3 Statistische Auswertung der Immissionsmessungen.....	28
3.4 Abstandsverhalten	31
3.5 Immissionsverlauf im Anlagengebäude	33
3.6 Vergleich von LTE, GSM und UMTS.....	33

3.7	Immissionsänderung an einem früher untersuchten Messpunkt.....	34
4	Untersuchung des feinskaligen Abstandsverhaltens der Immission.....	35
4.1	Idealisierter Abstandsverlauf (freistehende Anlage).....	35
4.2	Realer Abstandsverlauf (Anlage im Wohngebiet).....	40
5	Untersuchung der feinskaligen ausrichtungsabhängigen Immissionsverteilung bei konstantem Abstand.....	44
5.1	Idealisierter Ausrichtungsverlauf (freistehende Anlage).....	44
5.2	Realer Ausrichtungsverlauf (Anlage im Wohngebiet).....	48
6	Untersuchung des feinskaligen Höhenverhaltens der Immission.....	52
6.1	47051 Duisburg, CITY-Parkhaus an der Uferstraße 19.....	52
6.2	40474 Düsseldorf, Hochhaus „Uerdinger Str. 58-62“.....	55
7	Untersuchungen zur Vergleichbarkeit der Messergebnisse nach 26. BImSchV und MV 09 der BNetzA.....	60
8	Vergleich der LTE-Immission von Basisstation und Endgerät.....	65
8.1	HTC „Velocity 4G“.....	66
8.1.1	<i>Kopfphantom</i>	66
8.1.2	<i>„Flach liegend“</i>	69
8.2	Telekom „Speedstick“.....	71
8.2.1	<i>Sendefrequenz „847 MHz“</i>	71
8.2.2	<i>Sendefrequenz „1720 MHz“</i>	74
8.3	Vergleich der LTE-Immissionen von Endgeräten und Basisstationen.....	76
	Danksagung.....	77
	Anhang.....	78
A1	Fotos der Messorte von Kapitel 3.....	78
A1.1	<i>Messort 1</i>	79
A1.2	<i>Messort 2</i>	80
A1.3	<i>Messort 3</i>	81
A1.4	<i>Messort 4</i>	82
A1.5	<i>Messort 5</i>	83
A1.6	<i>Messort 6</i>	84
A1.7	<i>Messort 7</i>	85
A1.8	<i>Messort 8</i>	86
A1.9	<i>Messort 9</i>	87
A1.10	<i>Messort 10</i>	88
A2	Erläuterung zu den Grenzwerten.....	89
	Literaturverzeichnis.....	91

0 Zusammenfassung

Die IMST GmbH wurde vom Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen im Auftrag des Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen mit der Durchführung eines Forschungsvorhabens „Elektromagnetische Felder in NRW – Untersuchung der Immissionen durch Mobilfunk-Basisstationen, Feldmessungen im Umfeld von LTE-Mobilfunksendeanlagen“ beauftragt.

Es wurden Immissionsmessungen an 52 Messpunkten in der Umgebung von 10 LTE-Basisstationsstandorten im Regelbetrieb der Anlagen durchgeführt. Dabei wurden primär Anlagen in den Frequenzbereichen 800 MHz (Frequenzbereich der „Digitalen Dividende“) und 1,8 GHz untersucht. Die Immissionen der am Standort der LTE-Anlage installierten Mobilfunkanlagen des GSM- und UMTS-Mobilfunknetzes wurden mit gemessen.

Die höchsten auf den bei der Bundesnetzagentur beantragten maximalen Ausbauzustand extrapolierten LTE-Immissionen wurden am Messpunkt 2.1 mit 14,2 % des Feldstärke-Grenzwertes der 26. BImSchV festgestellt. Der Medianwert der Grenzwertausschöpfung für die LTE-Immissionen über alle 52 Messpunkte lag bei 0,68 %. Mit Berücksichtigung der am selben Standort installierten GSM/UMTS-Systeme ergaben sich ein Maximalwert von 17,3 % und ein Medianwert von 2,02 % des Feldstärkegrenzwertes. Leistungsbezogen ergab sich an den untersuchten Standorten ein Medianwert der Immissionssteigerung von 27 % durch die Inbetriebnahme von LTE.

Die Auswertungen zeigen, dass die LTE-Immissionen in Bezug auf die Größenordnung der Immission und die Feldverteilung (Abstandsabhängigkeit, Höhenabhängigkeit, Dämpfungsverlauf) eine große Ähnlichkeit zu denen der etablierten Funkdienste GSM und UMTS aufweisen.

Ein Vergleich zwischen den feinskaligen Messungen der azimutalen, der abstandsabhängigen und der höhenabhängigen Immissionsverteilung mit entsprechenden Berechnungsprognosen auf Grundlage eines Freiraumausbreitungsmodells zeigt vor allem in Hauptstrahlrichtung eine gute bis sehr gute qualitative Übereinstimmung. Vor dem Hintergrund einer Messunsicherheit von ± 3 dB und der Verwendung des relativ einfachen Berechnungsmodells ist die quantitative Übereinstimmung der Ergebnisse zwischen Messung und Rechnung bzgl. der azimutalen und abstandsabhängigen Immissionsverteilung gut. Lediglich beim Vergleich der Höhenabhängigkeit der Immission gab es deutliche Unterschiede zwischen Messung und Berechnung, die vermutlich durch den Einfluss des Bodens hervorgerufen wurden.

Die Differenz der Messergebnisse von Immissionsmessungen mit dem Messverfahren der Bundesnetzagentur und dem Verfahren nach 26. BImSchV/LAI lag an zwei untersuchten Standorten zwischen etwa 1 und 3 dB. Die Differenzen in einzelnen funkdienstespezifischen Teilbereichen sind stellenweise höher und können bis zu etwa 10 dB betragen.

Die Untersuchung der azimutalen Immissionsverteilung von zwei LTE-Endgeräten hat gezeigt, dass diese sowohl in der Größe als auch in der Verteilung stark vom Endgerät, von der Ausrichtung des jeweiligen Endgerätes und von der Sendefrequenz abhängen. Der Vergleich der mittleren Immission (Median) zeigt, dass in Abständen zwischen 2 und 3 m der untersuchten LTE-Endgeräte vergleichbare Werte wie im Umfeld von LTE-Basisstationen erreicht werden. Bei geringeren Abständen überwiegt im Mittel die Immission der LTE-Endgeräte, bei größeren Abständen die der LTE-Basisstationen.

1 Einleitung

1.1 Zielsetzung des Forschungsvorhabens

Der vorliegende Abschlussbericht „Feldmessungen im Umfeld von LTE-Mobilfunksendeanlagen“ ist Bestandteil der Projektreihe „Elektromagnetische Felder in NRW - Untersuchung der Immissionen durch Mobilfunk-Basisstationen“ des Landes NRW.

In den vergangenen Jahren sind im Zuge der flächendeckenden Einführung neuer Mobilfunktechniken in NRW von der IMST GmbH im Auftrag des damaligen Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz NRW (MUNLV NRW) diverse Messreihen an GSM- [BOR 02] und UMTS-Mobilfunksendeanlagen [BOR 05] durchgeführt worden. Inzwischen befindet sich mit LTE die nächste Mobilfunkgeneration für Breitbandübertragungen im landesweiten flächendeckenden Rollout. Diese neuartige Technik verändert mit ihren elektromagnetischen Feldern die Immissionssituation im Land NRW und erhöht die Exposition der Bevölkerung. Bislang liegen jedoch nur wenige belastbare quantifizierte Daten zu den elektromagnetischen Immissionen durch LTE im Regelbetrieb vor, die eine fundierte Beurteilung der Feldstärken im Hinblick auf den Gesundheitsschutz der Bevölkerung zulassen. Daher soll die vorliegende LTE-Messreihe in NRW diese Erkenntnis- und Dokumentationslücke schließen. Da der flächendeckende Ausbau dieser neuen Mobilfunktechnologie für die breite Bevölkerung durch die Betreiber inzwischen zügig vorangeht, wurde das Untersuchungsvorhaben zeitlich parallel zum LTE-Rollout durchgeführt. Hierdurch wird die Verwertbarkeit der Informationen für die zuständigen Immissionsschutzbehörden und die interessierte Öffentlichkeit zeitnah und vor Abschluss des Ausbaus ermöglicht.

1.2 Gliederung des vorliegenden Abschlussberichtes

Nach einer Beschreibung der eingesetzten Untersuchungsvorhaben werden die Ergebnisse von Immissionsmessungen an 52 Messpunkten im Umfeld von 10 verschiedenen über NRW verteilten LTE-Basisstationen vorgestellt und statistisch ausgewertet. Da an allen LTE-Anlagen neben LTE auch GSM- und/oder UMTS-Mobilfunkanlagen in Betrieb waren, wurden deren Immissionen mit gemessen und den LTE-Immissionen vergleichend gegenüber gestellt. Die Immissionsveränderung an einem Messpunkt, der bereits in zwei früheren Messreihen zu GSM und UMTS untersucht wurde, wird quantifiziert.

Im Anschluss werden Untersuchungen zur feinskaligen Immissionsverteilung in Bezug auf den Abstand, die azimutale Ausrichtung und die Höhe des Messpunktes in Relation zur LTE-Anlage vorgestellt. Die Messergebnisse werden mit rechentechnischen Prognosen verglichen. Die Berechnung erfolgt unter der („idealisierten“) Annahme von Freiraumausbreitungsbedingungen.

Danach erfolgen Untersuchungen zur Vergleichbarkeit von Messergebnissen, die an identischen Messpunkten mit dem Messverfahren der Bundesnetzagentur (RegTP MV 09/EMF/3) [MV 09] einerseits und mit dem Verfahren nach 26. BImSchV/LAI-Empfehlungen [26. BImSchV; LAI 04] andererseits ermittelt wurden.

Den Abschluss bilden Immissionsmessungen an zwei LTE-Endgeräten und ein Vergleich der gefundenen Messwerte mit den Immissionen durch LTE-Basisstationen.

2 Eingesetzte Untersuchungsverfahren

2.1 Messverfahren

2.1.1 Messgeräte und Messmethodik

Für die Immissionsmessungen der in diesem Bericht untersuchten LTE-, GSM- und UMTS-Signale wurden folgende Messgeräte eingesetzt:

Gerät	Hersteller	Art	Ser. Nr.
SRM-3006	Narda	Tragbarer Spektrumanalysator 9 kHz - 6 GHz mit codeselektiver UMTS- und LTE-Messoption	G-0011
FSP 7	Rohde&Schwarz	Spektrumanalysator 9 kHz – 7 GHz	100433
3-Achsen-Antenne	Narda	Isotrope Antenne 75 MHz – 3 GHz	H-0144
USLP 9142	Schwarzbeck	Logper-Antenne 0,7 GHz – 5 GHz	102
EFS 9218	Schwarzbeck	Aktive Bikonusanterenne 9 kHz – 300 MHz	9218174
VUBA 9117	Schwarzbeck	Bikonische Antenne 30 MHz – 1 GHz	9117-141
HFH2-Z2	Rohde & Schwarz	Aktive Rahmenantenne 9 kHz – 30 MHz	100035

Tabelle 2.1: Verwendete Messgeräte

Die verwendeten Messgeräte sind kalibriert und unterliegen einem regelmäßigen Kalibrierturnus.

Mit dem Spektrumanalysator und einer geeigneten Empfangsantenne wurden Frequenz und Empfangspegel der einzelnen am Messort untersuchten Funksignale festgestellt. Unter Berücksichtigung der Kalibrierdaten der verwendeten Antenne sowie der Dämpfung des Kabels zwischen Antenne und Analysator wurde daraus die am Messort herrschende Feldstärke bestimmt.

Bei den Immissionsmessungen der Kapitel 3 bis 6 wurde die *Schwenkmethode* verwendet: Hierbei wird mit der Antenne das Messvolumen abgetastet (Messhöhe ca. 0,75 m - 1,75 m, Durchmesser mind. 1 m) und dabei die Ausrichtung und Polarisationsrichtung der Antenne variiert. Der Spektrumanalysator wird dabei in der Betriebsart „Max-hold“ betrieben. Gemessen wurde jeweils so lange, bis keine Änderungen der Messwertanzeige zu beobachten waren. Damit wird zuverlässig die jeweils stärkste im Messvolumen vorhandene Immission ermittelt. Beim Schwenken wurde ein Mindestabstand von 50 cm zu Boden, Decke, Wänden und metallischen Objekten eingehalten.

LTE-Signale wurden bei den Immissionsmessungen der Kapitel 3 bis 6 mit einer Messbandbreite von 1,4 MHz, GSM-Signale mit einer Bandbreite von 200 kHz und UMTS-Signale mit einer Bandbreite von 5 MHz erfasst.

2.1.2 Bestimmung der Maximalimmission

Die von LTE-, GSM- und UMTS-Basisstationen erzeugten elektromagnetischen Felder sind zeitlich nicht konstant, sondern schwanken in Abhängigkeit von Verkehrsauslastung und Verbindungsqualität. Nachts sinkt die Immission durch geringes Verkehrsaufkommen in der Regel auf einen Minimalwert ab, der nur durch die permanent abgestrahlten Signalisierungssignale erzeugt wird. Nach 26. BImSchV [26. BImSchV] bzw. LAI-Empfehlungen [LAI 04] ist die bei höchster betrieblicher Anlagenauslastung entstehende Immission zu bestimmen. Dies erfolgt wie folgt:

LTE-Anlagen

Bei LTE-Anlagen sind die RS (Reference Signal) Signale anlagen- und sektorspezifisch codiert und werden permanent mit vom aktuellen Verkehr unabhängiger, konstanter Sendeleistung gesendet. Mit einem codeselektiven Spektrumanalysator werden die Immissionen durch die RS beider Pfade jeder Sendeanenne (RS0 und RS1) gemessen (bei allen untersuchten Anlagen war 2-fach MIMO als Polarisationsdiversity installiert). Mit den von den Anlagenbetreibern zur Verfügung gestellten Daten über die aktuell eingestellte Sendeleistung der RS Signale sowie die bei der Bundesnetzagentur (BNetzA) beantragte und genehmigte maximale Sendeleistung pro Sendeanenne wird daraus die maximal mögliche Immission beim maximalen Betriebszustand der Anlage abgeleitet.

GSM-Anlagen

Mehrkanalige GSM-Anlagen senden ab Kanal 2 meist mit einer Leistungsregelung, wohingegen Kanal 1 (Signalisierungskanal, BCCH) permanent mit maximaler Sendeleistung arbeitet. Um aus den mit dem Spektrumanalysator gemessenen Werten auf die maximale Anlagenauslastung zu schließen, wird je Sektor die durch den Signalisierungskanal erzeugte Immission gemessen und mit der maximalen Anzahl der Kanäle verknüpft. Die in diesem Bericht dokumentierte Maximalimmission beinhaltet die Hochrechnung auf den bei der Bundesnetzagentur beantragten bzw. genehmigten maximalen Betriebszustand der Anlage. Die Zahl der bei der BNetzA beantragten bzw. genehmigten Kanäle sowie deren Kanalnummern wurden von den Netzbetreibern zur Verfügung gestellt.

UMTS-Anlagen

Bei UMTS-Anlagen existiert ein Signalisierungssignal (der „Common Pilot Channel“, kurz „CPICH“), das mit definierter, konstanter Leistung abgegeben wird. Die Feldstärke jedes vorhandenen CPICH wird mittels einer codeselektiven Messung bestimmt. Die Maximalimmission ergibt sich durch Multiplikation der gemessenen CPICH-Immission mit einem Faktor, der sich aus der aktuell eingestellten Leistung des CPICH und der maximal beantragten Sendeleistung des Frequenzkanals ergibt. Dieser Faktor (in der Regel 10 bezüglich der Leistung) wurde für vorliegende Messungen bei den Netzbetreibern abgefragt. Die somit ermittelte Immission wird dann auf die Zahl der maximal beantragten bzw. genehmigten Frequenzkanäle hochgerechnet.

2.1.3 Messunsicherheit

Die Messunsicherheit für die Immissionsmessungen beträgt ± 3 dB (erweiterte Messunsicherheit für $k=2$, d.h. Vertrauensintervall 95%). Hierbei sind sowohl die Unsicherheitsbeiträge für die Kalibrierung von Messantenne, Messkabel und Spektrumanalysator, als auch die Unsicherheit der Probennahme berücksichtigt. Die Messunsicherheit wurde nicht zu den Messergebnissen addiert.

2.2 Berechnungsverfahren

Die Berechnungen wurden in vorliegendem Projekt mit einem Freiraumwellenausbreitungsmodell durchgeführt: Hierbei wird angenommen, dass sich die elektromagnetischen Felder von der Basisstationsantenne, die als Punktequelle modelliert ist, in Form einer Kugelwelle störungsfrei in den Raum ausbreiten. Reflexionen am Erdboden oder an Gebäuden werden dabei nicht modelliert, sondern separat mit einem Aufschlag von 3 dB auf die Sendeleistung berücksichtigt.

Unter Annahme des Freiraumausbreitungsmodells berechnet sich die Leistungsflussdichte S im Abstand r von einer Basisstationsantenne, die einen Gewinn G_S aufweist und in die eine Sendeleistung P_S eingespeist wird, zu:

$$S = \frac{P_S \cdot G_S}{4\pi r^2} \quad (2.1)$$

Im Fernfeld sind Leistungsflussdichte S und elektrische Feldstärke E über den Freiraumwellenwiderstand Z_{F0} verknüpft, der den Wert 377 Ohm hat.

$$E = \sqrt{S \cdot Z_{F0}} \quad (2.2)$$

Als technischer Parameter zur Berechnung der Immission nach Gleichung 2.1 und 2.2 geht neben der Sendeleistung vor allem der richtungsabhängige Gewinn G_S der Basisstationsantenne ein. Dieser ist üblicherweise in der Form von Abstrahldiagrammen in einer vertikalen und einer horizontalen („azimutalen“) Ebene der dreidimensionalen Abstrahlcharakteristik angegeben und von einigen Herstellern von Basisstationsantennen in elektronischer Form verfügbar. Folgende zwei Bilder zeigen exemplarisch das Abstrahldiagramm einer typischen Basisstationsantenne in vertikaler und horizontaler Ebene sowie die zugehörige Abstrahlcharakteristik. Die Basisstation ist dabei als grün umrandetes Rechteck dargestellt.

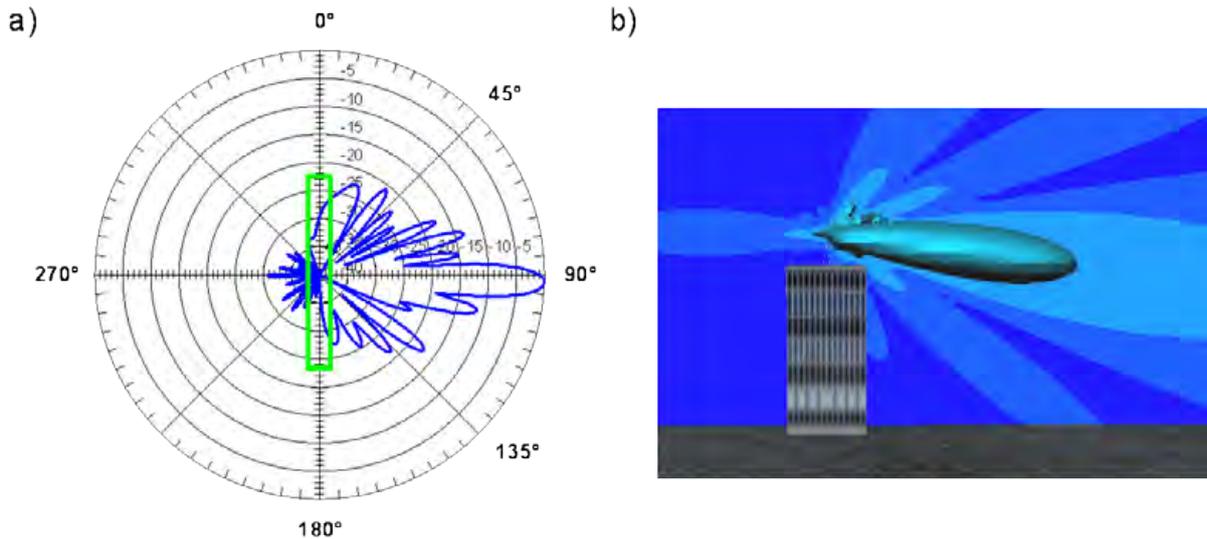


Bild 2.1: a) Vertikaler Schnitt einer typischen Abstrahlcharakteristik einer Mobilfunkantenne
b) Typische Abstrahlcharakteristik

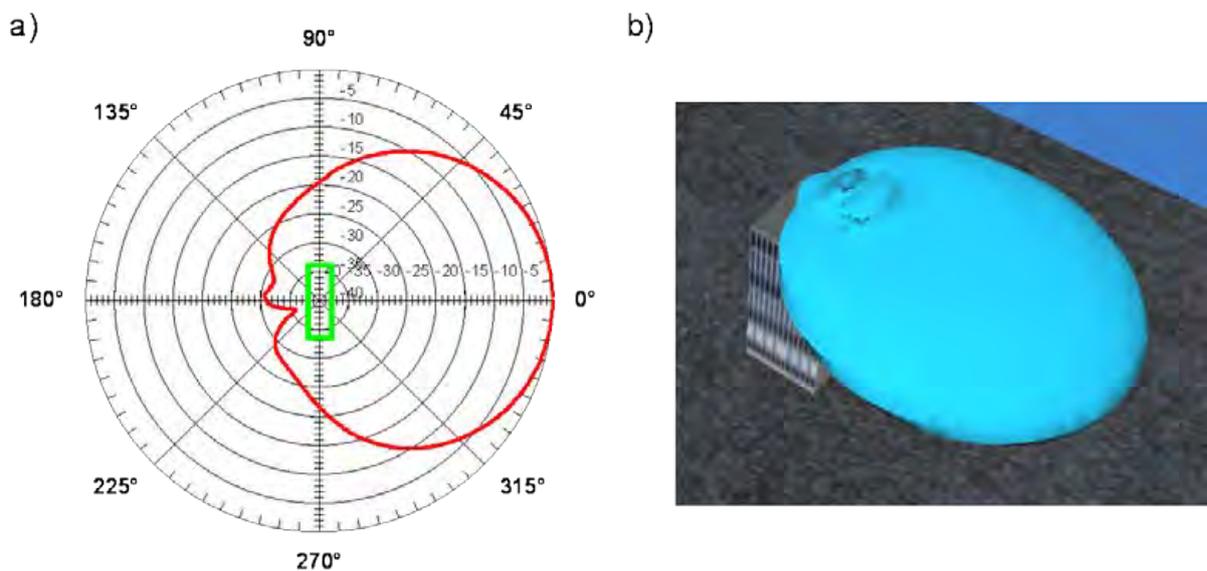


Bild 2.2: a) Horizontaler Schnitt einer typischen Abstrahlcharakteristik einer Mobilfunkantenne
b) Typische Abstrahlcharakteristik

Für vorliegende Untersuchungen wurden die Abstrahldiagramme der jeweiligen Antennen aus Internet-Datenbanken entnommen. Diese liegen aber in der Regel nicht lückenlos für alle Frequenzen vor, sondern nur für wenige Frequenzstützstellen. Sofern die konkrete Sendefrequenz eines Betreibers zwischen zwei Frequenzstützstellen lag, zu der die Antennendiagramme vorlagen, wurde ein Antennendiagramm aus den Daten beider Frequenzen „synthetisiert“: Für das synthetisierte Diagramm wurde je Vertikal- bzw. Horizontalwinkel der Maximalwert aus beiden Teildiagrammen gebildet. Diese Vorgehensweise ist in Bild 2.3 bzw. Bild 2.4 veranschaulicht. Es ist zu sehen, dass es vor allem im Bereich der Nebenzipfel im Vertikaldiagramm und ab einem Horizontalwinkel von ca. 100° zu relevanten Abweichungen in den Diagrammen beider Frequenzen kommt.

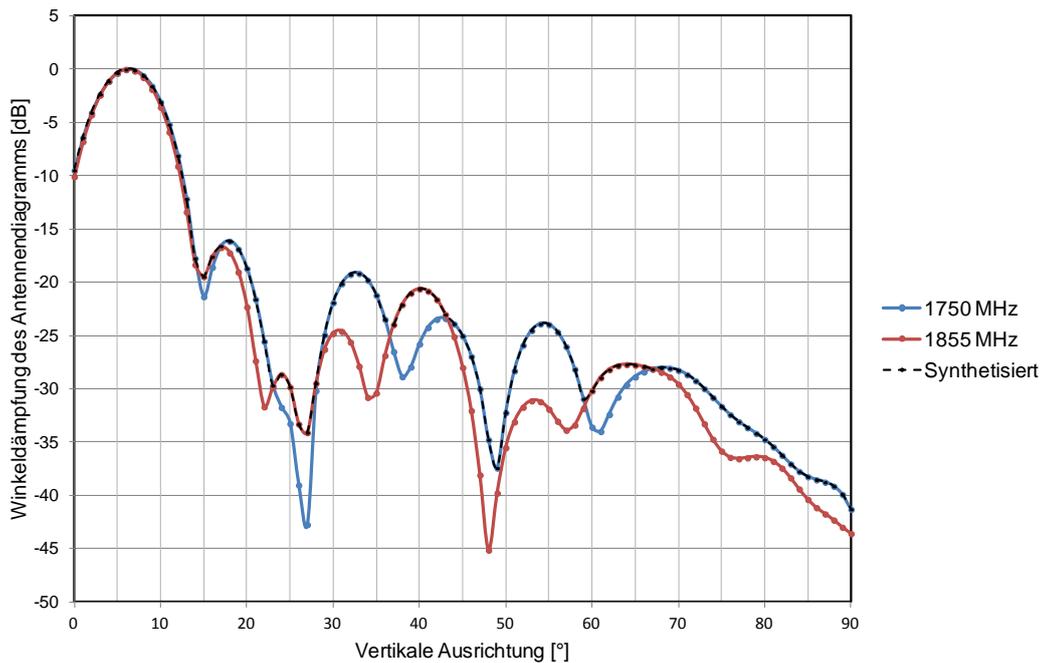


Bild 2.3: Vergleich eines vertikalen Antennendiagramms bei zwei verschiedenen Sendefrequenzen und resultierendes synthetisiertes Diagramm

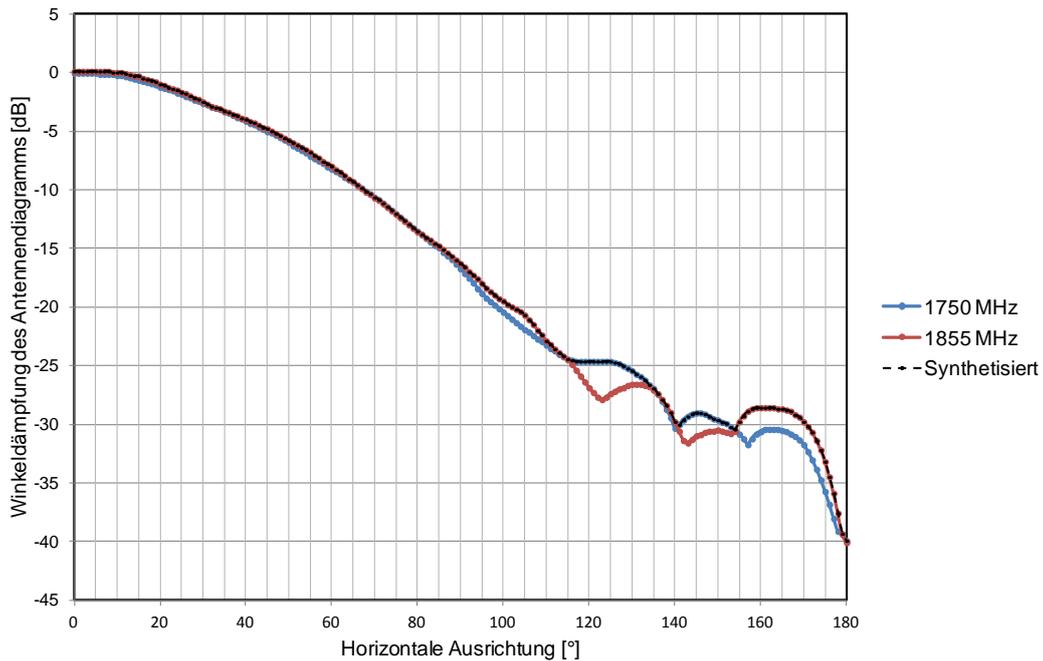


Bild 2.4: Vergleich eines horizontalen Antennendiagramms bei zwei verschiedenen Sendefrequenzen und resultierendes synthetisiertes Diagramm

Die Angaben zu Sendeleistung sowie geometrische Montagedetails (Höhe der Antennen über Grund, azimutale Ausrichtung, elektrischer und mechanischer Downtilt) wurden bei den Netzbetreibern abgefragt. Die Berechnungen erfolgten mit der Software „FieldView“ von der EM-Institut GmbH (<http://www.em-institut.de>), die das Freiraumausbreitungsmodell als Berechnungsalgorithmus implementiert hat.

3 Messung der LTE-Immissionen und Vergleich mit der vom selben Standort erzeugten GSM- und UMTS-Immission

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der LTE-Immissionsmessungen an 10 Standorten mit LTE-Mobilfunksendeanlagen nach 26. BImSchV einschließlich Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung dokumentiert. Dabei wurden Anlagen in den Frequenzbereichen 800 MHz (Frequenzbereich der „Digitalen Dividende“), 1,8 GHz und 2,6 GHz untersucht. Die Standorte wurden vom Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW ausgewählt. Als Messmethode kam die Schwenkmethode zum Einsatz. Pro Standort wurden die Messungen an bis zu 6 verschiedenen Messpunkten vorgenommen. Die vom selben Standort zusätzlich ausgehenden GSM- und/oder UMTS-Immissionen wurden mit gemessen und mit den LTE-Immissionen in ihrer Stärke verglichen. An einem der 10 Standorte, der bereits in den Messreihen 2002 [BOR 02] und 2004 [BOR 05] untersucht und inzwischen mit LTE ausgerüstet wurde, wird an demjenigen Messpunkt, der identisch zu 2004 ist, zusätzlich die zeitliche Immissionsentwicklung dokumentiert.

Die Messungen wurden vom 15. Februar 2013 bis zum 20. März 2013 an insgesamt 52 Messpunkten durchgeführt, die sich jeweils bezüglich ihrer Ausrichtung, dem Abstand und den Sichtverhältnissen zur jeweiligen LTE-Anlage unterschieden. Messdurchführende waren Dr. Chr. Bornkessel, M. Neikes und M. Schubert von der IMST GmbH. In der Spalte „GSM/UMTS am selben Standort“ von Tabelle 3.0 wird die Anzahl der am Standort vorhandenen GSM- und/oder UMTS-Systeme spezifiziert, wobei eine GSM- oder UMTS-Anlage eines Betreibers als ein System gezählt wird.

Folgende LTE-Anlagen wurden untersucht:

Lfd. Nr.	Adresse (PLZ, Ort, Straße)	LTE-System	GSM/UMTS am selben Standort?
1	57074 Siegen, Hauptstraße 20	LTE 800 FDD, 10 MHz LTE 2600 FDD, 20 MHz	ja (6 Systeme)
2	59889 Eslohe, Don-Bosco-Straße	LTE 800 FDD, 10 MHz	ja (1 System)
3	40217 Düsseldorf, Kronprinzenstraße 105a	LTE 800 FDD, 10 MHz	ja (4 Systeme)
4	40472 Düsseldorf, Oberrather Straße 45	LTE 1800 FDD, 20 MHz	ja (2 Systeme)
5	32683 Barntrup, Im Wied 2	LTE 800 FDD, 10 MHz	ja (4 Systeme)
6	44137 Dortmund, Kampstraße 106	LTE 1800 FDD, 20 MHz	ja (6 Systeme)
7	48157 Münster, Flugplatz 53	LTE 1800 FDD, 20 MHz	ja (7 Systeme)
8	45130 Essen, Rüttenscheider Stern 5	LTE 1800 FDD, 20 MHz	ja (4 Systeme)
9	47798 Krefeld, Ostwall 165	LTE 800 FDD, 10 MHz	ja (2 Systeme)
10	50668 Köln, Riehler Straße 3	LTE 1800 FDD, 20 MHz	ja (2 Systeme)

Tabelle 3.0: Beschreibung der untersuchten LTE-Standorte

3.1 Beschreibung der Standorte und der Messpunkte

Nachfolgende Tabellen geben einen Überblick über die Ausrichtung der LTE-Sendeantennen und die Lage der Messpunkte. Mit roten Kreisen sind hierbei Einzelmesspunkte und mit gelben Kreisen mehrere in verschiedenen Höhen übereinander liegende Messpunkte gekennzeichnet. Die angegebene Entfernung kennzeichnet den lateralen Abstand vom Messpunkt zur LTE-Sendeanlage.

3.1.1 57074 Siegen, Hauptstraße 20

Messpunkt	Beschreibung	Entfernung zum LTE-Sender	Sichtverbindung	Höhe
1.1	Grundschule Kaan-Marienborn, 1.OG, Raum A205, Bäume im Sichtfeld zur Sendeanlage, am geöffneten Fenster	290 m	eingeschränkt durch Bäume	1. OG
1.2	Grundschule Kaan-Marienborn, EG, Raum A104, Bäume im Sichtfeld zur Sendeanlage, am geöffneten Fenster	290 m	eingeschränkt durch Bäume	EG
1.3	Grundschule Kaan-Marienborn, EG, Raum A10, am geöffneten Fenster	305 m	nein	EG
1.4	Grundschule Kaan-Marienborn, Schulhof	275 m	ja	ebenerdig
1.5	Eisenhüttenstraße, neben Hausnr. 4	85 m	ja	ebenerdig

Tabelle 3.1: Beschreibung der Messpunkte an der LTE-Anlage 1, 57074 Siegen, Hauptstraße 20

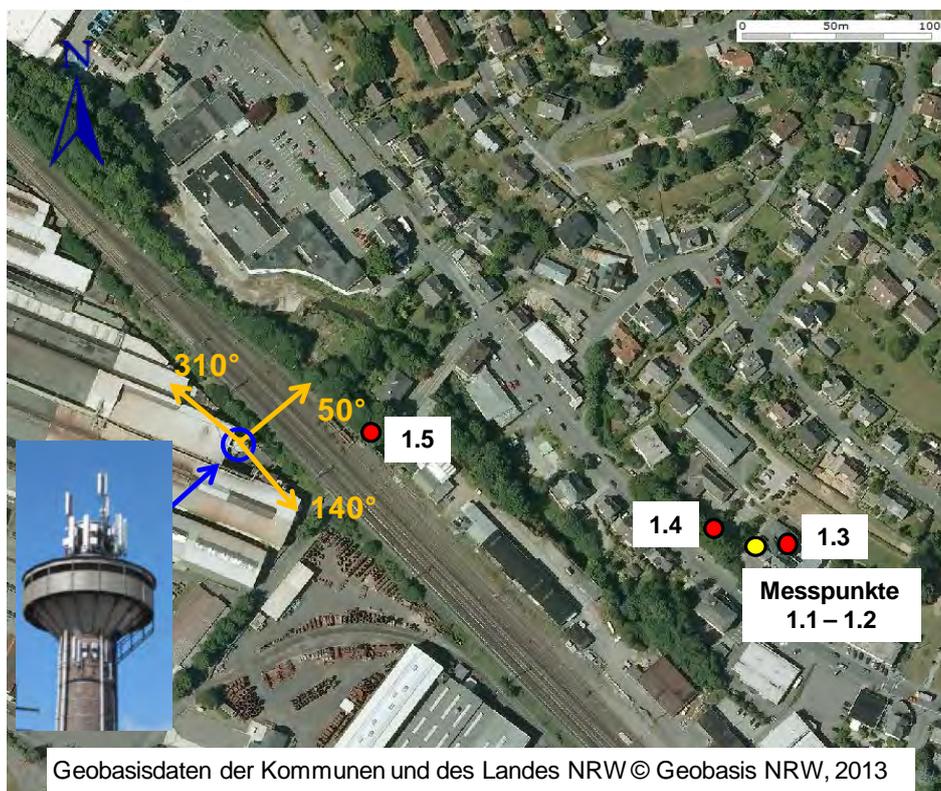


Bild 3.1: Ausrichtung der LTE-Sendeantennen und Lage der Messpunkte an der LTE-Anlage 1, 57074 Siegen, Hauptstraße 20

3.1.2 59889 Eslohe, Don-Bosco-Straße

Messpunkt	Beschreibung	Entfernung zum LTE-Sender	Sichtverbindung	Höhe
2.1	Don-Bosco-Straße, vor der Anlage in Richtung des 220°-Sektors	70 m	ja	ebenerdig
2.2	Don-Bosco-Straße, vor der Anlage in Richtung des 220°-Sektors	40 m	ja	ebenerdig
2.3	Don-Bosco-Straße, direkt unterhalb der Sendeanlage	5 m	ja	ebenerdig
2.4	Ecke Franziskusstraße / Don-Bosco-Str., an der Bushaltestelle	103 m	ja	ebenerdig
2.5	Haupteingang Kirche, Franziskusstraße 11	120 m	nein	ebenerdig

Tabelle 3.2: Beschreibung der Messpunkte an der LTE-Anlage 2, 59889 Eslohe, Don-Bosco-Straße

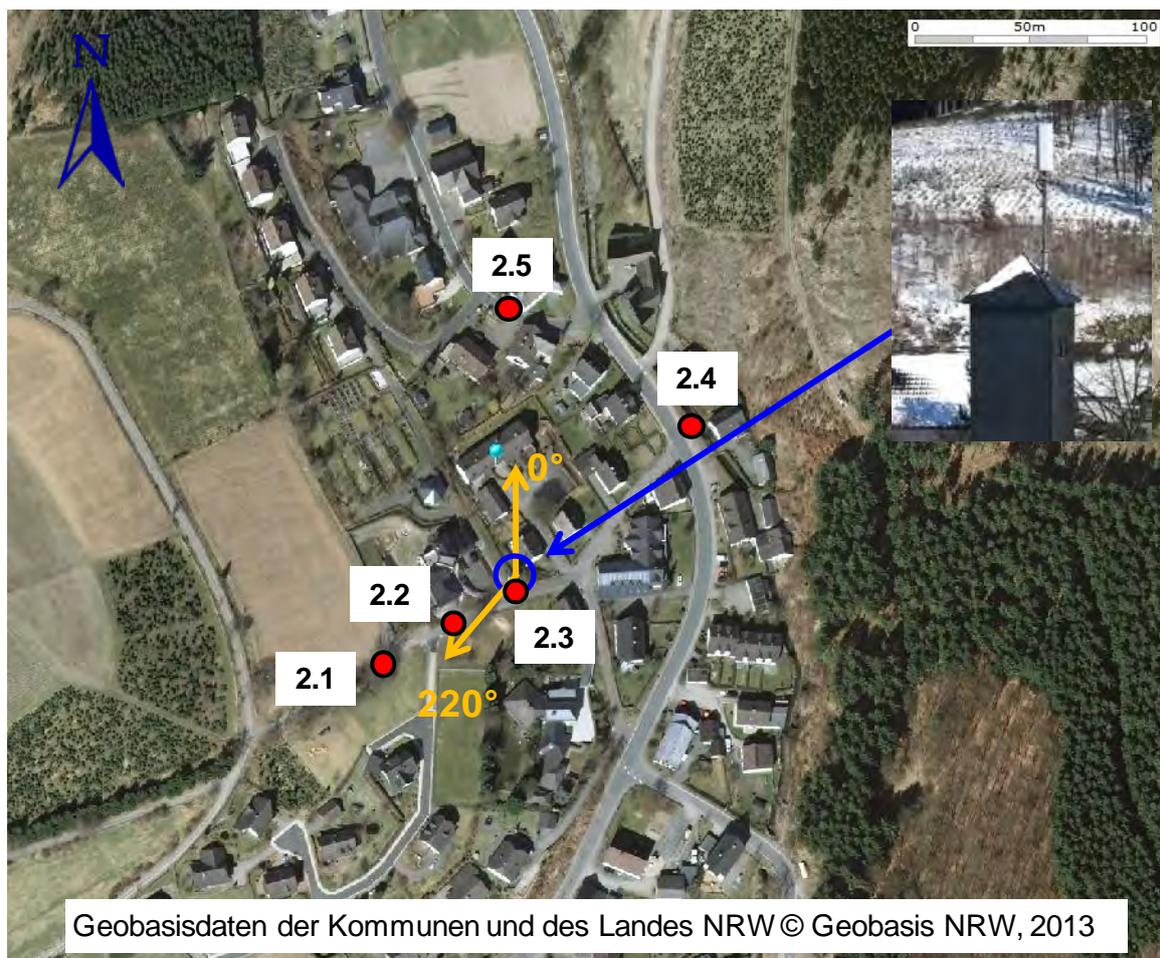


Bild 3.2: Ausrichtung der LTE-Sendeantennen und Lage der Messpunkte an der LTE-Anlage 2, 59889 Eslohe, Don-Bosco-Straße

3.1.3 40217 Düsseldorf, Kronprinzenstraße 105a

Messpunkt	Beschreibung	Entfernung zum LTE-Sender	Sichtverbindung	Höhe
3.1	Kronprinzenschule R15, am offenen Fenster	45 m	nein	2.OG
3.2	Kronprinzenschule, Flur 2.OG, am offenen Fenster	38 m	ja	2.OG
3.3	Kronprinzenschule, Flur 1.OG, am offenen Fenster	38 m	ja	1.OG
3.4	Kronprinzenschule, Flur EG, an offener Tür	38 m	ja	EG
3.5	Kronprinzenschule, Schulhof	60 m	ja	ebenerdig

Tabelle 3.3: Beschreibung der Messpunkte an der LTE-Anlage 3, 40217 Düsseldorf, Kronprinzenstraße 105a

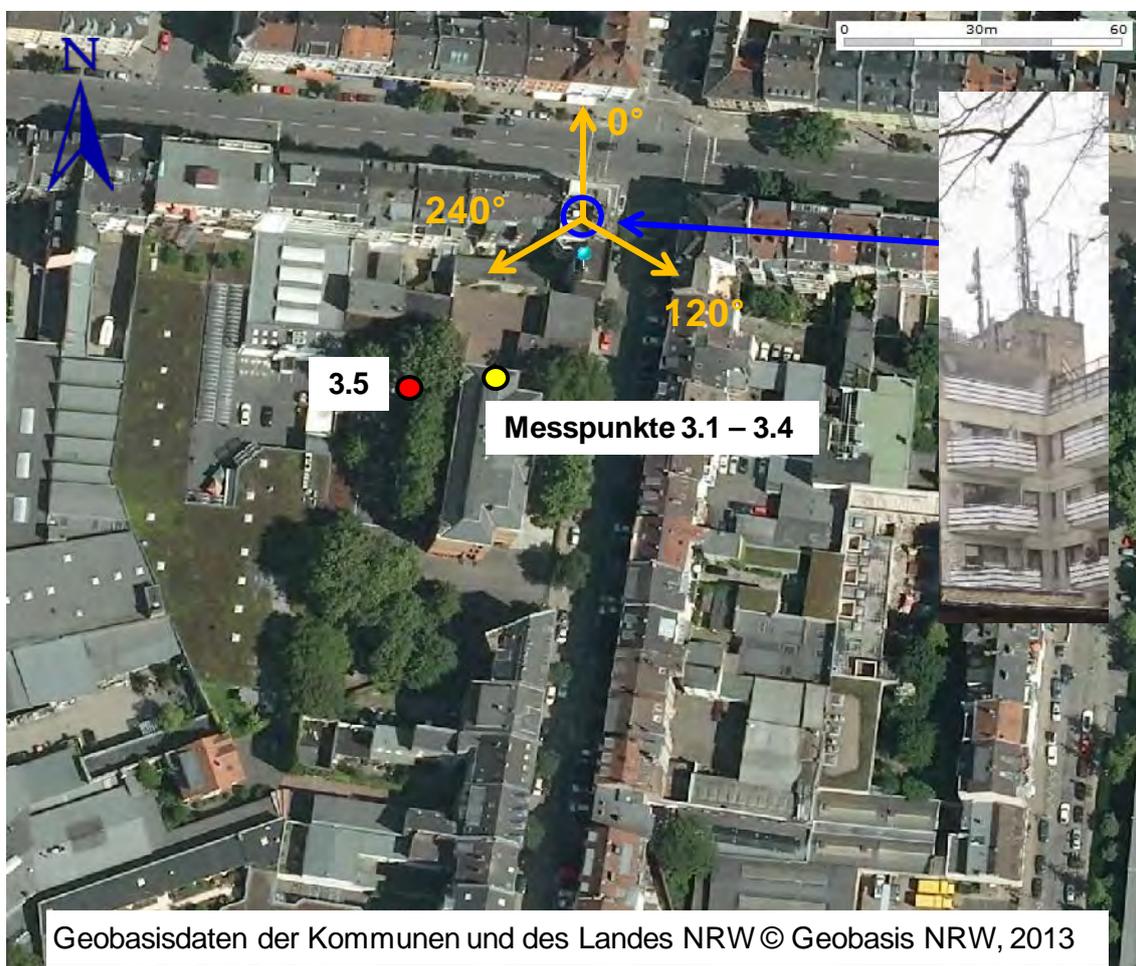


Bild 3.3: Ausrichtung der LTE-Sendeantennen und Lage der Messpunkte an der LTE-Anlage 3, 40217 Düsseldorf, Kronprinzenstraße 105a

3.1.4 40472 Düsseldorf, Oberrather Straße 45

Messpunkt	Beschreibung	Entfernung zum LTE-Sender	Sichtverbindung	Höhe
4.1	Oberrather Straße vor Nr. 45 (unter der Anlage)	5 m	nein	ebenerdig
4.2	Rather Kirchplatz gegenüber Nr. 42	40 m	ja	ebenerdig
4.3	Rather Kirchplatz gegenüber Nr. 3 (Kirchentreppe)	72 m	ja	ebenerdig
4.4	Rather Kirchplatz gegenüber Nr. 7	100 m	ja	ebenerdig
4.5	Rather Kirchplatz, Seiteneingang Jugendheim	147 m	ja	ebenerdig

Tabelle 3.4: Beschreibung der Messpunkte an der LTE-Anlage 4, 40472 Düsseldorf, Oberrather Straße 45

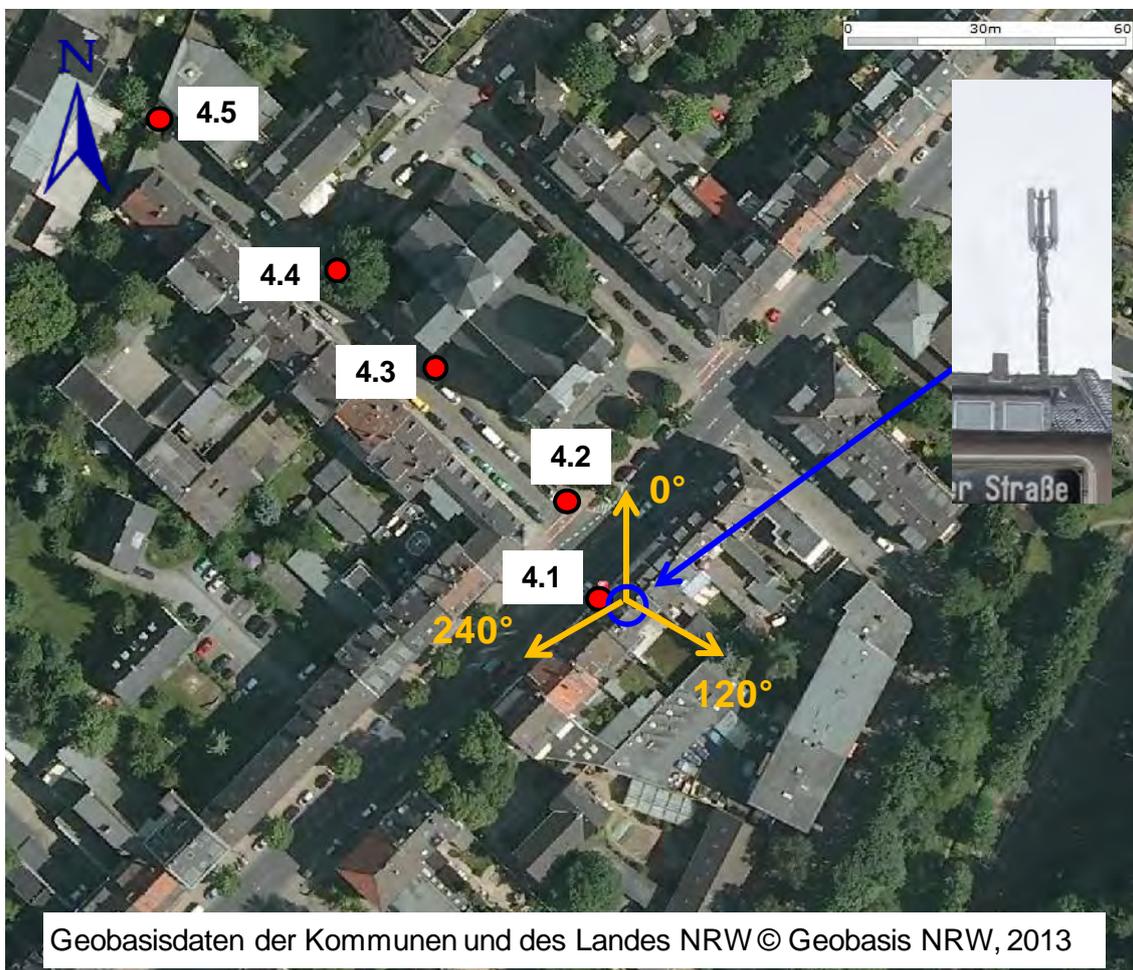


Bild 3.4: Ausrichtung der LTE-Sendeantennen und Lage der Messpunkte an der LTE-Anlage 4, 40472 Düsseldorf, Oberrather Straße 45

3.1.5 32683 Barntrup, Im Wied 2

Messpunkt	Beschreibung	Entfernung zum LTE-Sender	Sichtverbindung	Höhe
5.1	Im Wied 2; unterhalb der Anlage	4 m	ja	ebenerdig
5.2	Erlenweg vor Hausnr. 8	210 m	ja	ebenerdig
5.3	DRK-Familienzentrum Barntrup, Tageseinrichtung für Kinder, Holstenkamp 3, Gruppenraum „Gänseblümchen“, an offener Tür	375 m	eingeschränkt durch Bäume	EG
5.4	DRK-Familienzentrum Barntrup, Tageseinrichtung für Kinder, Holstenkamp 3, Nebenraum Gruppenraum „Mäusegruppe“, am offenen Fenster	420 m	nein	EG
5.5	DRK-Familienzentrum Barntrup, Tageseinrichtung für Kinder, Holstenkamp 3, Außengelände	391 m	eingeschränkt durch Bäume	ebenerdig
5.6	Schulzentrum, Holstenkamp, vor Haltestelle 3	580 m	ja	ebenerdig

Tabelle 3.5: Beschreibung der Messpunkte an der LTE-Anlage 5, 32683 Barntrup, Im Wied 2

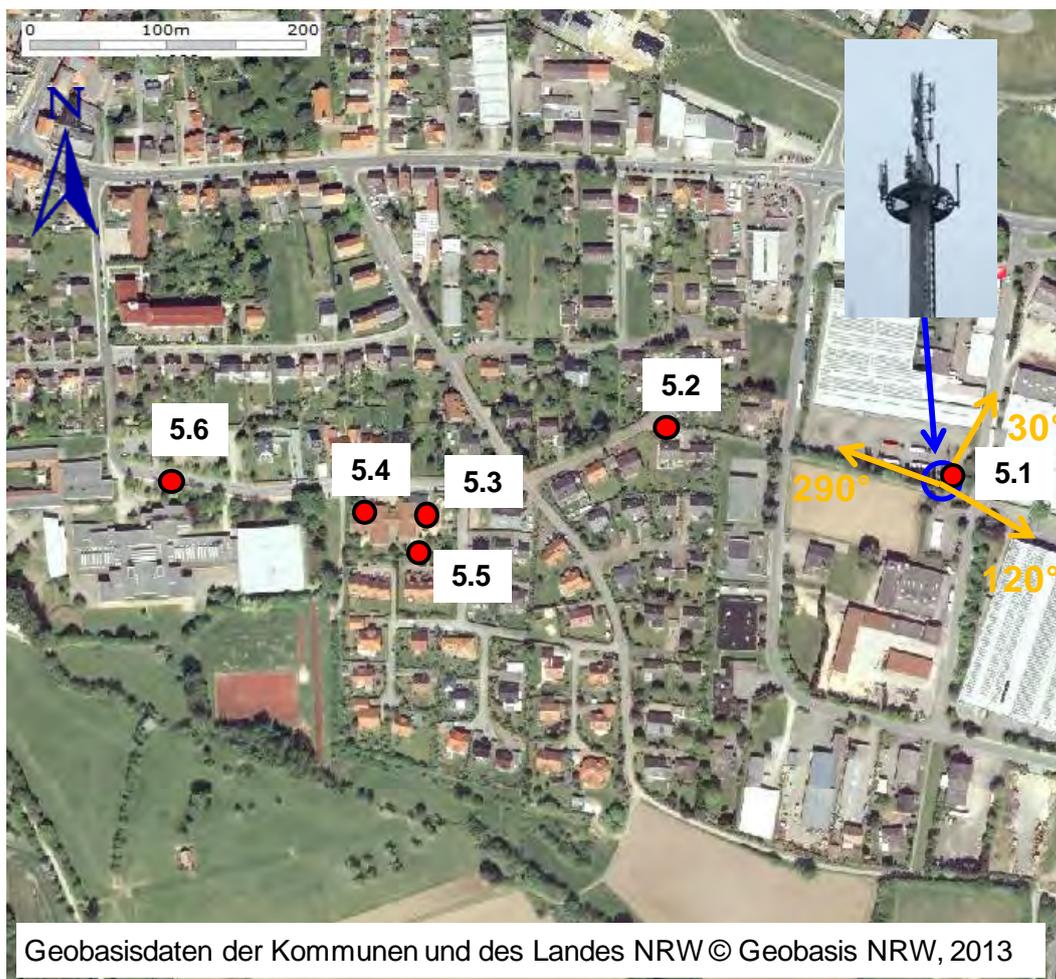


Bild 3.5: Ausrichtung der LTE-Sendeantennen und Lage der Messpunkte an der LTE-Anlage 5, 32683 Barntrup, Im Wied 2

3.1.6 44137 Dortmund, Kampstraße 106

Messpunkt	Beschreibung	Entfernung zum LTE-Sender	Sichtverbindung	Höhe
6.1	Ecke Westenhellweg / Grafenhof	90 m	ja*	ebenerdig
6.2	Ecke Westenhellweg / Martinstraße	163 m	ja	ebenerdig
6.3	Ecke Westenhellweg / Potgasse	234 m	ja*	ebenerdig
6.4	Ecke Westenhellweg / Kolpingstraße	365 m	ja	ebenerdig
6.5	Ecke Westenhellweg / Mönchenwordt	450 m	nein	ebenerdig

*es bestand lediglich Sicht auf die Antennenebene mit LTE und GSM 900, nicht aber zu UMTS

Tabelle 3.6: Beschreibung der Messpunkte an der LTE-Anlage 6, 44137 Dortmund, Kampstraße 106

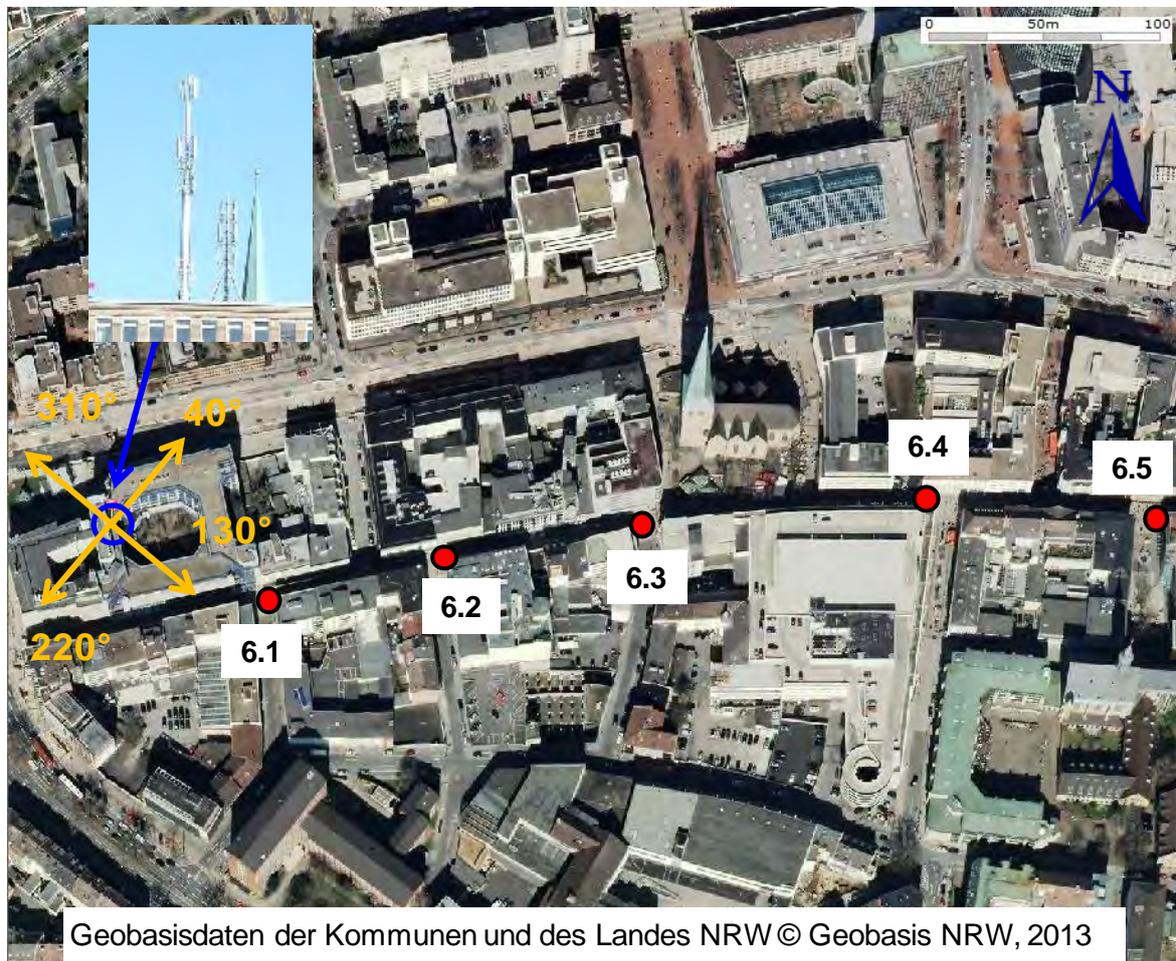


Bild 3.6: Ausrichtung der LTE-Sendeantennen und Lage der Messpunkte an der LTE-Anlage 6, 44137 Dortmund, Kampstraße 106

3.1.7 48157 Münster, Flugplatz 53

Messpunkt	Beschreibung	Entfernung zum LTE-Sender	Sichtverbindung	Höhe
7.1	Vinzenzwerk Handorf e.V., Gebäude "Wolkenburg", Küche, am offenen Fenster	115 m	eingeschränkt durch Bäume	EG
7.2	Vinzenzwerk Handorf e.V., Spielplatz (Nähe Seilbahn), ebenerdig, LOS, 88 m, 12,2°	88 m	ja	ebenerdig
7.3	Vinzenzwerk Handorf e.V., Haupthaus, Treppenhaus 2	unterhalb	nein	2.OG
7.4	Vinzenzwerk Handorf e.V., Haupthaus, Treppenhaus 2	unterhalb	nein	1.OG
7.5	Vinzenzwerk Handorf e.V., Haupthaus, Treppenhaus 2	unterhalb	nein	EG

Tabelle 3.7: Beschreibung der Messpunkte an der LTE-Anlage 7, 48157 Münster, Flugplatz 53

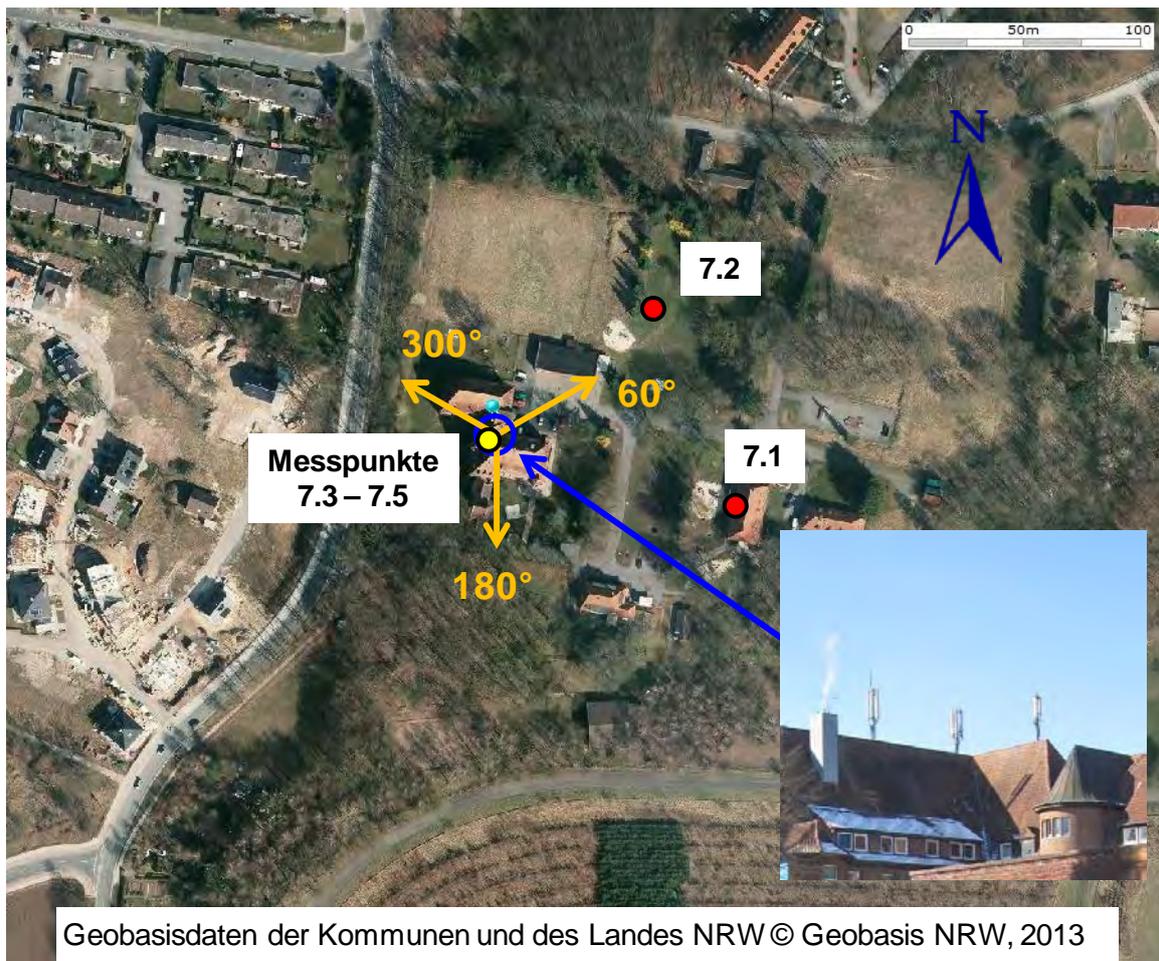


Bild 3.7: Ausrichtung der LTE-Sendeantennen und Lage der Messpunkte an der LTE-Anlage 7, 48157 Münster, Flugplatz 53

3.1.8 45130 Essen, Rüttenscheider Stern 5

Messpunkt	Beschreibung	Entfernung zum LTE-Sender	Sichtverbindung	Höhe
8.1	Ecke Rüttenscheider Platz / Isabella Straße	160 m	ja	ebenerdig
8.2	Ecke Dohmanns Kamp / Klarastraße	160 m	ja	ebenerdig
8.3	Suthers Garten vor Nr. 19	160 m	nein	ebenerdig
8.4	Ecke Rüttenscheider Straße / Annastraße	160 m	nein	ebenerdig
8.5	Bertoldsstraße vor Nr. 14	160 m	nein	ebenerdig

Tabelle 3.8: Beschreibung der Messpunkte an der LTE-Anlage 8, 45130 Essen, Rüttenscheider Stern 5

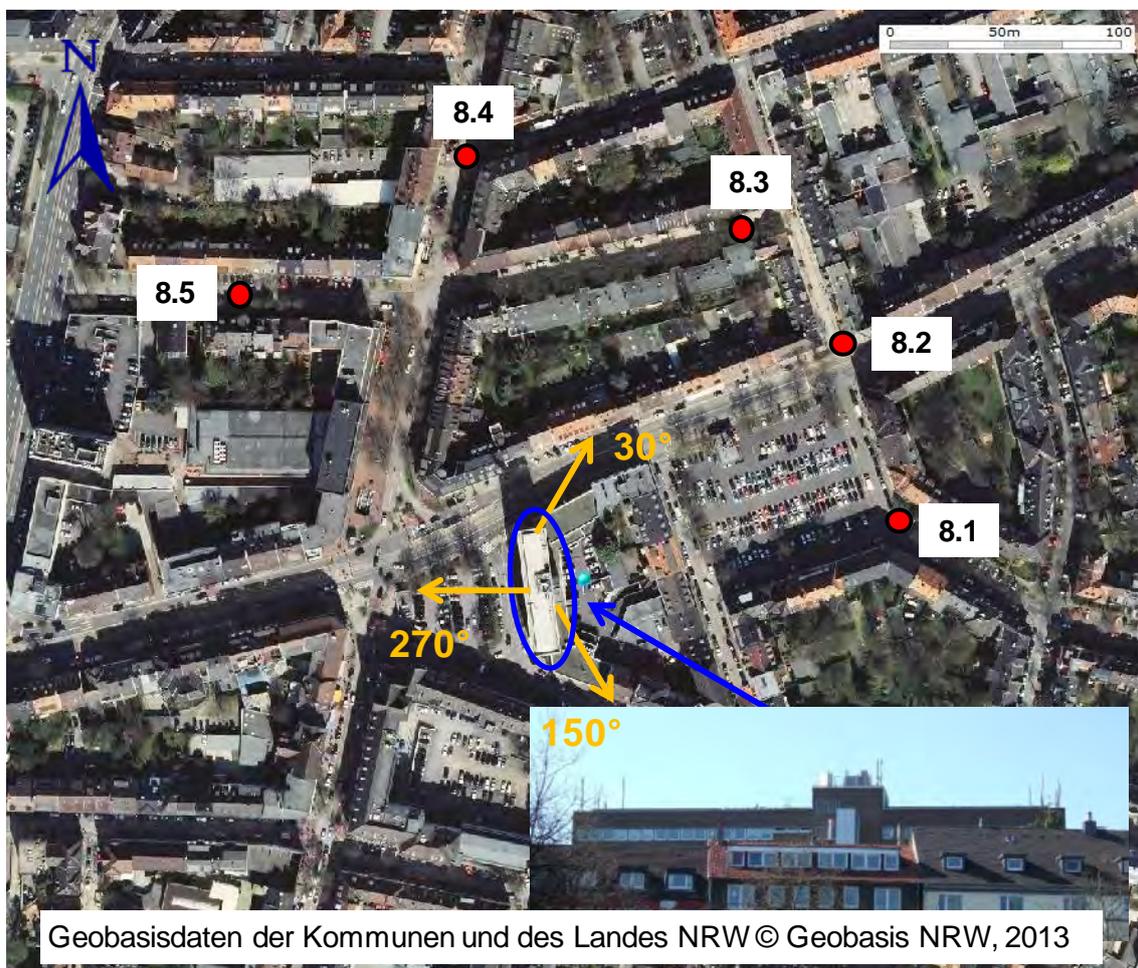


Bild 3.8: Ausrichtung der LTE-Sendeantennen und Lage der Messpunkte an der LTE-Anlage 8, 45130 Essen, Rüttenscheider Stern 5

3.1.9 47798 Krefeld, Ostwall 165

Messpunkt	Beschreibung	Entfernung zum LTE-Sender	Sichtverbindung	Höhe
9.1	Ecke Neue Linner Straße / Petersstraße	170 m	nein	ebenerdig
9.2	Ecke Neue Linner Straße / Ostwall	130 m	ja	ebenerdig
9.3	Ostwall vor Nr. 131	125 m	nein	ebenerdig
9.4	Neue Linner Straße vor Nr. 76	130 m	nein	ebenerdig
9.5	Ecke Neue Linner Straße / Luisenstraße	155 m	nein	ebenerdig

Tabelle 3.9: Beschreibung der Messpunkte an der LTE-Anlage 9, 47798 Krefeld, Ostwall 165

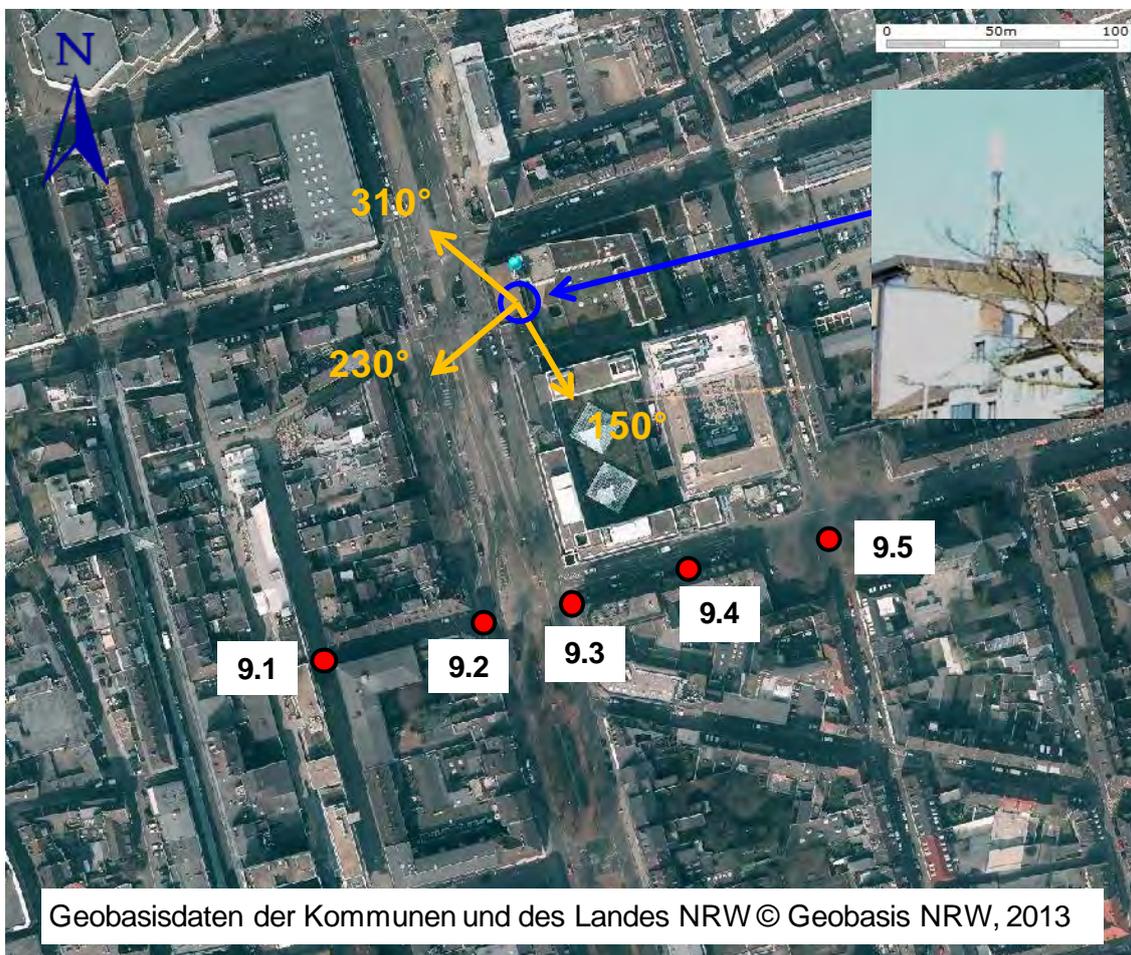


Bild 3.9: Ausrichtung der LTE-Sendeantennen und Lage der Messpunkte an der LTE-Anlage 9, 47798 Krefeld, Ostwall 165

3.1.10 50668 Köln, Riehler Straße 3

Messpunkt	Beschreibung	Entfernung zum LTE-Sender	Sichtverbindung	Höhe
10.1	Domstraße vor Nr. 60	375 m	nein	ebenerdig
10.2	Ecke Domstraße / Dagobertstraße	330 m	nein	ebenerdig
10.3	Domstraße vor Nr. 74	275 m	nein	ebenerdig
10.4	Domstraße vor Nr. 84	224 m	ja	ebenerdig
10.5	Ecke Domstraße / Theodor-Heuss-Ring	150 m	ja	ebenerdig
10.6	Ecke Riehler Straße / Hansaring (Ebertplatz)	77 m	ja	ebenerdig

Tabelle 3.10: Beschreibung der Messpunkte an der LTE-Anlage 10, 50668 Köln, Riehler Straße 3

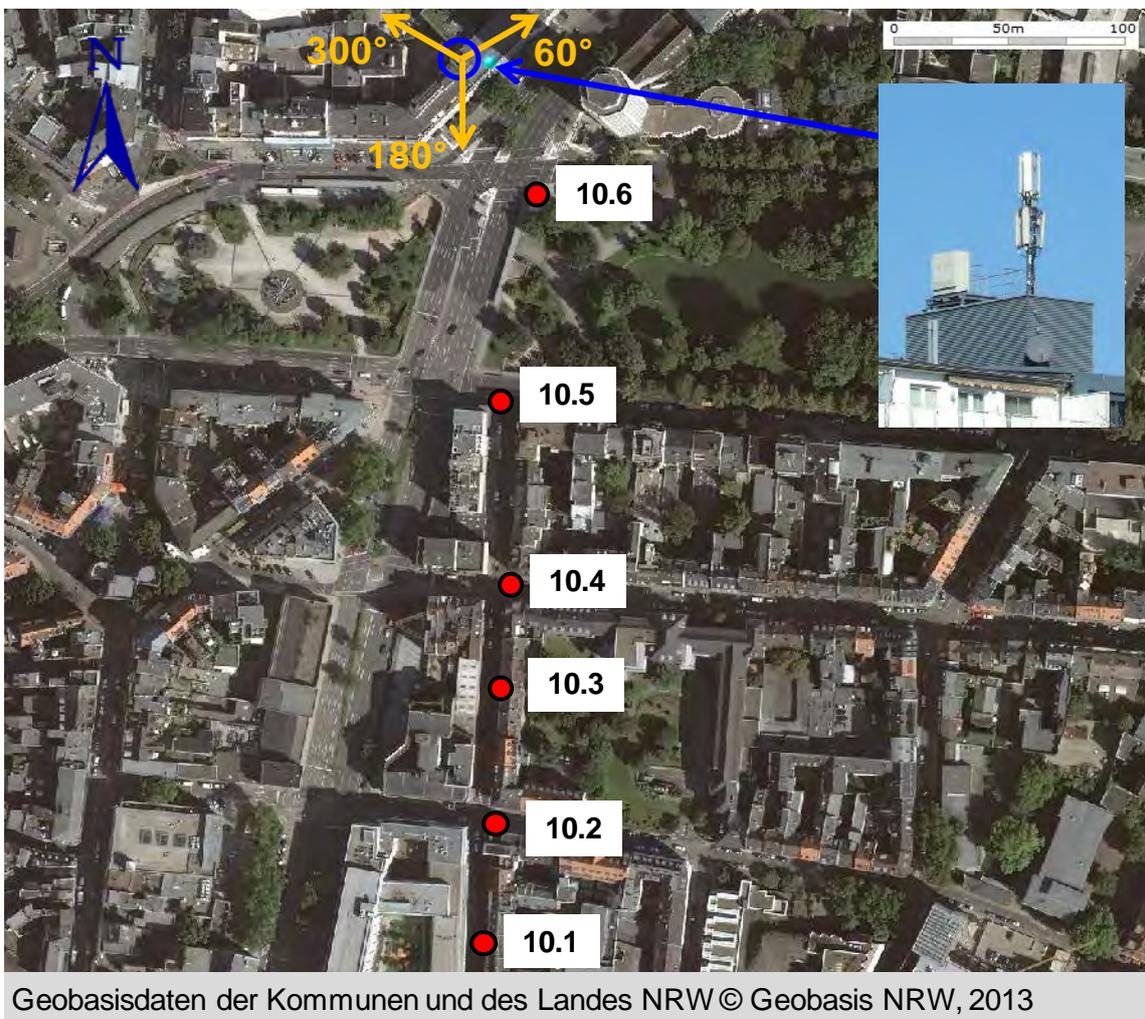


Bild 3.10: Ausrichtung der LTE-Sendeantennen und Lage der Messpunkte an der LTE-Anlage 10, 50668 Köln, Riehler Straße 3

3.2 Ergebnisse: Mobilfunk

In den Tabellen 3.11 bis 3.20 sind die im Umfeld der 10 untersuchten LTE-Standorte gemessenen und gemäß Beschreibung in Abschnitt 2.1 ausgewerteten LTE-Immissionswerte dargestellt. Die Immissionen vom am selben Standort installierten GSM- und UMTS-Mobilfunkanlagen sind den Immissionen durch die LTE-Anlage gegenüber gestellt.

Angegeben ist jeweils die *Maximalimmission* für Vollausbau und Vollausslastung der Station. Dieser tritt auf, wenn die Anlagen gemäß der BNetzA-Standortbescheinigung voll ausgebaut sind und gerade den maximal möglichen Telefon- bzw. Datenverkehr mit größtmöglicher Sendeleistung abwickeln. Für eine Beurteilung der gemessenen Immissionen bezüglich der Grenzwerte der 26. BImSchV ist die Maximalimmission relevant. In der Realität ist die Immission je nach momentaner Auslastung und Ausbau der Stationen geringer als die angegebene Maximalimmission.

In den Tabellen sind die Immissionen als elektrische Feldstärkewerte in V/m sowie in Prozent des Feldstärke-Grenzwertes der 26. BImSchV dargestellt.

3.2.1 57074 Siegen, Hauptstraße 20

Messpunkt	Immission durch LTE		Immission durch GSM und UMTS am Standort		Gesamtmission Mobilfunk am Standort	
	Elektrische Feldstärke		Elektrische Feldstärke		Elektrische Feldstärke	
	in V/m	in % vom Grenzwert	in V/m	in % vom Grenzwert	in V/m	in % vom Grenzwert
1.1	0,33	0,71	0,58	1,19	0,67	1,39
1.2	0,39	0,80	0,56	1,10	0,68	1,36
1.3	0,05	0,11	0,06	0,13	0,07	0,17
1.4	0,60	1,37	0,82	1,75	1,01	2,23
1.5	0,71	1,37	1,36	2,44	1,54	2,80

Tabelle 3.11: Festgestellte LTE-, GSM/UMTS- und Gesamtmissionen an den Messpunkten der LTE-Anlage 1, 57074 Siegen, Hauptstraße 20

3.2.2 59889 Eslohe, Don-Bosco-Straße

Mess- punkt	Immission durch LTE		Immission durch GSM und UMTS am Standort		Gesamtmission Mobilfunk am Standort	
	Elektrische Feldstärke		Elektrische Feldstärke		Elektrische Feldstärke	
	in V/m	in % vom Grenzwert	in V/m	in % vom Grenzwert	in V/m	in % vom Grenzwert
2.1	5,50	14,24	4,09	9,82	6,85	17,30
2.2	4,14	10,73	2,37	5,67	4,77	12,14
2.3	1,58	4,09	0,93	2,30	1,85	4,69
2.4	0,45	1,18	0,57	1,36	0,73	1,80
2.5	0,18	0,47	0,15	0,35	0,23	0,59

Tabelle 3.12: Festgestellte LTE-, GSM/UMTS- und Gesamtmissionen an den Messpunkten der LTE-Anlage 2, 59889 Eslohe, Don-Bosco-Straße

3.2.3 40217 Düsseldorf, Kronprinzenstraße 105a

Mess- punkt	Immission durch LTE		Immission durch GSM und UMTS am Standort		Gesamtmission Mobilfunk am Standort	
	Elektrische Feldstärke		Elektrische Feldstärke		Elektrische Feldstärke	
	in V/m	in % vom Grenzwert	in V/m	in % vom Grenzwert	in V/m	in % vom Grenzwert
3.1	0,45	1,15	0,43	0,78	0,62	1,39
3.2	0,51	1,33	2,43	5,05	2,49	5,22
3.3	0,51	1,33	3,53	6,28	3,56	6,42
3.4	0,51	1,31	2,58	4,47	2,62	4,66
3.5	0,67	1,73	1,96	4,20	2,07	4,54

Tabelle 3.13: Festgestellte LTE-, GSM/UMTS- und Gesamtmissionen an den Messpunkten der LTE-Anlage 3, 40217 Düsseldorf, Kronprinzenstraße 105a

3.2.4 40472 Düsseldorf, Oberrather Straße 45

Mess- punkt	Immission durch LTE		Immission durch GSM und UMTS am Standort		Gesamtmission Mobilfunk am Standort	
	Elektrische Feldstärke		Elektrische Feldstärke		Elektrische Feldstärke	
	in V/m	in % vom Grenzwert	in V/m	in % vom Grenzwert	in V/m	in % vom Grenzwert
4.1	0,40	0,69	0,42	0,84	0,58	1,09
4.2	1,07	1,83	1,17	2,33	1,58	2,96
4.3	0,60	1,03	1,15	2,51	1,29	2,71
4.4	0,96	1,64	0,98	1,99	1,37	2,58
4.5	1,58	2,70	1,10	2,04	1,92	3,38

Tabelle 3.14: Festgestellte LTE-, GSM/UMTS- und Gesamtmissionen an den Messpunkten der LTE-Anlage 4, 40472 Düsseldorf, Oberrather Straße 45

3.2.5 32683 Barntrup, Im Wied 2

Mess- punkt	Immission durch LTE		Immission durch GSM und UMTS am Standort		Gesamtmission Mobilfunk am Standort	
	Elektrische Feldstärke		Elektrische Feldstärke		Elektrische Feldstärke	
	in V/m	in % vom Grenzwert	in V/m	in % vom Grenzwert	in V/m	in % vom Grenzwert
5.1	0,52	1,34	2,06	4,07	2,12	4,28
5.2	1,00	2,59	1,35	3,15	1,68	4,08
5.3	0,26	0,67	0,71	1,61	0,75	1,75
5.4	0,02	0,05	0,07	0,15	0,07	0,16
5.5	0,26	0,68	0,50	1,09	0,57	1,28
5.6	0,62	1,61	0,97	1,97	1,16	2,55

Tabelle 3.15: Festgestellte LTE-, GSM/UMTS- und Gesamtmissionen an den Messpunkten der LTE-Anlage 5, 32683 Barntrup, Im Wied 2

3.2.6 44137 Dortmund, Kampstraße 106

Messpunkt	Immission durch LTE		Immission durch GSM und UMTS am Standort		Gesamtmission Mobilfunk am Standort	
	Elektrische Feldstärke		Elektrische Feldstärke		Elektrische Feldstärke	
	in V/m	in % vom Grenzwert	in V/m	in % vom Grenzwert	in V/m	in % vom Grenzwert
6.1	0,16	0,27	0,77	1,77	0,78	1,79
6.2	0,17	0,30	0,90	2,05	0,92	2,07
6.3	0,15	0,25	0,73	1,43	0,75	1,45
6.4	0,84	1,43	1,07	1,98	1,36	2,45
6.5	0,15	0,26	0,26	0,54	0,30	0,60

Tabelle 3.16: Festgestellte LTE-, GSM/UMTS- und Gesamtmissionen an den Messpunkten der LTE-Anlage 6, 44137 Dortmund, Kampstraße 106

3.2.7 48157 Münster, Flugplatz 53

Messpunkt	Immission durch LTE		Immission durch GSM und UMTS am Standort		Gesamtmission Mobilfunk am Standort	
	Elektrische Feldstärke		Elektrische Feldstärke		Elektrische Feldstärke	
	in V/m	in % vom Grenzwert	in V/m	in % vom Grenzwert	in V/m	in % vom Grenzwert
7.1	0,23	0,40	0,77	1,71	0,80	1,76
7.2	0,36	0,62	1,77	3,53	1,81	3,58
7.3	0,39	0,67	1,44	2,96	1,49	3,04
7.4	0,17	0,29	0,75	1,64	0,77	1,66
7.5	0,12	0,20	0,38	0,83	0,39	0,86

Tabelle 3.17: Festgestellte LTE-, GSM/UMTS- und Gesamtmissionen an den Messpunkten der LTE-Anlage 7, 48157 Münster, Flugplatz 53

3.2.8 45130 Essen, Rüttenscheider Stern 5

Mess- punkt	Immission durch LTE		Immission durch GSM und UMTS am Standort		Gesamtimmission Mobilfunk am Standort	
	Elektrische Feldstärke		Elektrische Feldstärke		Elektrische Feldstärke	
	in V/m	in % vom Grenzwert	in V/m	in % vom Grenzwert	in V/m	in % vom Grenzwert
8.1	0,10	0,17	2,61	5,76	2,61	5,76
8.2	0,14	0,23	1,33	2,98	1,33	2,98
8.3	0,23	0,40	0,59	1,26	0,63	1,32
8.4	0,11	0,18	0,58	1,16	0,59	1,18
8.5	0,04	0,07	0,19	0,36	0,19	0,37

Tabelle 3.18: Festgestellte LTE-, GSM/UMTS- und Gesamtimmissionen an den Messpunkten der LTE-Anlage 8, 45130 Essen, Rüttenscheider Stern 5

3.2.9 47798 Krefeld, Ostwall 165

Mess- punkt	Immission durch LTE		Immission durch GSM und UMTS am Standort		Gesamtimmission Mobilfunk am Standort	
	Elektrische Feldstärke		Elektrische Feldstärke		Elektrische Feldstärke	
	in V/m	in % vom Grenzwert	in V/m	in % vom Grenzwert	in V/m	in % vom Grenzwert
9.1	0,17	0,45	0,14	0,34	0,22	0,56
9.2	1,79	4,65	0,36	0,79	1,83	4,72
9.3	0,40	1,05	0,18	0,39	0,44	1,12
9.4	0,23	0,59	0,05	0,12	0,23	0,60
9.5	0,08	0,21	0,06	0,15	0,10	0,26

Tabelle 3.19: Festgestellte LTE-, GSM/UMTS- und Gesamtimmissionen an den Messpunkten der LTE-Anlage 9, 47798 Krefeld, Ostwall 165

3.2.10 50668 Köln, Riehler Straße 3

Mess- punkt	Immission durch LTE		Immission durch GSM und UMTS am Standort		Gesamtmission Mobilfunk am Standort	
	Elektrische Feldstärke		Elektrische Feldstärke		Elektrische Feldstärke	
	in V/m	in % vom Grenzwert	in V/m	in % vom Grenzwert	in V/m	in % vom Grenzwert
10.1	0,11	0,19	0,20	0,41	0,23	0,45
10.2	0,13	0,22	0,28	0,57	0,30	0,61
10.3	0,28	0,48	1,05	1,92	1,08	1,97
10.4	0,94	1,62	2,16	4,51	2,36	4,79
10.5	0,26	0,45	1,92	4,57	1,94	4,59
10.6	0,25	0,42	1,49	3,52	1,51	3,54

Tabelle 3.20: Festgestellte LTE-, GSM/UMTS- und Gesamtmissionen an den Messpunkten der LTE-Anlage 10, 50668 Köln, Riehler Straße 3

3.3 Statistische Auswertung der Immissionsmessungen

Im nachfolgenden Abschnitt werden die an den 52 Messpunkten gemessenen Immissionen im Hinblick auf verschiedene Aspekte wie Abhängigkeit vom Abstand, Höhe, Sichtverhältnisse usw. ausgewertet.

Die Tabelle 3.21 und die Bilder 3.11 und 3.12 geben einen Überblick über die Verteilung der gemessenen LTE-Immissionen bezüglich der Ausschöpfung der Feldstärkegrenzwerte der 26. BImSchV. Angegeben ist jeweils die Maximalimmission für den bei der Bundesnetzagentur beantragten maximalen Ausbauzustand der Anlage bei maximaler Sendeleistung. Im Realbetrieb liegen die Immissionen unter den hier dargestellten Werten. Die Grenzwerte der 26. BImSchV werden an allen Messpunkten eingehalten bzw. unterschritten.

Elektrische Feldstärke [% vom Grenzwert]	LTE	GSM / UMTS	Mobilfunk gesamt
Maximalwert	14,2	9,8	17,3
Minimalwert	0,05	0,12	0,16
Spannbreite [dB]	48,8	38,2	40,6
Medianwert	0,68	1,76	2,02

Tabelle 3.21: Übersicht über die gemessenen Immissionen an den 52 Messpunkten

Die höchsten LTE-Immissionen wurden am Messpunkt 2.1 mit 14,2 % des Feldstärke-Grenzwertes der 26. BImSchV festgestellt. Dieser Maximalwert wurde an einer Anlage mit nur einem Betreiber erreicht. Durch den ansteigenden Geländeverlauf gelangte man hier in 70 m Entfernung bereits in die vertikale Hauptstrahlrichtung der Anlage (s. Bild 2.1).

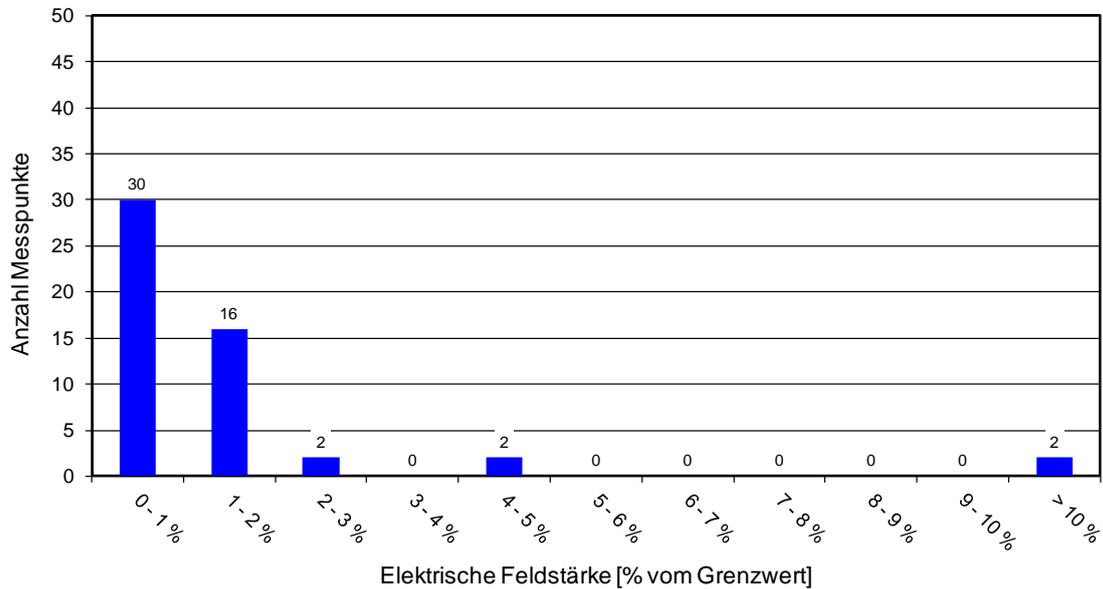


Bild 3.11: Verteilung der gemessenen LTE-Immissionen bezüglich der Ausschöpfung der Feldstärkegrenzwerte der 26. BImSchV.

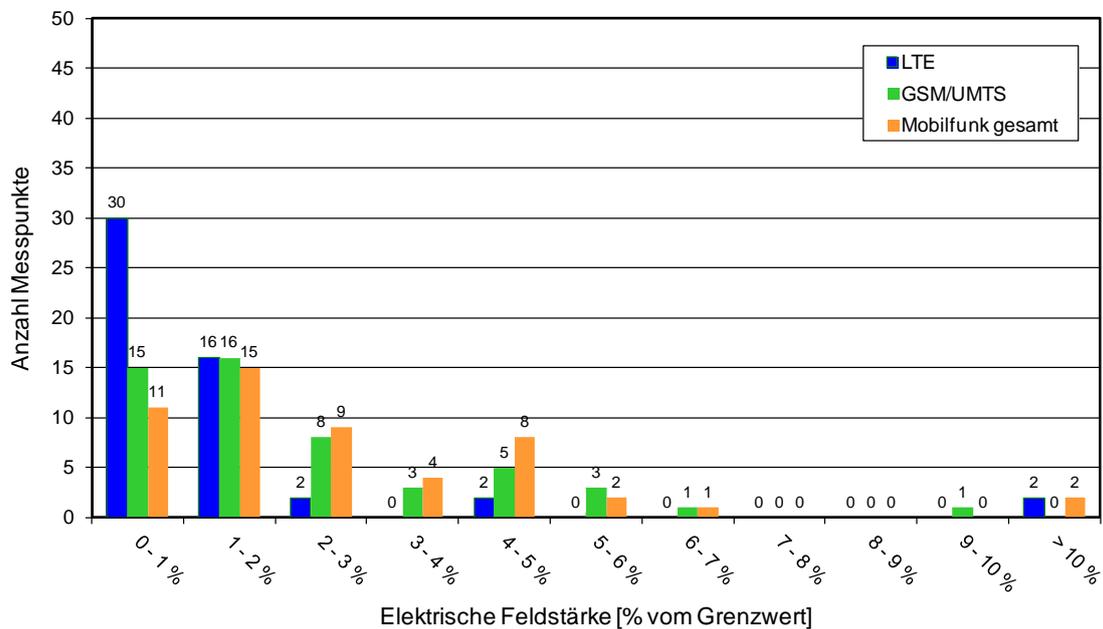


Bild 3.12: Verteilung der gemessenen LTE-Immissionen im Vergleich zu den GSM-/UMTS-Immissionen bezüglich der Ausschöpfung der Feldstärkegrenzwerte der 26. BImSchV.

Die Bilder 3.12 und 3.13 zeigen das Verhältnis von LTE-Immissionen einerseits und GSM-/UMTS-Immissionen andererseits in einem Verteilungs- und einem Absolutwertdiagramm. An 11 der 52 Messpunkte war die Ausschöpfung der Feldstärkegrenzwerte für LTE größer als für GSM und UMTS. Leistungsbezogen ergab sich an den untersuchten Standorten ein Medianwert der Immissionssteigerung von 27% durch die Inbetriebnahme von LTE.

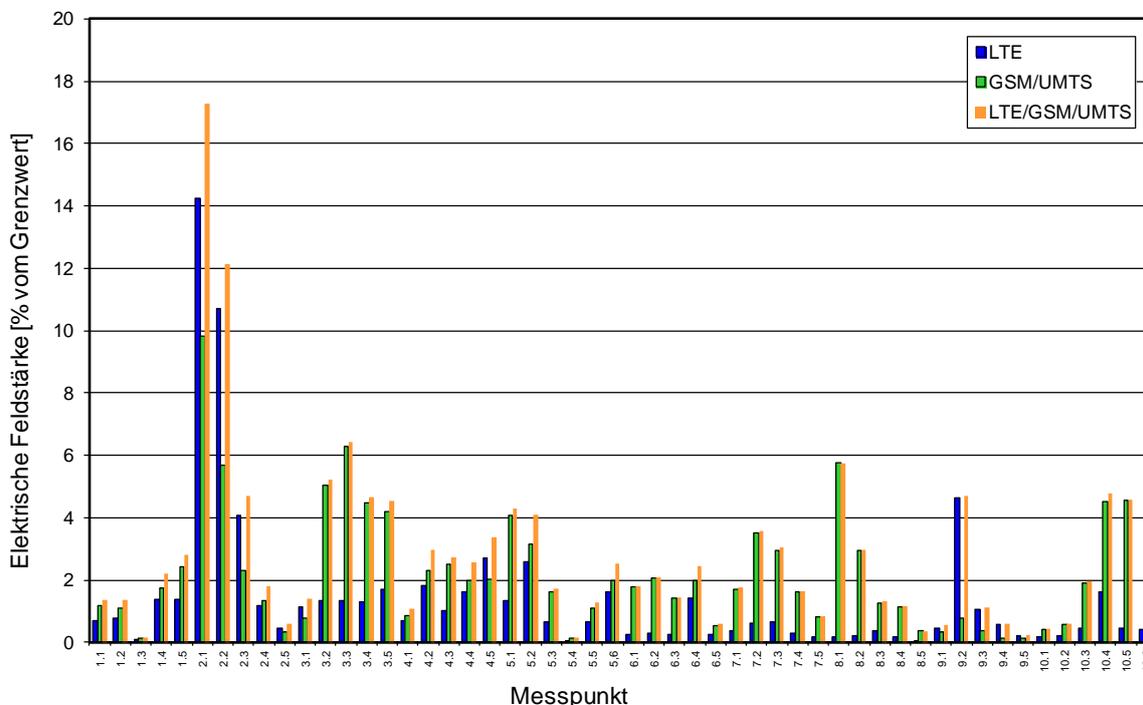


Bild 3.13: Vergleich der gemessenen Immissionen an den einzelnen Messpunkten bezüglich der unterschiedlichen Funkdienste (Ausschöpfung der Feldstärkegrenzwerte der 26. BImSchV)

3.4 Abstandsverhalten

Im nachfolgenden Abschnitt wird das Abstandsverhalten der gemessenen Immissionen näher beleuchtet. Hierzu sind im folgenden Bild zunächst einmal die LTE-Immissionen aller Messpunkte mit Sicht (ohne diejenigen mit eingeschränkter Sicht durch Bäume) zur entsprechenden Sendeanlage in Abhängigkeit des lateralen Abstandes bis 300 m dargestellt.

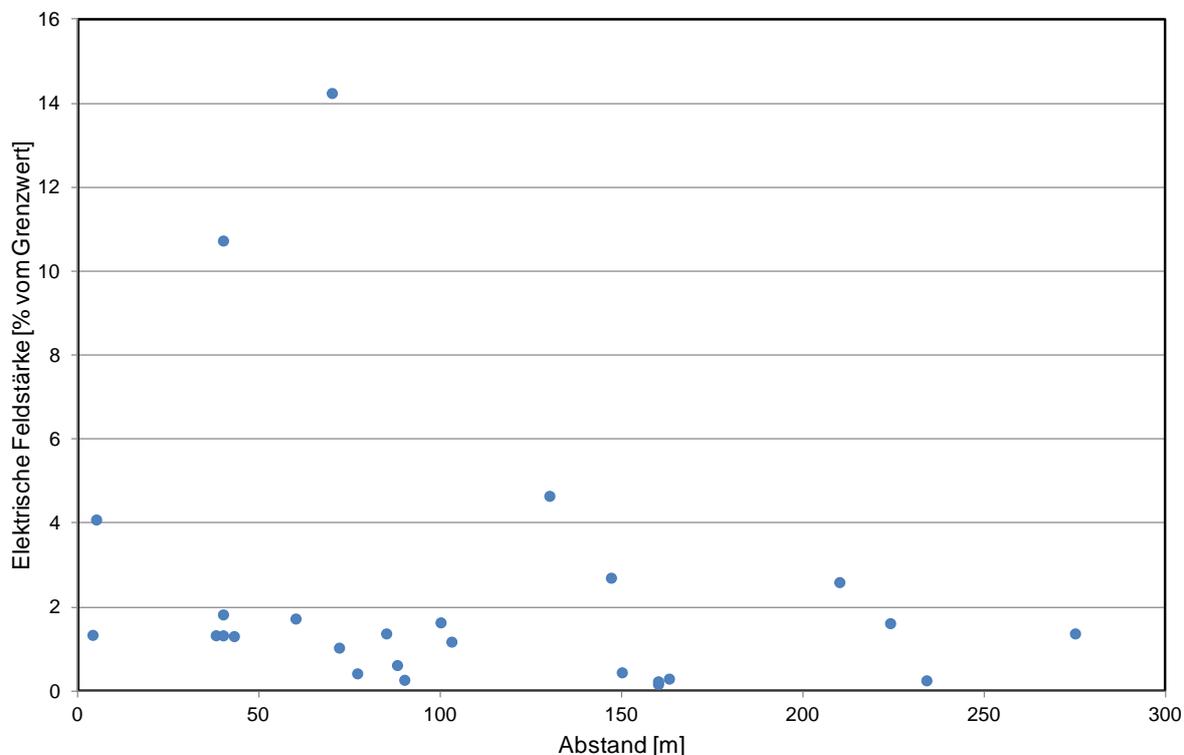


Bild 3.14: LTE-Immissionen in Abhängigkeit des jeweiligen Abstandes zur Sendeanlage; alle Messpunkte mit Sicht zur Sendeanlage

Das obige Bild zeigt deutlich, dass der Abstand zur Sendeanlage kein geeignetes Kriterium für die Beurteilung der LTE-Immission darstellt. Es ist kein gleichmäßiger Anstieg der Immission in Richtung der Mobilfunkanlage zu erkennen. Bei kurzen lateralen Abständen von 5 m liegen die Immissionen unter denen, die teilweise bei größeren Abständen gemessen wurden.

In den folgenden zwei Bildern sind zur Untermauerung, dass der Abstand kein geeignetes Kriterium darstellt, die Abstandsverläufe der Immissionen an zwei Sendestandorten (Messort 6 und Messort 10) dargestellt. Durch die stationsgenaue Untersuchung werden verzerrende Einflüsse der Einbeziehung verschiedener Anlagen mit ihren individuellen Abstandsverläufen in einem Diagramm vermieden. Zu berücksichtigen ist hierbei, dass in Bild 3.15 der letzte sowie in Bild 3.16 die letzten zwei Messpunkte keine Sicht zur Sendeanlage aufwiesen, so dass hiermit die dortige höhere Abnahme der Immissionen erklärbar ist. Bei Betrachtung der MP mit Sicht wird bei beiden Sendeanlagen deutlich, dass in der Nähe der Anlage kleinere Immissionen gemessen wurden als in weiterer Entfernung. Dieses Verhalten ist in der Richtcharakteristik der Sendeantennen begründet, durch die die Energie nicht in alle Richtungen gleichmäßig sondern gebündelt in der sogenannten Hauptstrahlrichtung abgestrahlt wird. Dieses Abstandsverhalten bei LTE ist identisch zu dem bei GSM und UMTS festgestelltem Verhalten [BOR 05] und wird noch detaillierter in Kapitel 4 und 5 untersucht.

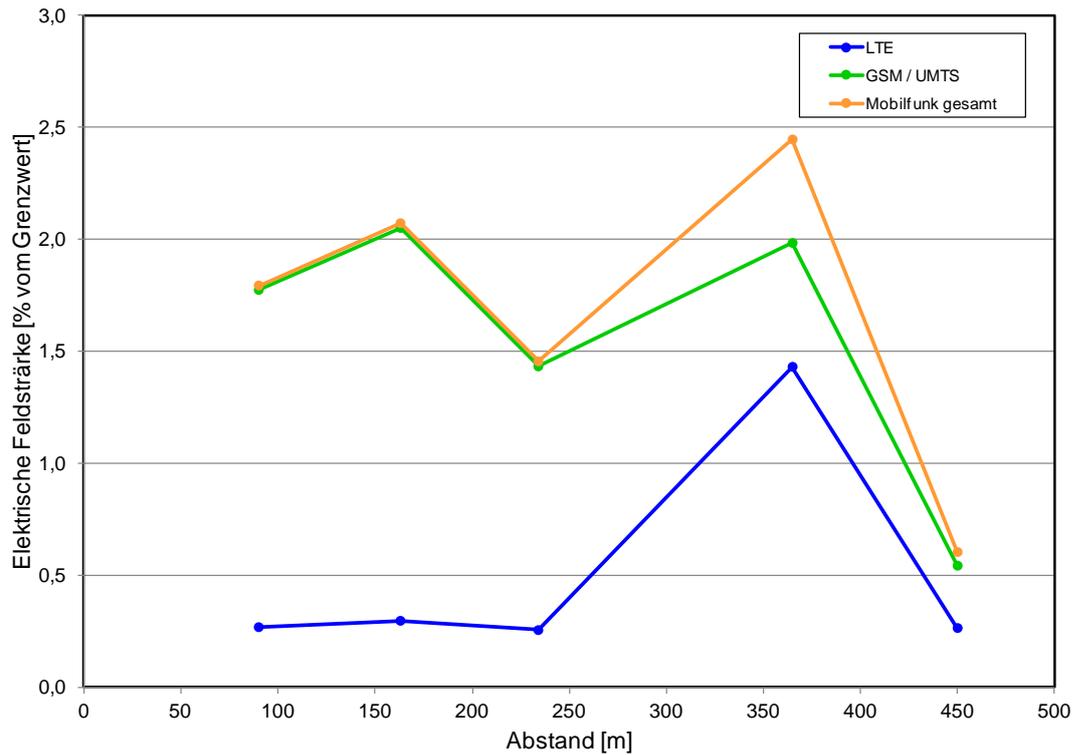


Bild 3.15: Abstandsverhalten Messort 6; am letzten Messpunkt bestand keine Sicht zur Sendeanlage

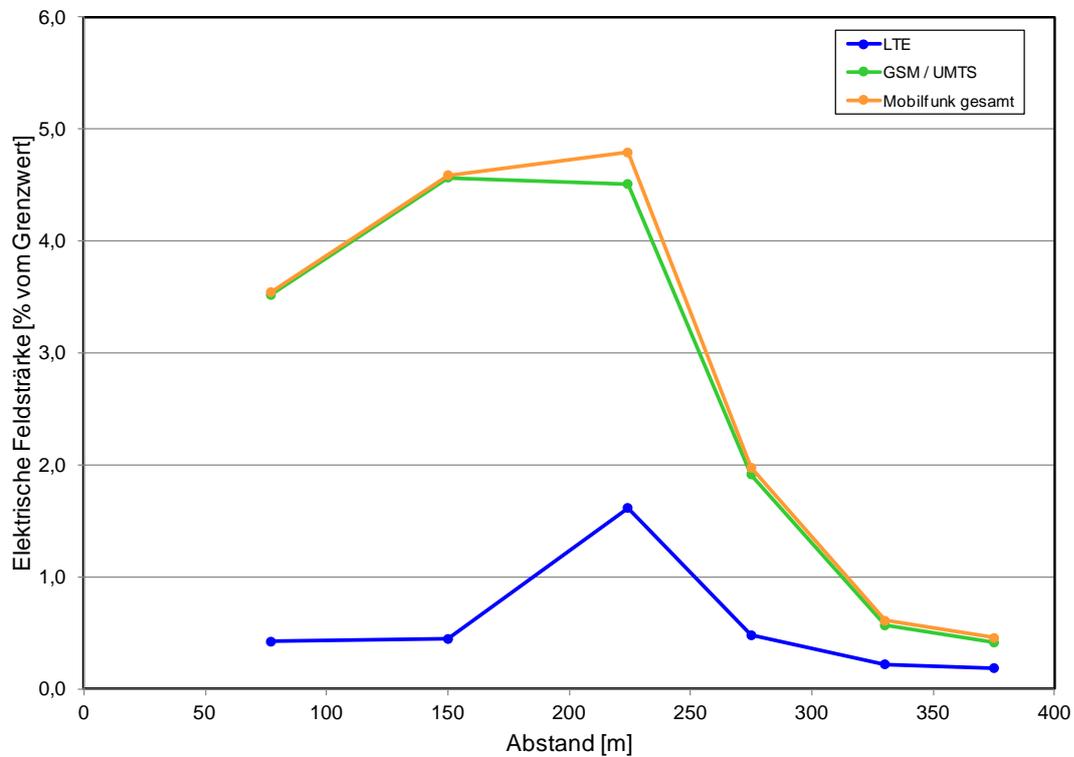


Bild 3.16: Abstandsverhalten Messort 10; an den letzten zwei Messpunkten bestand keine Sicht zur Sendeanlage

3.5 Immissionsverlauf im Anlagengebäude

Im folgenden Abschnitt wird der LTE-Immissionsverlauf im Gebäude direkt unterhalb der Sendeanlage untersucht. Hierzu wurden an Messort 7 die LTE-Immissionen an drei Messpunkten in unterschiedlichen Stockwerken im Anlagengebäude messtechnisch erfasst. Im folgenden Bild sind die Ergebnisse zu sehen.

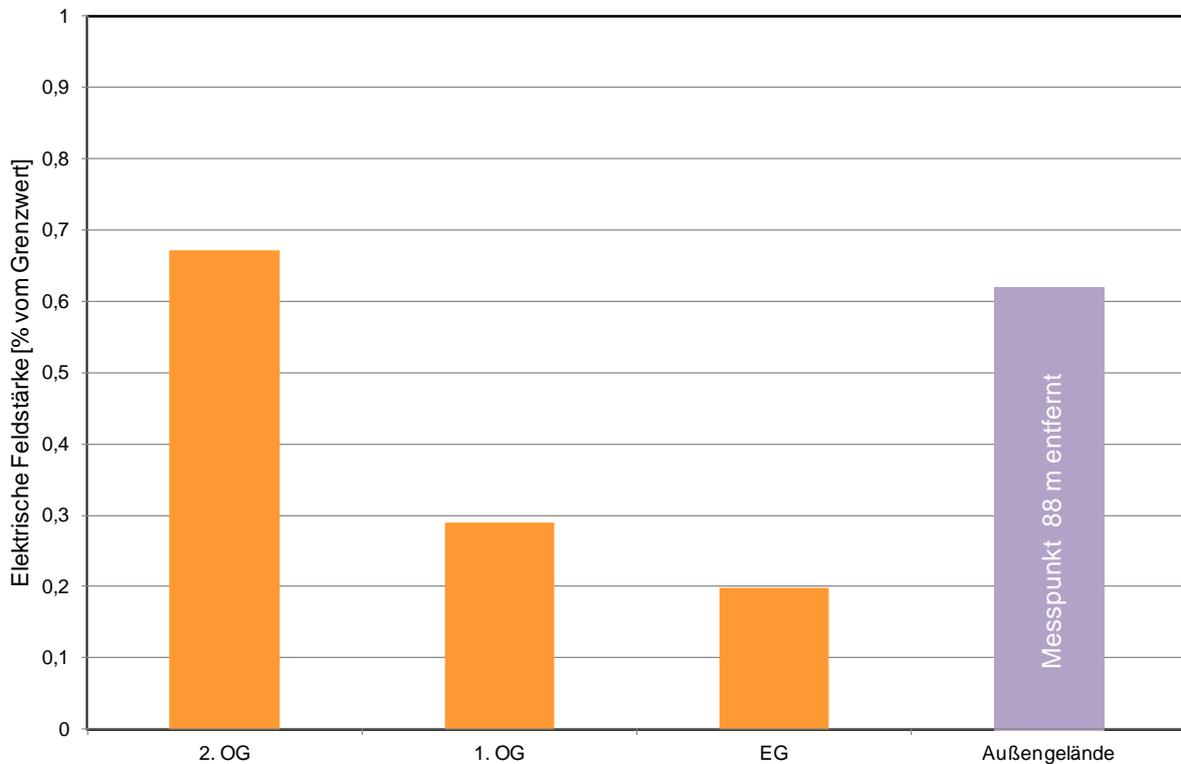


Bild 3.17: Messung der LTE-Immission im Gebäude direkt unterhalb der Sendeanlage, Messpunkte 7.3 – 7.5; Außenmesspunkt 7.2

Das obige Bild zeigt deutlich die Abnahme der LTE-Immission hin zu tieferen Stockwerken. Darüber hinaus ist zu sehen, dass die LTE-Immission an einem 88 m entfernten Außenmesspunkt mit Sicht zur Anlage einen ähnlichen Wert wie am Messpunkt im 2. OG erreicht, was wiederum zeigt, dass der Abstand kein geeignetes Kriterium zur Abschätzung der Immission darstellt. Die Immissionsabnahme zu tieferen Stockwerken ist bei LTE identisch zu dem Verhalten von GSM und UMTS [BOR 05].

3.6 Vergleich von LTE, GSM und UMTS

Im folgenden Abschnitt wird das Verhältnis der LTE-Immissionen im Vergleich zu den Immissionen der etablierten Mobilfunkdienste GSM und UMTS näher betrachtet.

Über alle untersuchten Anlagen ergab sich im Mittel (Median) ein leistungsbezogener Immissionszuwachs durch LTE von etwa 27 %. Hierbei ist allerdings zu berücksichtigen, dass sich das LTE-Netz derzeit noch im Aufbau befindet und es möglich ist, dass an einigen der untersuchten Standorte ein weiterer Betreiber ein LTE-System aufbaut, wodurch sich der Immissionszuwachs noch vergrößern könnte.

Eine Analyse der Immissionsverhältnisse kann auch bezüglich der Frequenzbereiche vorgenommen werden. Hierzu werden nur die Immissionen der drei Systeme des gleichen Betreibers herangezogen, da hier oftmals die gleiche azimutale Ausrichtung und Montagehöhe der Sendeantennen vorlag.

In Tabelle 3.22 sind die Verhältnisse der unterschiedlichen Funkdienste bzw. Frequenzbereiche in Form des Medianwertes der prozentualen Grenzwertausschöpfung (bezogen auf die elektrische Feldstärke) von allen Messpunkten dargestellt. Ein Wert nahe „1“ zeigt hierbei, dass sich die Immissionen der jeweilig betrachteten Mobilfunkdienste ähnlich verhalten.

Elektrische Feldstärke [% vom Grenzwert]	Verhältnis von LTE 800 zu GSM 900	Verhältnis von LTE 800 zu UMTS	Verhältnis von LTE 1800 und LTE 2600 zu GSM 900	Verhältnis von LTE 1800 und LTE 2600 zu UMTS
Median	1,14	2,71	0,40	0,93

Tabelle 3.22: Überblick über die Verhältnisse zwischen LTE und den übrigen Mobilfunkdiensten (vom gleichen Betreiber)

Die Auswertung zeigt, dass sich die Immissionen von LTE 800 zu GSM 900 sowie LTE 1800/2600 zu UMTS ähnlich verhalten. Wenig Ähnlichkeit hingegen besteht im Verhältnis von LTE 800 zu UMTS einerseits und von LTE 1800/2600 zu GSM 900 andererseits.

3.7 Immissionsänderung an einem früher untersuchten Messpunkt

In den Jahren 2002 und 2004 wurden unter dem Titel „Elektromagnetische Felder in NRW - Untersuchung der Immissionen durch Mobilfunk-Basisstationen“ Feldmessungen im Umfeld von GSM- und UMTS-Mobilfunksendeanlagen für das Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen durchgeführt [BOR 02, BOR 05]. An einem der Messpunkte (Messpunkt 3.2) wurden auch in der vorliegenden Untersuchung Immissionsmessungen durchgeführt. Die nachfolgende Tabelle zeigt die Immissionsänderungen in Form der prozentualen Grenzwertausschöpfung (elektrische Feldstärke).

Jahr	Messpunkt	GSM	UMTS	LTE	Gesamt
2004	3.2	3,53 %	0,88 %	-	3,64 %
2013	3.2	4,89 %	1,24 %	1,33 %	5,22 %

Tabelle 3.23: Vergleich der aktuellen Messungen zu den Ergebnissen aus dem Jahr 2004 [BOR 05], prozentuale Grenzwertausschöpfung bezogen auf die elektrische Feldstärke

Neben einer Zunahme der Gesamtimmission durch die Inbetriebnahme der LTE-Anlage am Standort ist auch eine leichte Erhöhung der GSM- und UMTS- Immissionen zu verzeichnen. Die Abweichung zwischen den gemessenen GSM- und UMTS-Immissionen aus 2004 zu 2013 ist jedoch kleiner als 3 dB. In Analogie zu den Betrachtungen in [BOR 05] und vor dem Hintergrund der Messunsicherheit von ± 3 dB ist die GSM- und UMTS-Immission zu beiden Messzeitpunkten deswegen als vergleichbar zu bewerten.

4 Untersuchung des feinskaligen Abstandsverhaltens der Immission

Die Immission im Umfeld einer Mobilfunkanlage hängt u.a. vom Abstand zur Anlage ab und lässt sich sowohl messtechnisch erfassen, als auch bei Kenntnis der Emissionsdaten rechnerisch prognostizieren. Im Hinblick auf die Vertrauenswürdigkeit der Immissionsbestimmung werden im Folgenden beide Verfahren miteinander kombiniert.

Um das Abstandsverhalten der LTE-Immission für sich und die vom Standort durch weitere Mobilfunksysteme (GSM und/oder UMTS) erzeugten Mobilfunkimmissionen zu untersuchen, wurde an zwei Standorten die Immission auf Erdbodenniveau unter Berücksichtigung der Nebenzipfel des Antennendiagramms *feinskalig* gemessen (d.h. an mehr als 20 Messpunkten). Die Immissionen wurden dokumentiert sowie mit einer parallel durchgeführten numerischen Prognose (Freiraumausbreitungsmodell unter Einbeziehung der konkreten Antennendiagramme) verglichen. Alle Messwerte sind auf den bei der Bundesnetzagentur beantragten maximalen Ausbauzustand extrapoliert.

Bei der Standortauswahl wurde so verfahren, dass Standorte mit „idealisierten“ und „realen“ Verläufen der abstandsabhängigen Immission einbezogen wurden: Beim „idealisierten“ Standort haben alle Messpunkte freie Sicht auf die Anlage, außerdem gibt es im näheren Umfeld der Anlage und der Messpunkte keine Gebäude, die den „idealisierten“ Immissionsverlauf durch Reflexionen stören können. Dies stellt einen Fall dar, der bei frei stehenden Anlagen in ländlicher Umgebung anzutreffen ist.

Dem gegenüber haben beim „realen“ Standort nicht alle Messpunkte freie Sicht zur Anlage; an einigen Messpunkten haben Gebäude oder Bäume die Sicht zur Anlage verdeckt. Außerdem ist aufgrund der Messung entlang einer Straße im dicht bebauten Wohngebiet mit Einflüssen durch Reflexion an den benachbarten Häusern zu rechnen. Dies repräsentiert einen Fall, wie er für Mobilfunkanlagen in Wohngebieten typisch ist.

Tabelle 4.1 gibt einen Überblick über die beiden untersuchten LTE-Standorte.

Szenario	Adresse (PLZ, Ort, Straße)	LTE-System	GSM/UMTS am selben Standort
„idealisiert“	52355 Düren, Monschauer Landstr. (B399)	LTE 800 FDD, 10 MHz	4 Systeme
„real“	40221 Düsseldorf, Volmerswerther Str. 169	LTE 1800 FDD, 20 MHz	2 Systeme

Tabelle 4.1: Beschreibung der untersuchten LTE-Standorte

4.1 Idealisierter Abstandsverlauf (freistehende Anlage)

Die Untersuchungen zum feinskaligen Abstandsverhalten an einer idealisierten Anlage wurden in Düren durchgeführt. Bild 4.1 beschreibt den Standort der Anlage, die Ausrichtung der Mobilfunksektoren sowie die Lage der Messpunkte. Alle Messpunkte wurden entlang einer Linie im 40°-Sektor angeordnet. Am Standort wird eine LTE 800 Anlage (Kanalbandbreite 10 MHz) im FDD-Modus betrieben. Neben LTE sind auch noch UMTS vom gleichen

und GSM 900, GSM 1800 und UMTS von einem weiteren Betreiber installiert. Für die weiteren Betrachtungen wird neben LTE nur das UMTS-System vom LTE-Betreiber berücksichtigt, da die Systeme GSM 900, GSM 1800 und UMTS vom zweiten Betreiber eine andere horizontale Ausrichtung besitzen.

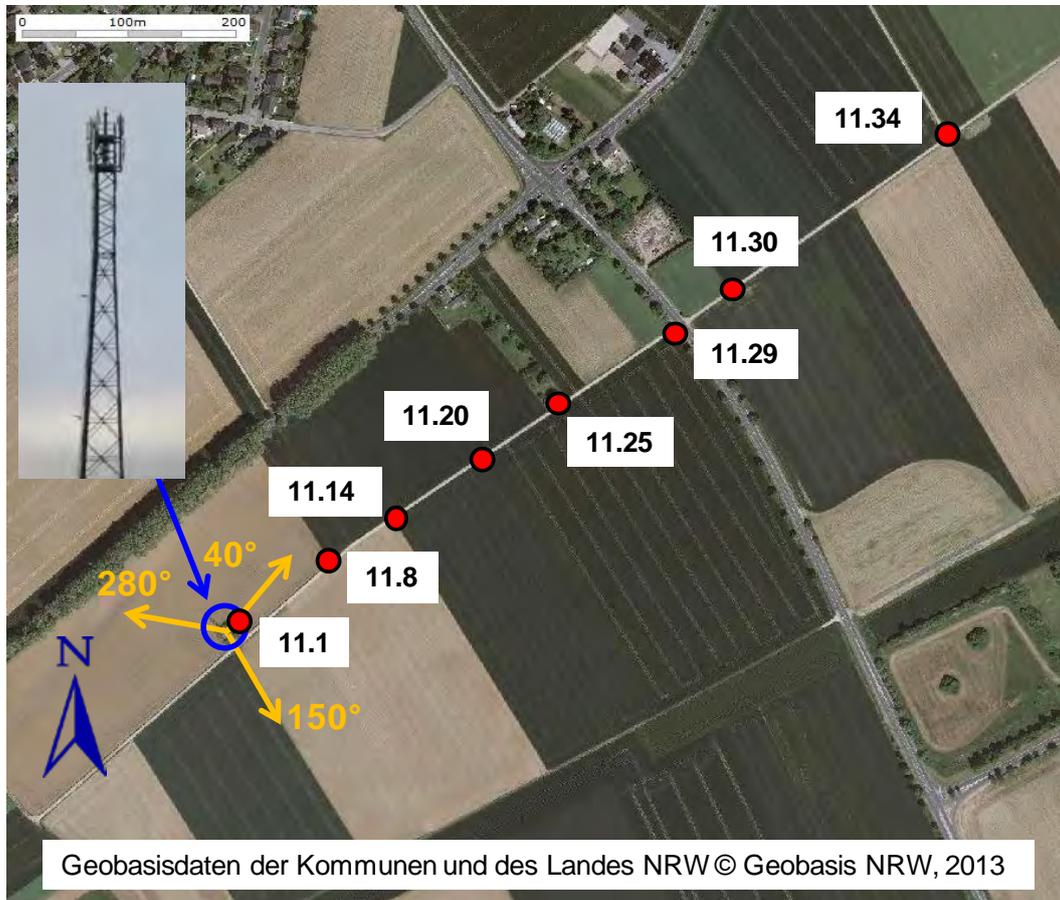


Bild 4.1: Idealierte Abstandsabhängigkeit: Lage der Anlage und der Messpunkte (aus Übersichtlichkeitsgründen sind nicht alle Messpunkte im Bild eingezeichnet); die azimutale Ausrichtung ist für LTE 800 und UMTS identisch

Nachfolgende Tabelle beschreibt die Lage der Messpunkte (MP). Es wurden insgesamt 34 MP untersucht. An allen MP bestand freie Sicht auf die Anlage.

MP	Lateraler Abstand [m]	freie Sicht zur Anlage?	MP	Lateraler Abstand [m]	freie Sicht zur Anlage?
11.01	10	ja	11.18	247	ja
11.02	26	ja	11.19	261	ja
11.03	37	ja	11.20	278	ja
11.04	49	ja	11.21	300	ja
11.05	61	ja	11.22	320	ja
11.06	72	ja	11.23	339	ja
11.07	82	ja	11.24	360	ja
11.08	95	ja	11.25	379	ja
11.09	108	ja	11.26	411	ja

MP	Lateraler Abstand [m]	freie Sicht zur Anlage?	MP	Lateraler Abstand [m]	freie Sicht zur Anlage?
11.10	117	ja	11.27	444	ja
11.11	136	ja	11.28	475	ja
11.12	151	ja	11.29	520	ja
11.13	168	ja	11.30	574	ja
11.14	184	ja	11.31	629	ja
11.15	198	ja	11.32	685	ja
11.16	214	ja	11.33	758	ja
11.17	229	ja	11.34	827	ja

Tabelle 4.2: Übersicht über die Messpunkte, die entsprechenden lateralen Abstände und die Sichtbedingungen zur Sendeanlage

In den nachfolgenden Bildern sind die Ergebnisse der Messungen (blaue Punkte) dokumentiert und mit den Ergebnissen der Berechnungen (rote und grüne Kurve) verglichen. Für die Messungen und Berechnungen wurde dabei jeweils nur derjenige Sektor der Anlage berücksichtigt, in dessen Richtung die Messpunkte angeordnet waren. Die Berechnungen wurden sowohl mit der vom Betreiber angegebenen Sendeleistung durchgeführt („Berechnung“), als auch mit einem „Aufschlag“ auf die Sendeleistung von 3 dB („Berechnung + 3 dB“). Hiermit sollen Effekte wie Reflexionen und Beugungen, die durch konstruktive Interferenzen punktuell zu einer gegenüber der normalen Freiraumausbreitungsprognose erhöhten Immission führen können, modelliert werden. Obwohl zwischen den durch die blauen Punkte dokumentierten Stützstellen der Messung keine weiteren Messpunkte lagen, sind die Messpunkte aus Übersichtsgründen mit einer Linie verbunden (Spline-Interpolation).

Sowohl die LTE-, als auch die UMTS-Abstandsdiagramme weisen die für Mobilfunk-Basisstationen charakteristischen Verläufe auf [BOR 05]: In dem durch die Nebenzipfel des Abstrahldiagramms bestimmten Abstandsbereich (hier bis ca. 70 m bei LTE 800 und bis ca. 180 m bei UMTS) nimmt die Immission bei steigendem Abstand von der Basisstation nicht gleichmäßig ab, sondern weist mehrere Maxima und Minima auf. Erst bei größeren Entfernungen, d.h. wenn sich die Messpunkte in der Hauptstrahlungsrichtung der Basisstation befinden, ist eine gleichmäßige Abnahme der Immission bei steigendem Abstand zu beobachten.

Beim Vergleich des LTE-Verlaufs mit dem UMTS-Verlauf ist festzustellen, dass bei LTE 800 der durch die Nebenzipfel bestimmte Abstandsbereich kleiner als bei UMTS ist und die Hauptstrahlungsrichtung eher auf den Boden trifft. Dies ist vermutlich dadurch begründet, dass die vertikale Hauptkeule bei LTE 800 aufgrund der gegenüber UMTS niedrigeren Frequenz und der damit einhergehenden geringeren Bündelungswirkung wesentlich breiter ist und somit bereits bei geringeren Abständen zur Anlage die Feldverteilung dominiert.

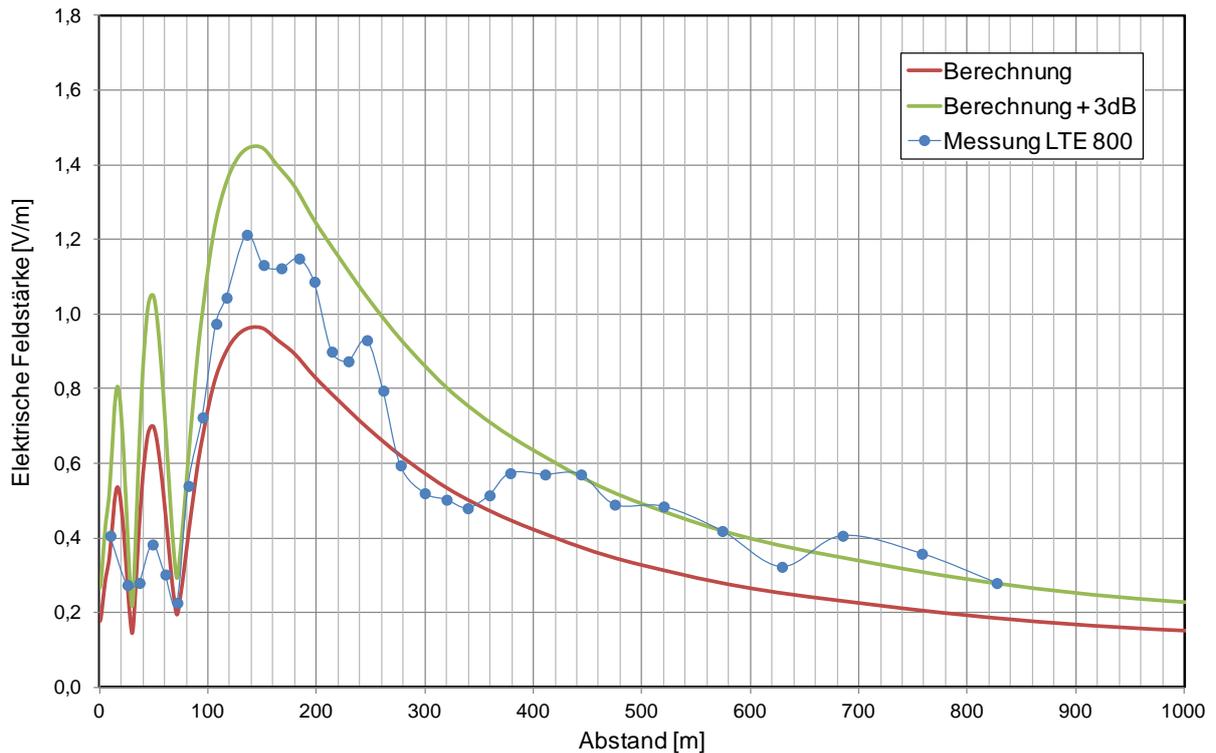


Bild 4.2: Vergleich zwischen Messung und Berechnung für LTE 800, 40°-Sektor

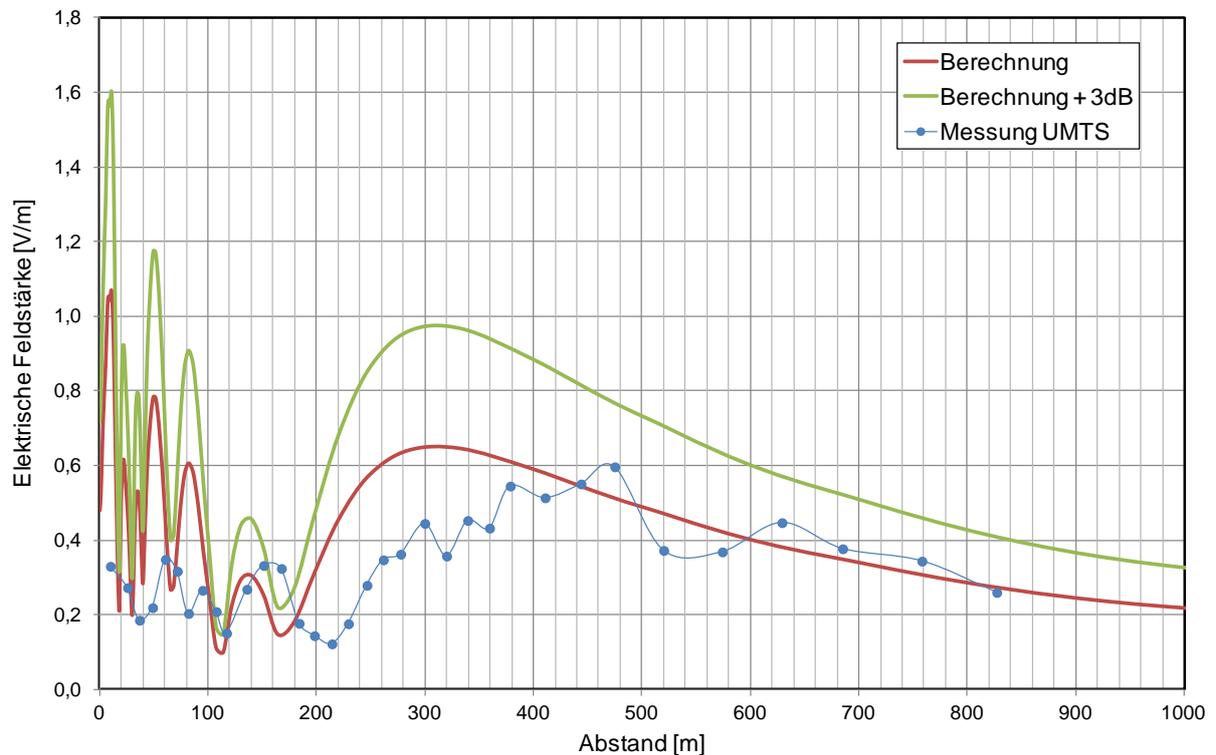


Bild 4.3: Vergleich zwischen Messung und Berechnung für UMTS, 40°-Sektor

Ein Vergleich zwischen Mess- und Berechnungsergebnissen liefert folgende Ergebnisse:

Die *qualitative* Übereinstimmung der Ergebnisse zwischen Messung und Rechnung ist vor allem im Bereich der Hauptstrahlrichtung (ca. ab 70 m bei LTE 800 und ca. ab 200 m bei

UMTS) gut. Bei kleineren Abständen, d.h. in dem Bereich, der durch die Nebenstrahlungsrichtungen und Einzüge dominiert wird, ist die Übereinstimmung weniger gut. Hierfür kommen drei mögliche Ursachen in Betracht:

- Eine Ursache ist, dass die Granularität der Messpunkte vor allem bei geringen Abständen nicht fein genug ist, um die schnelle örtliche Variation der Immission in diesem Bereich ausreichend widerspiegeln zu können.
- Eine zweite Ursache liegt im Umstand, dass das zur Berechnung verwendete Vertikaldiagramm aus zwei Diagrammen bei den benachbarten Frequenzstützstellen synthetisiert wurde und somit gewisse Abweichungen des synthetisierten Diagramms von den realen Diagrammen vorgegeben sind.
- Ein wesentlicher Faktor für potenzielle Abweichungen gerade im Nebenzipfelbereich ist außerdem die Tatsache, dass in einschlägigen Studien gezeigt werden konnte, dass die aktuelle Montageumgebung einen großen Einfluss auf das Abstrahldiagramm gerade im Nebenzipfelbereich hat [BOR 05-1]. Insofern ist es also nicht verwunderlich, dass Messung und Berechnung hier nicht deckungsgleich sind.

Vor dem Hintergrund einer Messunsicherheit von ± 3 dB und der Verwendung eines relativ einfachen Berechnungsmodells ist die *quantitative* Übereinstimmung der Ergebnisse zwischen Messung und Rechnung im Bereich der Hauptstrahlrichtung bei LTE sehr gut: Die Messergebnisse liegen fast vollständig in einem Schlauch, der aus den Berechnungsergebnissen bei Nominalleistung und einem Aufschlag von +3 dB gebildet wird. Hieraus kann abgeleitet werden, dass zur Prognose der Immissionen in diesem Szenario das physikalisch einfache Freiraumausbreitungsmodell verwendet werden kann, wobei aus worst-case Gründen zur Berücksichtigung von Reflexionen u.ä. ein Leistungszuschlag von +3 dB auf die vom Netzbetreiber angegebene Sendeleistung berücksichtigt werden sollte. Bei UMTS liegen die Ergebnisse in Hauptstrahlrichtung größtenteils unter der Berechnungskurve bei Nominalleistung. Bei LTE gibt es jedoch auch drei Messpunkte, die geringfügig oberhalb der Kurve „Berechnung + 3 dB“ liegen und somit bei einer rechnerischen Prognose geringfügig unterschätzt werden würden. Mögliche Ursachen werden hier in drei Aspekten gesehen:

- Jede Messung ist mit einer Messunsicherheit behaftet, die in Abschnitt 2.1.3 mit ± 3 dB beziffert ist. Es ist somit möglich, dass der „wahre“ Wert bis zu 3 dB kleiner ist als der dokumentierte Messwert.
- Aufgrund der Neuartigkeit der Technologie haben sich bei der Bereitstellung der technischen Anlagedaten durch die Netzbetreiber bei LTE noch nicht dieselben Qualitätsmechanismen eingespielt wie bei den etablierten Technologien GSM und UMTS. Der vom Betreiber übermittelte aktuelle Pegel der RS-Elemente wurde vom Auftragnehmer zwar auf Plausibilität überprüft, unterliegt aber einer gewissen Unsicherheit. Hier wird als Hinweis an die Messgerätehersteller angeregt, dass die codeselektiven LTE-Messgeräte während der Messung auch den RS-Pegel dekodieren sollten, da dieser von der LTE-Basisstation permanent übertragen wird.
- Auch die Endverstärker einer Basisstation unterliegen gewissen Herstellertoleranzen. Wird die Toleranz eines 40 W Verstärkers beispielsweise mit ± 1 dB angegeben, kann die reale Sendeleistung zwischen 32 W und 50 W liegen. Für die Berechnungen wurde jedoch primär die nominelle Leistung (in diesem Fall 40 W) angesetzt.

4.2 Realer Abstandsverlauf (Anlage im Wohngebiet)

Die Untersuchungen zum feinskaligen Abstandsverhalten an einer realen Anlage wurden in Düsseldorf durchgeführt. Bild 4.4 beschreibt den Standort der Anlage, die Ausrichtung der Mobilfunksektoren sowie die Lage der Messpunkte. Alle Messpunkte wurden entlang einer Linie im 0°-Sektor angeordnet. Am Standort wird eine LTE 1800 Anlage (Kanalbandbreite 20 MHz) im FDD-Modus betrieben. Neben LTE sind auch noch UMTS und GSM 900 vom gleichen Betreiber installiert.

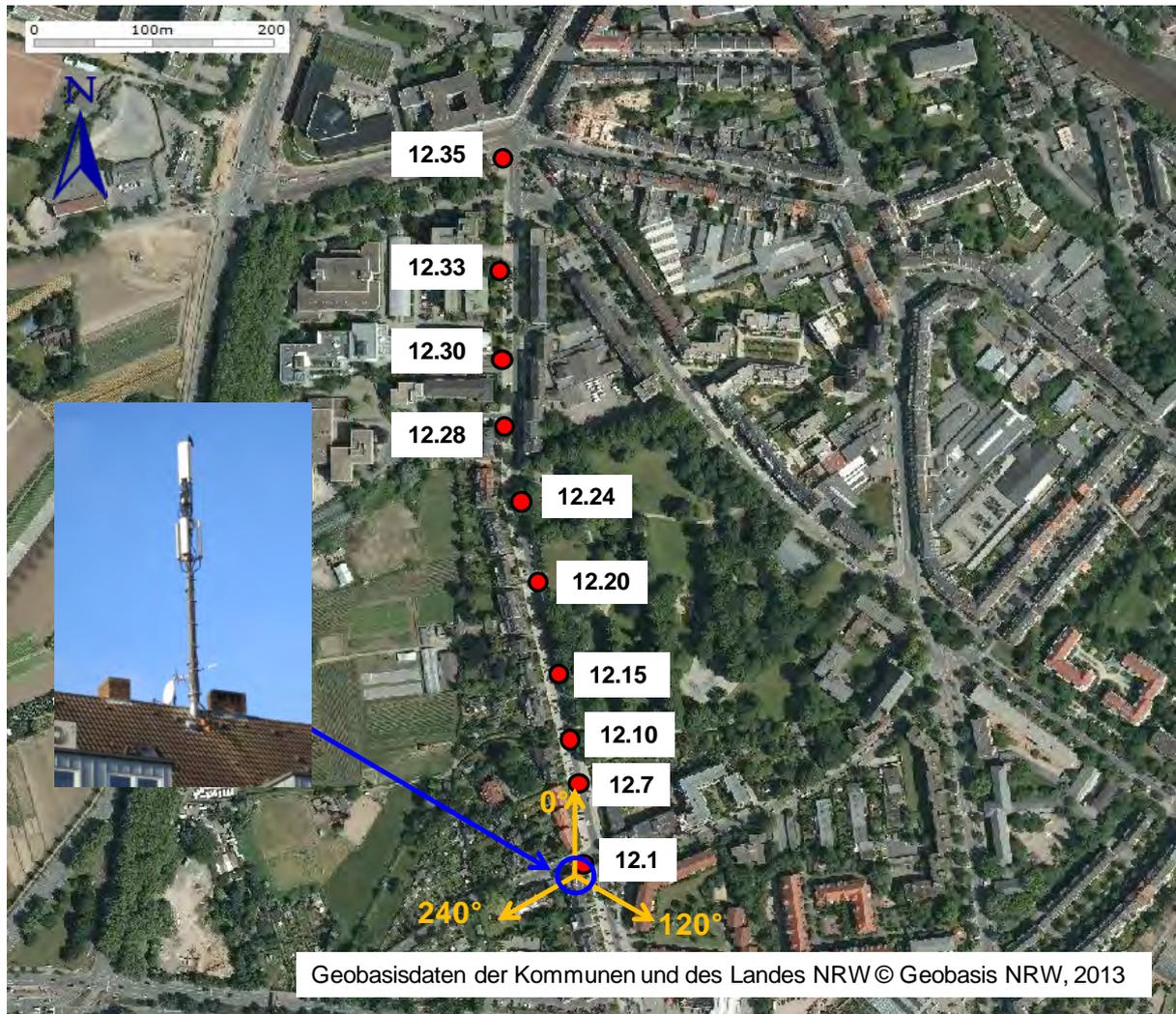


Bild 4.4: Reale Abstandsabhängigkeit: Lage der Anlage und der Messpunkte (aus Übersichtlichkeitsgründen sind nicht alle Messpunkte im Bild eingezeichnet); die azimutale Ausrichtung ist für LTE 1800, GSM 900 und UMTS identisch

Nachfolgende Tabelle beschreibt die Lage der Messpunkte (MP). Es wurden insgesamt 35 MP untersucht.

Messpunkt	Lateraler Abstand [m]	freie Sicht zur Anlage?	Messpunkt	Lateraler Abstand [m]	freie Sicht zur Anlage?
12.01	18	ja	12.19	262	ja
12.02	30	ja	12.20	275	ja
12.03	41	ja	12.21	289	ja
12.04	53	ja	12.22	304	ja
12.05	66	ja	12.23	319	ja
12.06	83	ja	12.24	331	ja
12.07	93	ja	12.25	344	ja
12.08	103	ja	12.26	360	ja
12.09	113	ja	12.27	375	nein
12.10	123	ja	12.28	389	nein
12.11	140	ja	12.29	414	nein
12.12	154	ja	12.30	438	nein
12.13	169	ja	12.31	447	nein
12.14	184	ja	12.32	482	nein
12.15	199	ja	12.33	528	nein
12.16	214	ja	12.34	558	nein
12.17	233	ja	12.35	617	nein
12.18	250	ja			

Tabelle 4.3: Übersicht über die Messpunkte, die entsprechenden lateralen Abstände und die Sichtbedingungen zur Sendeanlage

In den nachfolgenden Bildern sind die Abstandsverläufe für alle am Standort installierten Funksysteme dokumentiert. Im Gegensatz zum LTE 800 Szenario aus Abschnitt 4.1 weist die Immission des hier untersuchten LTE 1800 Szenarios eine größere Ähnlichkeit zu UMTS auf als zu GSM 900. Dies ist vermutlich auf die größere Frequenznähe von LTE 1800 (1800 MHz) zu UMTS (2100 MHz) als zu GSM 900 (900 MHz) zurückzuführen. Bei GSM 900 beginnt der durch die Hauptstrahlrichtung bestimmte Entfernungsbereich, vergleichbar zu LTE 800 aus Abschnitt 4.1, bei wesentlich kürzeren Abständen zur Basisstation als bei LTE 1800 und UMTS.

Bezüglich eines Vergleichs zwischen Messung und Berechnung ist festzustellen, dass in diesem Szenario die Übereinstimmung im Bereich der Nebenzipfel besser ist als im Szenario nach Abschnitt 4.1. Bis zu einem Abstand von etwa 340 m liegen die Messwerte wieder in einem durch die Kurven „Berechnung“ und „Berechnung + 3 dB“ aufgespannten Bereich. Bei größeren Abständen sinken die Immissionen deutlich ab und bewegen sich unterhalb der Berechnungskurven, was unter anderem darauf zurückzuführen ist, dass bei diesen Entfernungen keine freie Sicht mehr auf die Basisstation bestand. Dämpfungen durch Sichthindernisse werden im Freiraumausbreitungsmodell nicht berücksichtigt, so dass zu hohe Immissionen prognostiziert werden. Es gibt wiederum im Bereich der Hauptstrahlungsrichtung nur einen einzigen Messpunkt, der höher als die Berechnung mit einem Aufschlag von 3 dB ist.

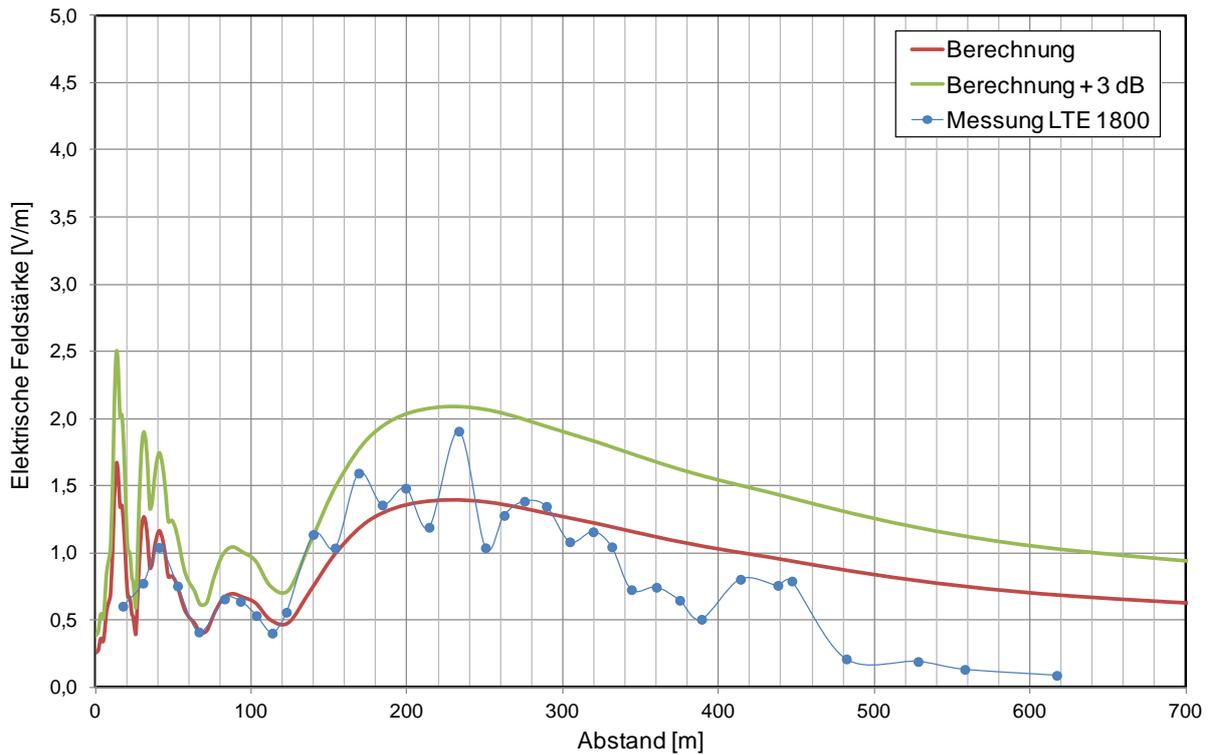


Bild 4.5: Vergleich zwischen Messung und Berechnung für LTE 1800

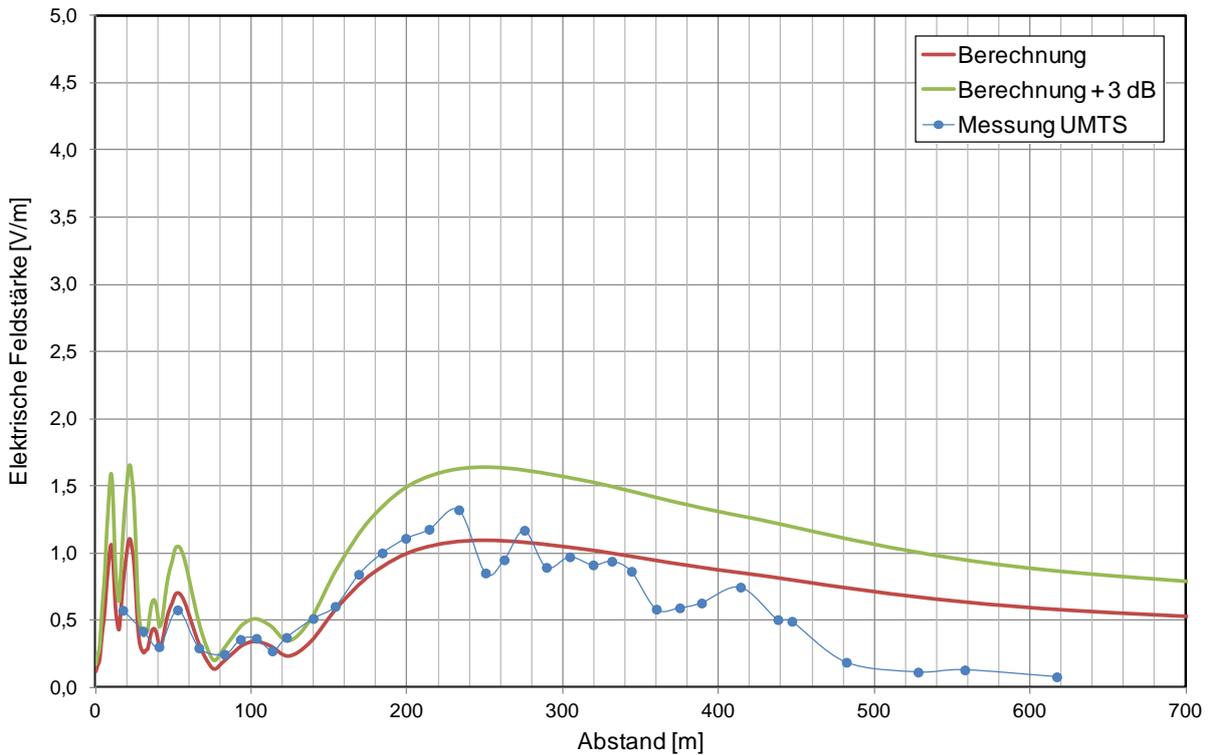


Bild 4.6: Vergleich zwischen Messung und Berechnung für UMTS

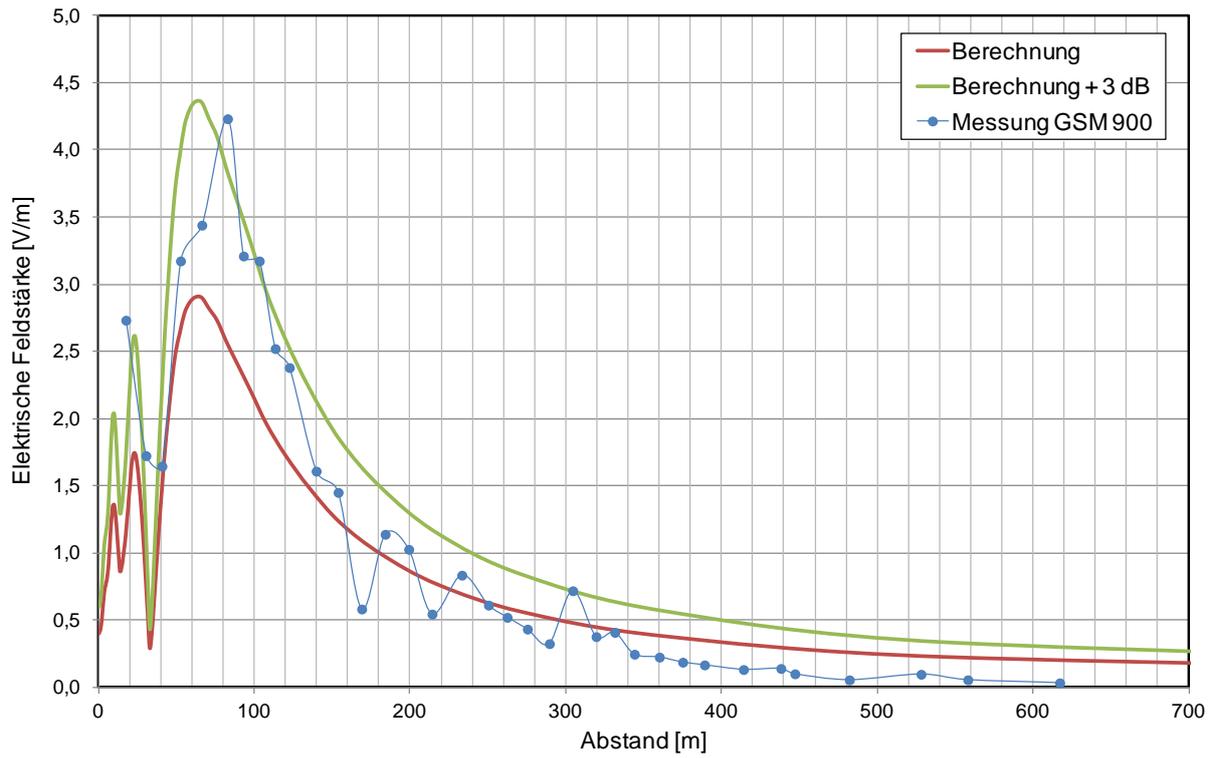


Bild 4.7: Vergleich zwischen Messung und Berechnung für GSM 900

5 Untersuchung der feinskaligen ausrichtungsabhängigen Immissionsverteilung bei konstantem Abstand

LTE-Anlagen werden, ähnlich wie GSM- und UMTS-Anlagen, üblicherweise in einer Aufbauvariante mit drei Sektorantennen realisiert, um eine möglichst kreisförmige Ausleuchtungszone zu erreichen. An zwei Standorten wurde die horizontale (azimutale) Richtungsabhängigkeit der Immission auf Erdbodenniveau messtechnisch ermittelt und mit einer parallel durchgeführten numerischen Simulation (Freiraumausbreitungsmodell unter Einbeziehung der konkreten Antennendiagramme) verglichen. Bei der Messung wurden auch andere auf dem Standort installierten Mobilfunksysteme (LTE sowie GSM und/oder UMTS) erfasst und auf den bei der Bundesnetzagentur beantragten maximalen Ausbauzustand extrapoliert. Die Messung erfolgte feinskalig in Winkelabständen von 30° bei einem festen Abstand von der Sendeanlage.

Bei der Standortauswahl wurde so verfahren, dass Standorte mit „idealisierten“ und „realen“ Verläufen der ausrichtungsabhängigen Immission einbezogen wurden: Beim „idealisierten“ Standort haben alle Messpunkte freie Sicht auf die Anlage, außerdem gibt es im näheren Umfeld der Anlage und der Messpunkte keine Gebäude, die den „idealisierten“ Immissionsverlauf durch Reflexionen stören können. Dies stellt einen Fall dar, der bei frei stehenden Anlagen in ländlicher Umgebung anzutreffen ist.

Dem gegenüber haben beim „realen“ Standort nicht alle Messpunkte freie Sicht zur Anlage; an einigen Messpunkten ist die Sicht durch Gebäude oder Bäume verdeckt. Außerdem ist mit Reflexionen an umliegenden Gebäuden zu rechnen. Dies repräsentiert einen Fall, wie er für Mobilfunkanlagen in Wohngebieten typisch ist.

Tabelle 5.1 gibt einen Überblick über die beiden untersuchten LTE-Standorte.

Szenario	Adresse (PLZ, Ort, Straße)	LTE-System	GSM/UMTS am selben Standort
„idealisiert“	52355 Düren, Monschauer Landstr. (B399)	LTE 800 FDD, 10 MHz	4 Systeme
„real“	45468 Mülheim a. d. Ruhr, Von-Bock-Str. 81	LTE 1800 FDD, 20 MHz	2 Systeme

Tabelle 5.1: Beschreibung der untersuchten LTE-Standorte

5.1 Idealisierter Ausrichtungsverlauf (freistehende Anlage)

Die Untersuchungen zur ausrichtungsabhängigen Immissionsverteilung an einer idealisierten Anlage wurden in Düren durchgeführt. Bild 5.1 beschreibt den Standort der Anlage, die Ausrichtung der Mobilfunksektoren (LTE 800 und UMTS) sowie die Lage der Messpunkte. Alle Messpunkte wurden in einer lateralen Entfernung von 106 m zum Sendemast angeordnet. Am Standort wird eine LTE 800 Anlage (Kanalbandbreite 10 MHz) im FDD-Modus betrieben. Neben LTE sind auch noch UMTS vom gleichen und GSM 900, GSM 1800 und UMTS von einem weiteren Betreiber installiert. Für die weiteren Betrachtungen wird neben LTE nur das UMTS-System vom LTE-Betreiber berücksichtigt, da die Systeme GSM 900, GSM 1800 und UMTS vom zweiten Betreiber eine andere horizontale Ausrichtung besitzen.

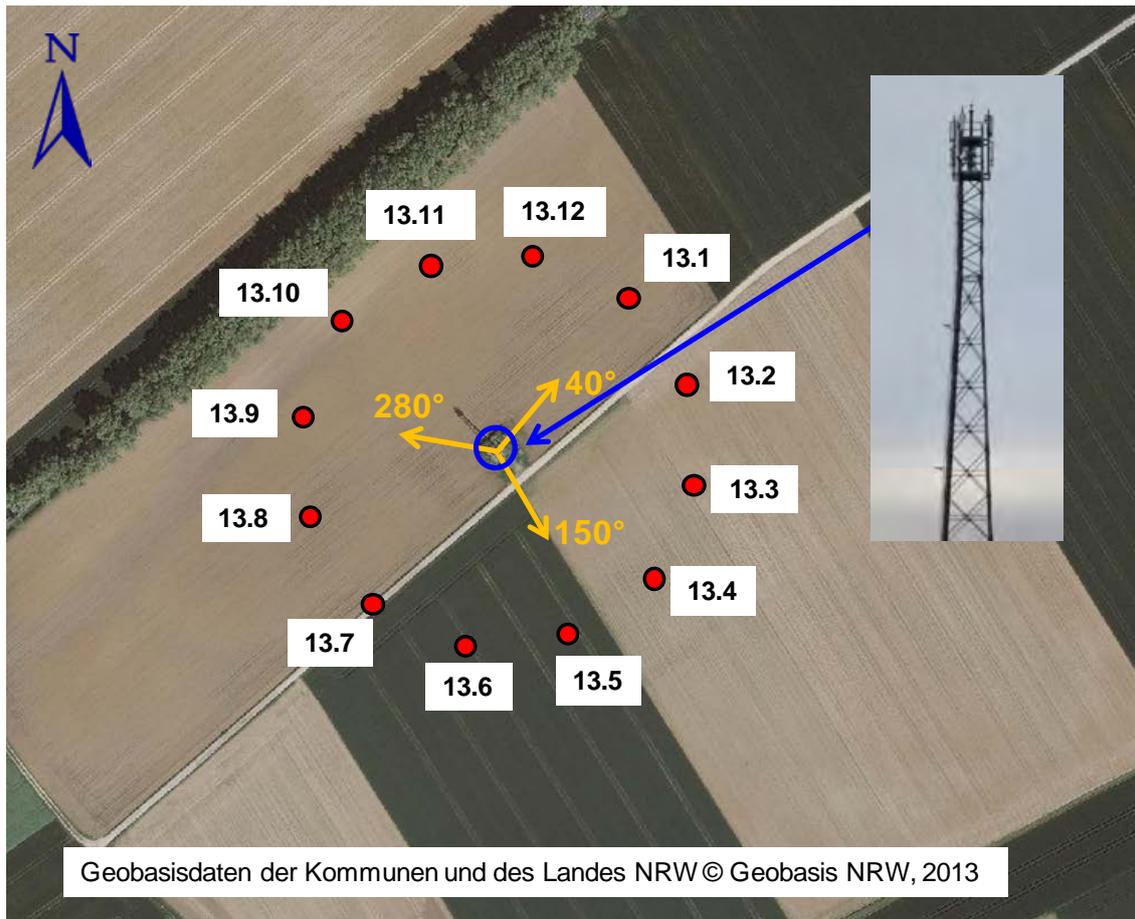


Bild 5.1: Idealisierte Ausrichtungsabhängigkeit: Lage der Anlage und der Messpunkte; die azimutale Ausrichtung ist für LTE 800 und UMTS identisch

Nachfolgende Tabelle beschreibt die Lage der Messpunkte (MP). Es wurden insgesamt 12 MP untersucht.

Messpunkt	Azimutale Ausrichtung zur Sendeanlage [°]	Lateraler Abstand [m]	freie Sicht zur Anlage?
13.01	40	106	ja
13.02	70	106	ja
13.03	100	106	ja
13.04	130	106	ja
13.05	160	106	ja
13.06	190	106	ja
13.07	220	106	ja
13.08	250	106	ja
13.09	280	106	ja
13.10	310	106	ja
13.11	340	106	ja
13.12	10	106	ja

Tabelle 5.2: Übersicht über die Messpunkte, die entsprechenden azimutalen Ausrichtungen und die Sichtbedingungen zur Sendeanlage

In den nachfolgenden Bildern sind die Ergebnisse der Messungen (blaue Punkte) dokumentiert und mit den Ergebnissen der Berechnungen (rote und grüne Kurve) verglichen. Die Berechnungen wurden sowohl mit der vom Betreiber angegebenen Sendeleistung durchgeführt („Berechnung“), als auch mit einem „Aufschlag“ auf die Sendeleistung von 3 dB („Berechnung + 3 dB“). Hiermit sollen Effekte wie Reflexionen und Beugungen, die durch konstruktive Interferenzen punktuell zu einer gegenüber der normalen Freiraumausbreitungsprognose erhöhten Immission führen können, modelliert werden.

Es ist zu sehen, dass selbst die numerisch prognostizierten Verläufe keine „ideale“ Rundstrahlcharakteristik aufweisen: An den Grenzen zwischen zwei Sektoren kann es je nach verwendeter Antenne bzw. horizontalem Öffnungswinkel der Antenne zu mehr oder weniger starken „Einbrüchen“ kommen (etwa 2 dB in Bild 5.2 zwischen dem 40°- und 150°-Sektor). Darüber hinaus kann gerade im Nahbereich um die Anlage (d.h. von der Anlage bis zu einem Abstand, an dem die vertikale Hauptstrahlrichtung auf den Boden auftrifft) eine unterschiedliche Absenkung (Downtilt) der einzelnen Sektorantennen dazu führen, dass sich einige Messpunkte in einem Minimum zwischen zwei Nebenzipfeln befinden und eine geringere Immission erfahren als andere Messpunkte, die gerade in einem Nebenstrahlungsmaximum sind.

Beim Vergleich der Bilder 5.2 und 5.3 fällt auf, dass die Immissionen durch das LTE 800 System wesentlich größer sind als die durch das UMTS-System. Da die hier betrachtete Anlage bereits hinsichtlich ihres Abstandsverhaltens in Abschnitt 4.1 untersucht wurde, kann der Grund für dieses Verhalten schnell identifiziert werden: Der mit 106 m Abstand zur Anlage gewählte Kreis liegt nahezu in Hauptstrahlrichtung des LTE 800 Systems (vgl. Bild 4.2), aber direkt in einem Minimum der Nebenzipfel des UMTS-Systems (vgl. Bild 4.3).

Ein Vergleich zwischen Mess- und Berechnungsergebnissen liefert folgende Ergebnisse:

Die *qualitative* Übereinstimmung der Ergebnisse zwischen Messung und Rechnung ist beim LTE 800 System (d.h. im Bereich der Hauptstrahlrichtung, wie auch schon bei den Abstandsverläufen beobachtet) gut. Die Erhöhung der Immission in horizontaler Sektormitte wird durch die Messung qualitativ reproduziert. Bei UMTS (d.h. im Nebenzipfelbereich) ist die Übereinstimmung weniger gut; als Ursache kommt die bereits in Abschnitt 4.1 besprochene Abweichung des realen Abstrahldiagramms von den Herstellerangaben im Nebenzipfelbereich in Betracht.

Vor dem Hintergrund einer Messunsicherheit von ± 3 dB und der Verwendung eines relativ einfachen Berechnungsmodells ist die *quantitative* Übereinstimmung der Ergebnisse zwischen Messung und Rechnung beim LTE 800 System sehr gut: Die Messergebnisse liegen fast vollständig in einem Schlauch, der aus den Berechnungsergebnissen bei Nominalleistung und einem Aufschlag von +3 dB gebildet wird. Bei UMTS liegen die Ergebnisse in Hauptstrahlrichtung teilweise auch oberhalb der Kurve „Berechnung + 3 dB“. Der Grund hierfür ist darin zu suchen, dass die numerische Prognose von einer Lage der Messpunkte in einem Nebenzipfelminimum ausgeht, wohingegen aus den oben erwähnten Gründen die Messpunkte real nicht genau im Minimum liegen müssen.

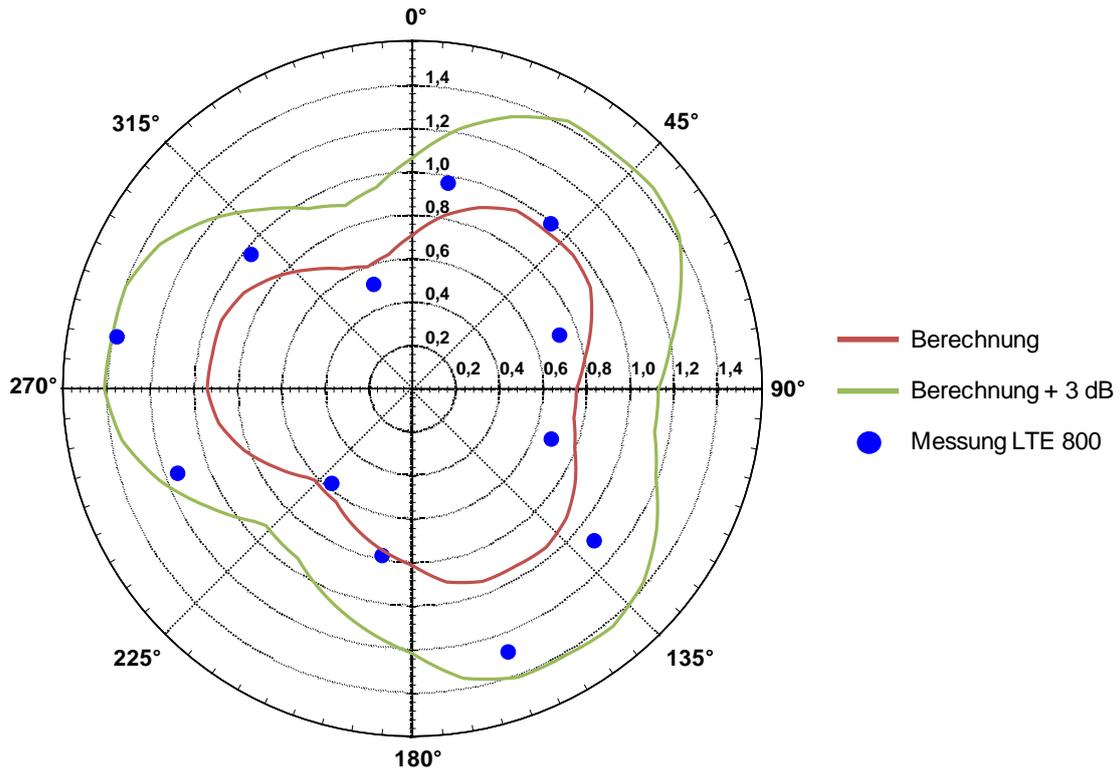


Bild 5.2: Vergleich zwischen Messung und Berechnung für LTE 800 (Achsenwerte elektrische Feldstärke in V/m)

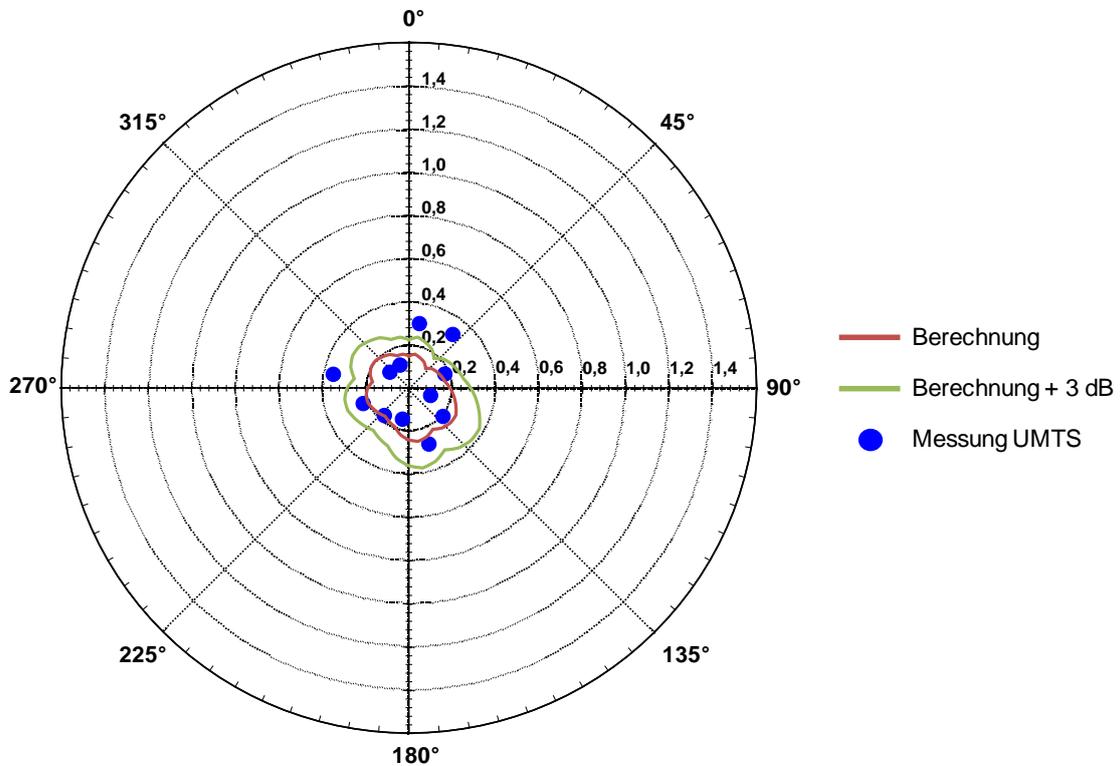


Bild 5.3: Vergleich zwischen Messung und Berechnung für UMTS (Achsenwerte elektrische Feldstärke in V/m)

5.2 Realer Ausrichtungsverlauf (Anlage im Wohngebiet)

Die Untersuchungen zur ausrichtungsabhängigen Immissionsverteilung an einer realen Anlage wurden in Mülheim an der Ruhr durchgeführt. Bild 5.4 beschreibt den Standort der Anlage, die Ausrichtung der Mobilfunksektoren sowie die Lage der Messpunkte. Alle Messpunkte wurden in einer lateralen Entfernung von 185 bis 210 m zur Sendeanennen angeordnet. Es ließ sich nicht für alle Messpunkte der exakt gleiche Abstand von der Anlage realisieren, da sich das Untersuchungsgebiet im städtischen Bereich befindet und die Messpunkte nur in allgemein zugänglichen Bereichen gewählt werden konnten. Am Standort wird eine LTE 1800 Anlage (Kanalbandbreite 20 MHz) im FDD-Modus betrieben. Neben LTE sind auch noch UMTS und GSM 900 vom gleichen Betreiber installiert.

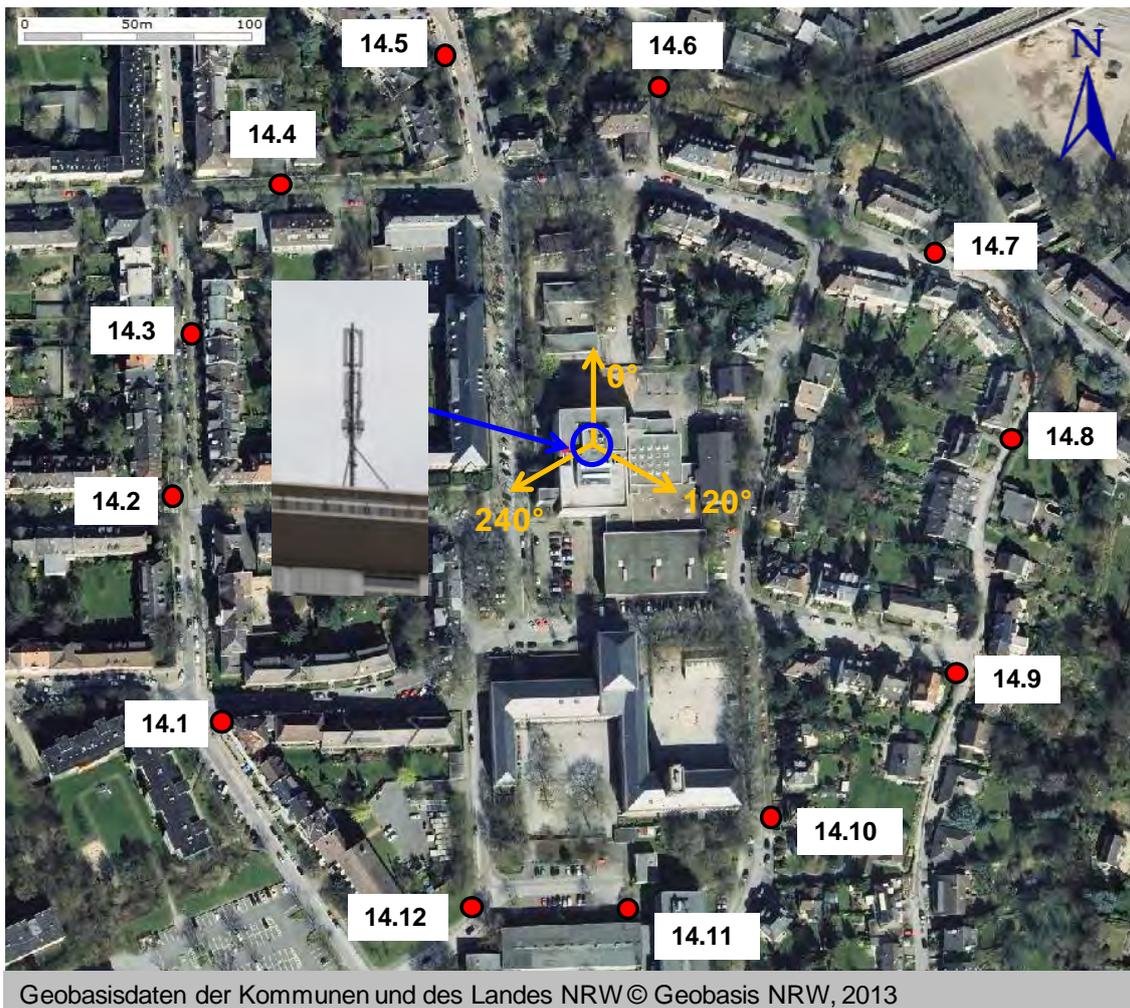


Bild 5.4: Reale Ausrichtungsabhängigkeit: Lage der Anlage und der Messpunkte; die azimuthale Ausrichtung ist für LTE 1800, GSM 900 und UMTS identisch

Nachfolgende Tabelle beschreibt die Lage der Messpunkte (MP). Es wurden insgesamt 12 MP untersucht.

Messpunkt	Azimutale Ausrichtung zur Sendeanlage [°]	Lateraler Abstand [m]	Höhenunterschied zur Sendeanlage [m]	freie Sicht zur Anlage?
14.01	230	205	-2	nein
14.02	265	190	-6	ja
14.03	290	190	-9	nein
14.04	315	185	-11	nein
14.05	345	190	-12	ja
14.06	10	185	-12	nein
14.07	55	180	-9	nein
14.08	85	180	-3	nein
14.09	115	190	0	nein
14.10	155	190	4	nein
14.11	175	205	3	nein
14.12	195	210	1	nein

Tabelle 5.3: Übersicht über die Messpunkte, die entsprechenden azimutalen Ausrichtungen, die lateralen Abstände und die Sichtbedingungen zur Sendeanlage

In den Bildern 5.6 bis 5.8 sind die Ergebnisse der Messungen bei LTE 1800, UMTS und GSM 900 dokumentiert und den Berechnungen gegenübergestellt.

Im Vergleich zum idealisierten Szenario aus Abschnitt 5.1 fällt hier bereits die Abweichung der berechneten Ausrichtungsabhängigkeit von einer hypothetischen Kreisform bei allen drei Funkdiensten wesentlich stärker aus. Der Grund hierfür liegt zum einen in der Tatsache, dass der nach Norden gerichtete Sektor (0°) einen geringeren Downtilt hat als die beiden anderen Sektoren. Außerdem ist das Geländeprofil nach Norden hin abfallend. Wie in folgendem Bild der rechentechnischen Prognose zu erkennen ist, befinden sich die im 0°-Sektor liegenden Punkte noch nicht in der vertikalen Hauptstrahlrichtung der Anlage, die anderen Messpunkte jedoch schon. Dies führt zu einer geringeren Immission im 0°-Sektor gegenüber den anderen Sektoren.

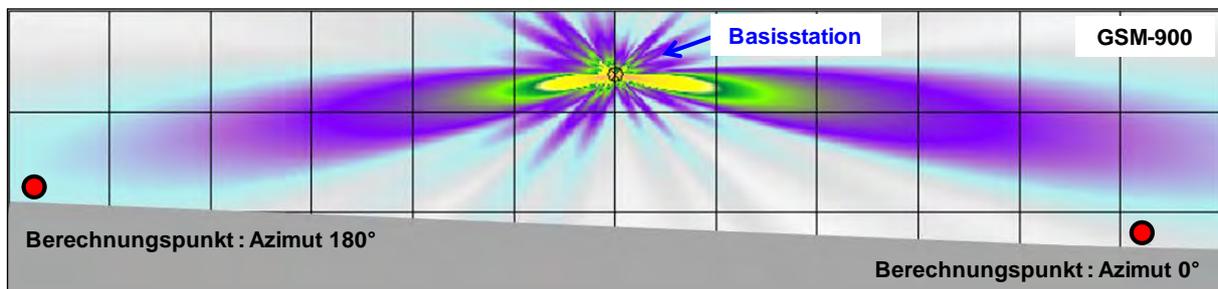


Bild 5.5: Lage der Messpunkte unter Berücksichtigung des Geländeverlaufs

Die höhere Immission bei LTE 1800 und GSM 900 im 120°-Sektor ist auf einen höheren elektrischen Downtilt im Vergleich zum 240°-Sektor begründet.

Bezüglich des Vergleichs zwischen Messung und Berechnung lässt sich feststellen, dass die meisten Messpunkte eine geringere Immission aufweisen als rechnerisch prognostiziert. Eine Ausnahme bilden lediglich die bei 265° und 345° liegenden Messpunkte, die sich im Bereich zwischen „Berechnung“ und „Berechnung + 3 dB“ bzw. geringfügig darüber bewegen. Nur diese beiden Messpunkte hatten Sicht auf die Anlage und werden offenbar korrekt prognostiziert. Von allen anderen Messpunkten bestand keine direkte Sicht. Ihre gemessene Immission ist demzufolge kleiner als die prognostizierte, da das verwendete Freiraumausbreitungsmodell keine Dämpfungen durch Sichthindernisse berücksichtigt und vielmehr von freier Sicht aller Messpunkte auf die Anlage ausgeht.

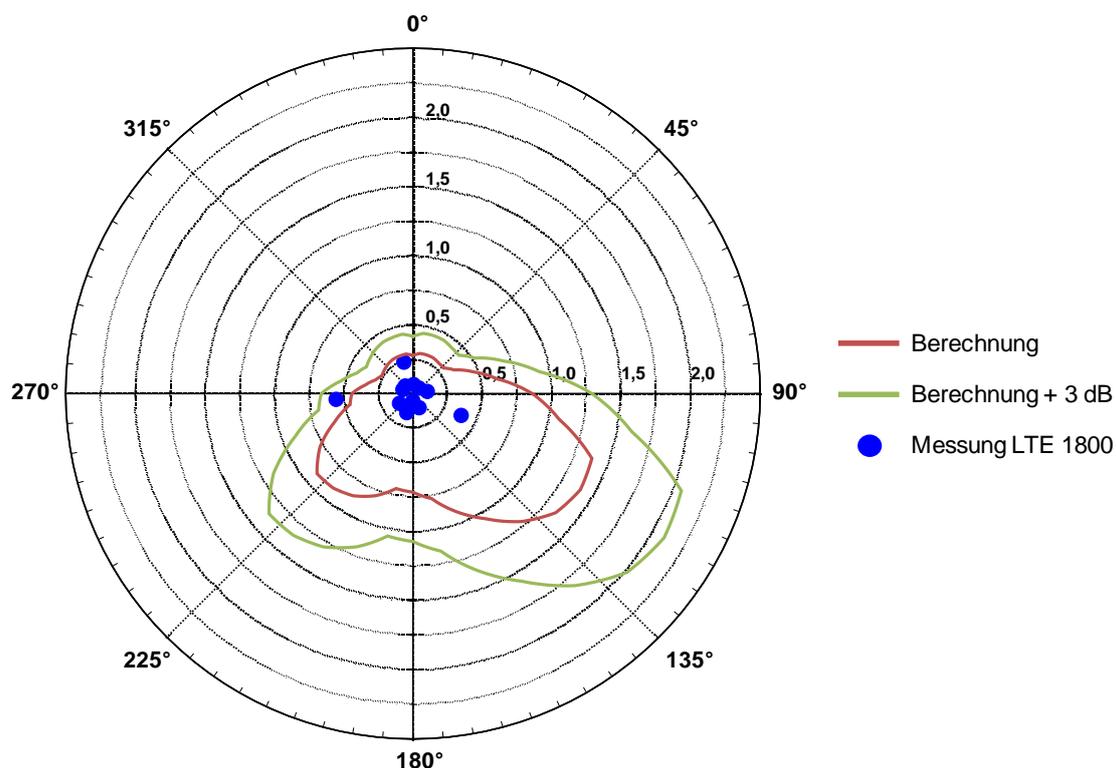


Bild 5.6: Vergleich zwischen Messung und Berechnung für LTE 1800 (Achsenwerte elektrische Feldstärke in V/m)

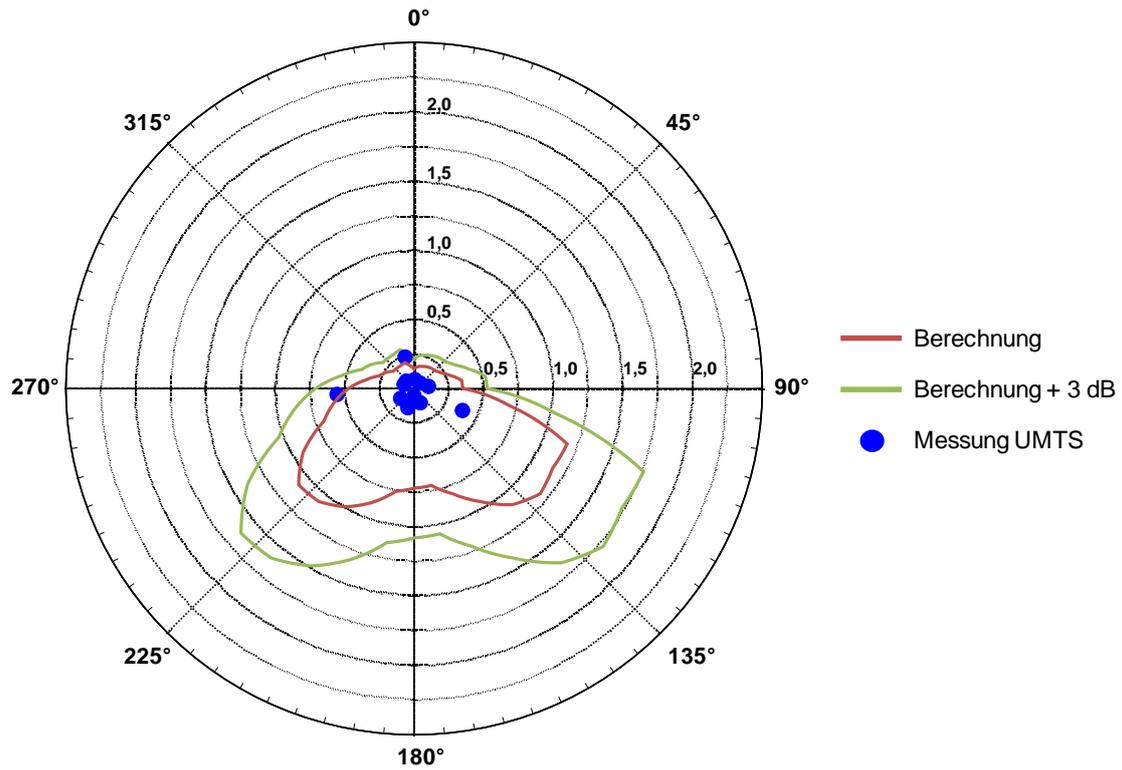


Bild 5.7: Vergleich zwischen Messung und Berechnung für UMTS (Achsenwerte elektrische Feldstärke in V/m)

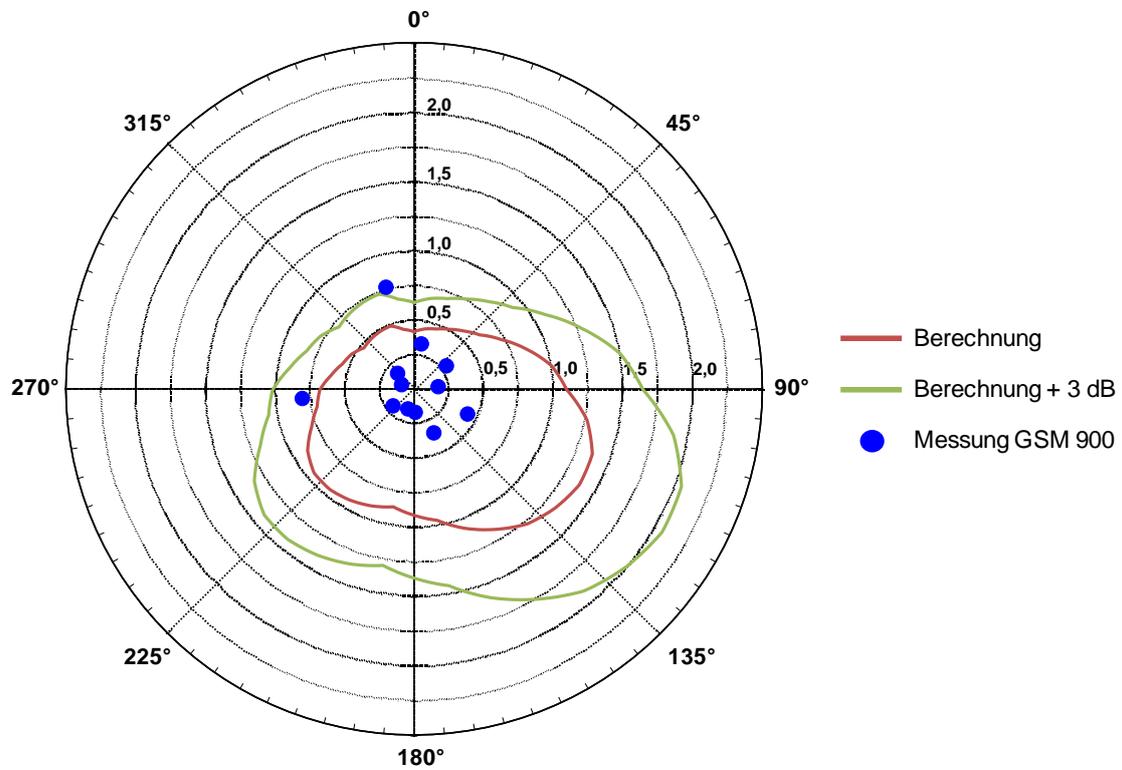


Bild 5.8: Vergleich zwischen Messung und Berechnung für GSM 900 (Achsenwerte elektrische Feldstärke in V/m)

6 Untersuchung des feinskaligen Höhenverhaltens der Immission

Die Immission im Umfeld einer Mobilfunkanlage ist bei gegebenem Abstand und Ausrichtung zur Anlage zusätzlich auch von der Höhe des Immissionspunktes abhängig. In folgendem Kapitel wird diese Höhenabhängigkeit an zwei geeigneten LTE-Standorten analysiert.

Um das Höhenverhalten der LTE-Immission(en) für sich und dasjenige der übrigen am Standort installierten Mobilfunkdienste (GSM und/oder UMTS) zu untersuchen, wurde die Immission an zwei Standorten feinskalig (Skalierung auf Stockwerkebene) gemessen und mit einer parallel durchgeführten numerischen Prognose (Freiraumausbreitungsmodell unter Einbeziehung der konkreten Antennendiagramme) verglichen. Alle Messwerte wurden auf den bei der Bundesnetzagentur maximal beantragten Ausbauzustand extrapoliert. Tabelle 6.1 gibt einen Überblick über die beiden untersuchten LTE-Standorte.

Adresse (PLZ, Ort, Straße)	LTE-System	GSM/UMTS am selben Standort
47059 Duisburg, Schifferstraße 10	LTE 1800 FDD, 20 MHz	2 Systeme
40474 Düsseldorf, Georg-Glock-Str. 14	LTE 1800 FDD, 20 MHz	2 Systeme

Tabelle 6.1: Beschreibung der untersuchten LTE-Standorte

6.1 47051 Duisburg, CITY-Parkhaus an der Uferstraße 19

Der erste LTE-Standort zur Untersuchung des feinskaligen Höhenverhaltens der Immission ist an der Schifferstraße 10 in Duisburg. Er wurde im Vergleich zum zweiten Standort so ausgewählt, dass die Messung der Höhenabhängigkeit in vergleichsweise großem Abstand von der Anlage erfolgte. Bild 6.1 beschreibt den Standort der Anlage, die Ausrichtung der Mobilfunksektoren sowie die Lage der Messpunkte. Alle Messpunkte wurden in einer Höhe von 1,5 m bis 23 m über Grund in einer lateralen Entfernung von 320 m zur Sendeantenne und in einem auf die Sendeanlage bezogenen azimutalen Winkel von 85° (d.h. 25° neben der Mitte des 60°-Sektors) angeordnet. Am Standort wird eine LTE 1800 Anlage (Kanalbandbreite 20 MHz) im FDD-Modus betrieben. Neben LTE sind auch noch UMTS und GSM 900 vom gleichen Betreiber installiert.

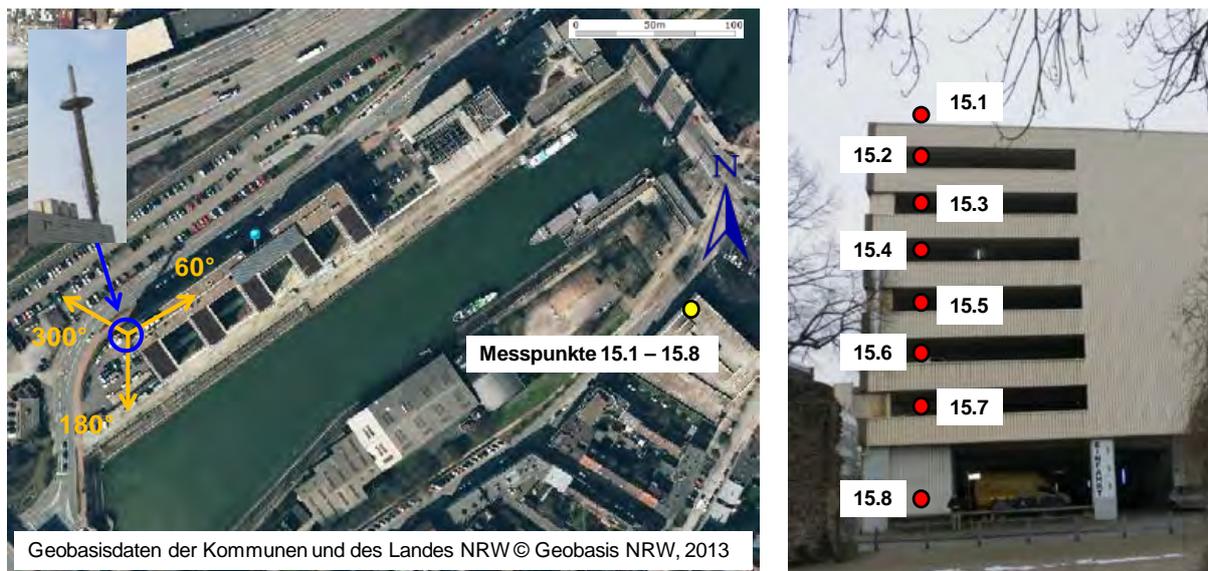


Bild 6.1: Lage der Anlage und der Messpunkte; die azimutale Ausrichtung ist für LTE 1800, GSM 900 und UMTS identisch

Nachfolgende Tabelle beschreibt die Lage der Messpunkte (MP). Es wurden insgesamt 8 MP untersucht.

Messpunkt	Beschreibung	Messpunkthöhe über Grund (Unterkante LTE-Antennen: 31,0 m)	freie Sicht zur Anlage?
15.1	Parkebene 13	23,0 m	ja
15.2	Parkebene 11	20,1 m	ja
15.3	Parkebene 9	17,3 m	ja
15.4	Parkebene 7	14,4 m	ja
15.5	Parkebene 5	11,5 m	ja
15.6	Parkebene 3	8,7 m	ja
15.7	Parkebene 1	5,8 m	ja
15.8	Erdboden	1,5 m	ja

Tabelle 6.2: Übersicht über die Messpunkte, die Messpunktlage und die Sichtbedingungen zur Sendeanlage
 Höhenunterschied des Geländes zwischen Anlage und Messort: 1 m
 Lateraler Abstand der Messpunkte zur Sendeanlage: 320 m
 Azimutale Ausrichtung zur Hauptstrahlrichtung (60°-Sektor): 25°

In den nachfolgenden Bildern sind die Ergebnisse der Messungen (blaue Punkte) dokumentiert und werden mit den Ergebnissen der Berechnungen (rote und grüne Kurve) verglichen. Die Berechnungen wurden sowohl mit der vom Betreiber angegebenen Sendeleistung durchgeführt („Berechnung“), als auch mit einem „Aufschlag“ auf die Sendeleistung von 3 dB („Berechnung + 3 dB“) durchgeführt. Hiermit sollen Effekte wie Reflexionen und Beugungen, die durch konstruktive Interferenzen punktuell zu einer gegenüber der normalen Freiraumausbreitungsprognose erhöhten Immission führen können, modelliert werden.

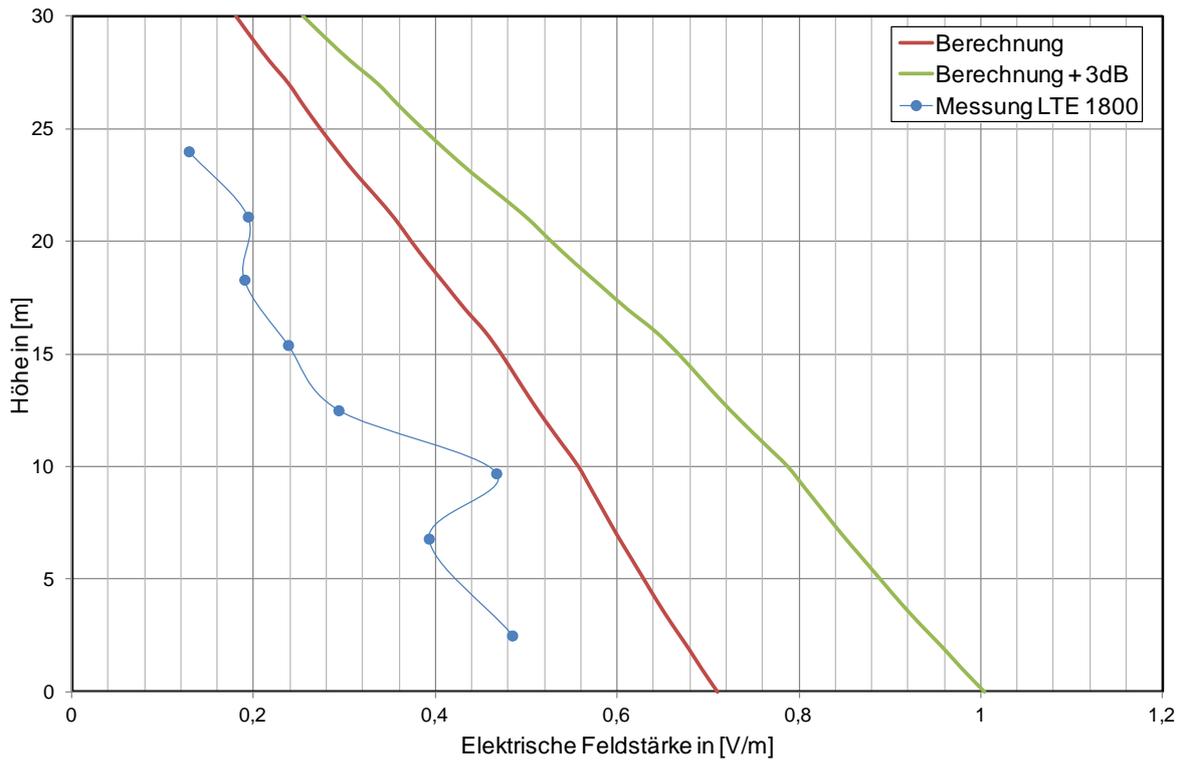


Bild 6.2: Höhenabhängigkeit der Immission: Vergleich zwischen Messung und Berechnung für LTE 1800

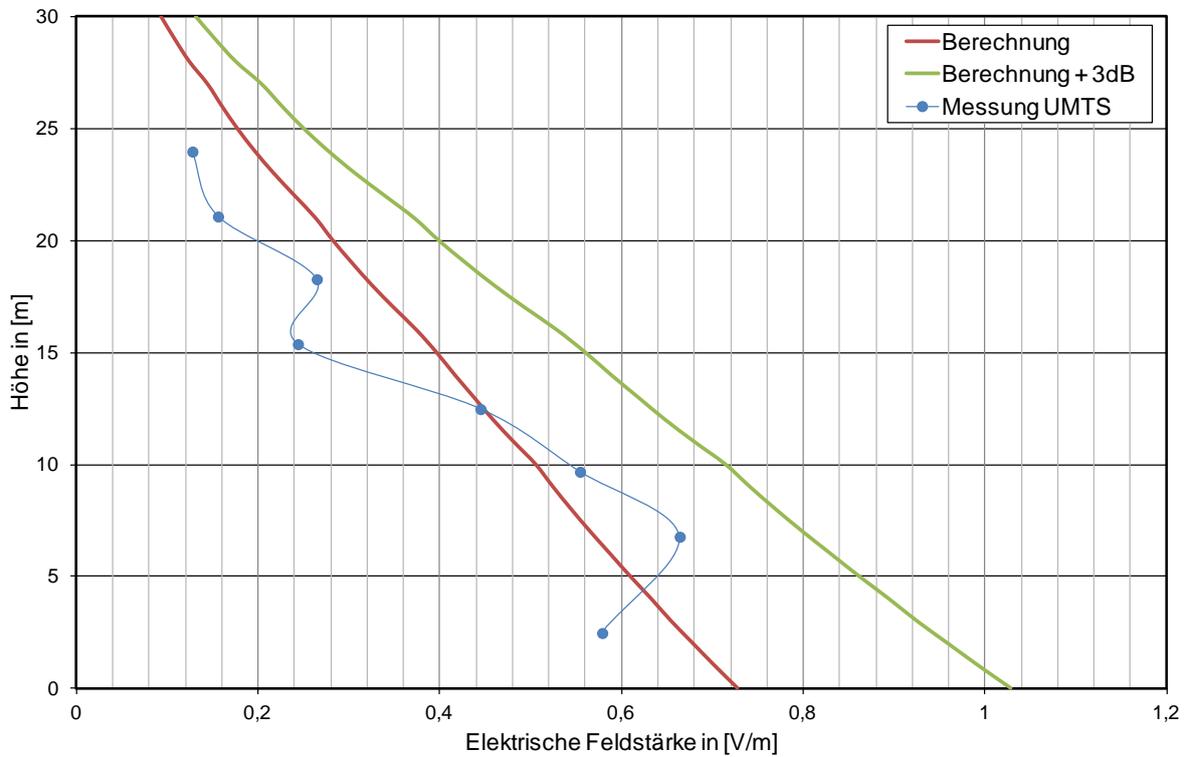


Bild 6.3: Höhenabhängigkeit der Immission: Vergleich zwischen Messung und Berechnung für UMTS

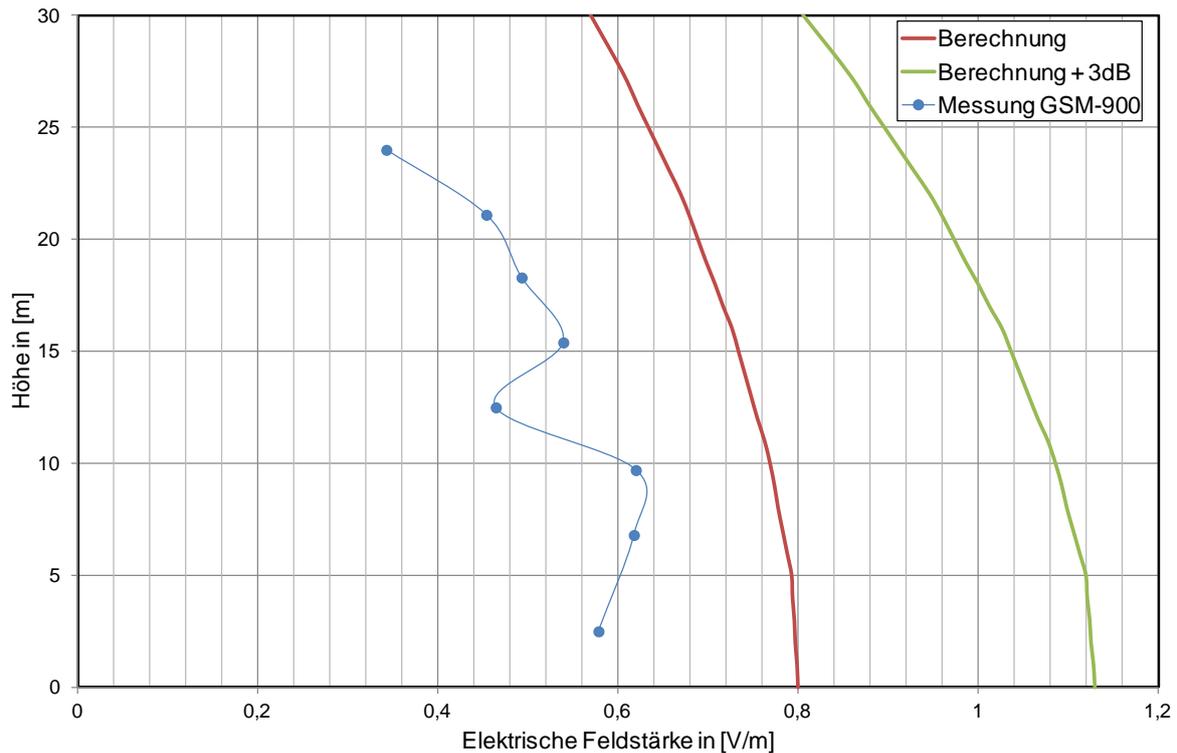


Bild 6.4: Höhenabhängigkeit der Immission: Vergleich zwischen Messung und Berechnung für GSM 900

Ein Vergleich zwischen Mess- und Berechnungsergebnissen liefert folgende Ergebnisse:

Die *qualitative* Übereinstimmung der Ergebnisse zwischen Messung und Rechnung ist bei allen Systemen akzeptabel. Hinsichtlich der *quantitativen* Übereinstimmung ist jedoch festzustellen, dass außer drei Messpunkten beim UMTS-System deutliche geringere elektrische Feldstärken gemessen als bei der Berechnung auch ohne Berücksichtigung eines Aufschlags auf die Sendeleistung prognostiziert wurden.

Eine mögliche Erklärung für diese Differenz könnte im relativ großen Abstand von 320 m zwischen der Sendeanlage und den Messpunkten begründet sein. Hier macht sich zunehmend der Einfluss des Erdbodens bemerkbar, so dass zusätzlich zum direkten Ausbreitungspfad zwischen Basisstation und Messort auch ein zweiter am Boden reflektierter Ausbreitungspfad berücksichtigt werden muss (Zweistrahltheorie, [GEN 98]). Die Überlagerung der Signalanteile beider Ausbreitungspfade (bzw. weiterer an umliegenden Objekten reflektierter Signalanteile) kann dabei je nach Phasenlage zu einer Verstärkung oder Auslöschung des Signals führen. Reflexionen am Boden oder an umliegenden Objekten werden hingegen vom Freiraummodell nicht berücksichtigt.

6.2 40474 Düsseldorf, Hochhaus „Uerdinger Str. 58-62“

Der zweite LTE-Standort zur Untersuchungen des feinskaligen Höhenverhalten der Immission ist an der Georg-Glock-Str. 14 in Düsseldorf. Bild 6.5 beschreibt den Standort der Anlage, die Ausrichtung des betrachteten Mobilfunksektors sowie die Lage der Messpunkte. Alle

Messpunkte wurden in einer Höhe von 1,5 m bis 32 m über Grund in einer lateralen Entfernung von 130 m zur Sendeantennen und in einem azimutalen Winkel von -45° bezogen auf die Hauptstrahlrichtung (0° -Sektor) angeordnet. Am Standort wird eine LTE 1800 Anlage (Kanalbandbreite 20 MHz) im FDD-Modus betrieben. Neben LTE sind auch noch UMTS und GSM 900 vom gleichen Betreiber installiert.

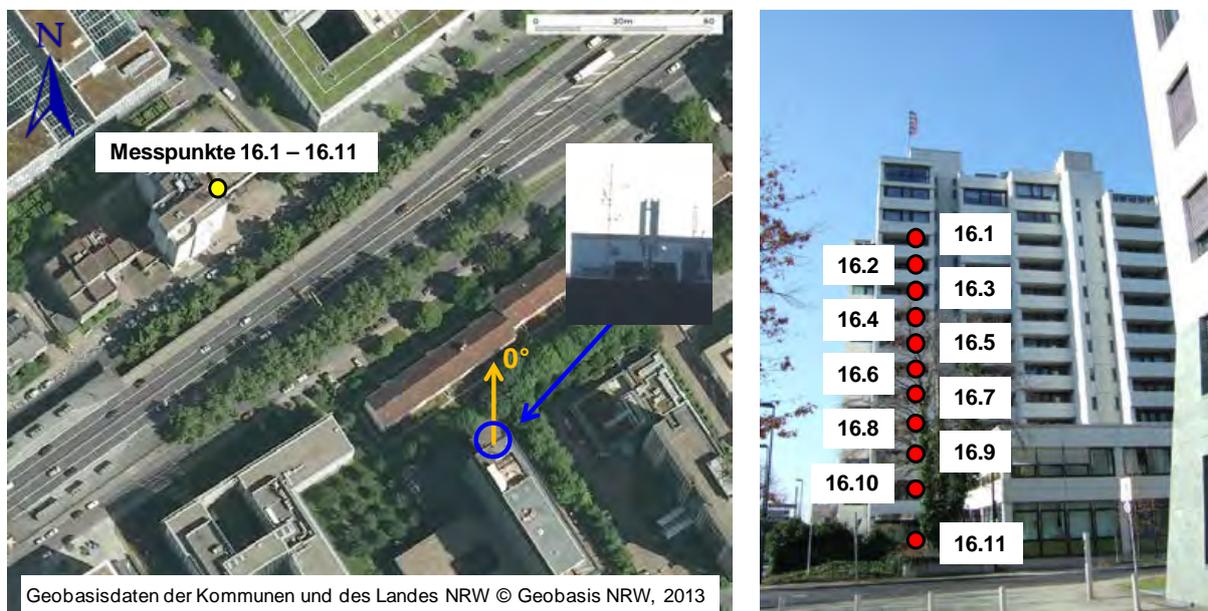


Bild 6.5: Lage des betrachteten Sektors und der Messpunkte; die azimutale Ausrichtung ist für LTE 1800, GSM 900 und UMTS identisch

Nachfolgende Tabelle beschreibt die Lage der Messpunkte (MP). Es wurden insgesamt 11 MP untersucht.

Messpunkt	Beschreibung	Messpunkthöhe über Grund (Unterkante LTE-Antennen: 45,2 m)	freie Sicht zur Anlage?
16.1	Balkon, 10. Etage	32,0 m	ja
16.2	Balkon, 9. Etage	29,1 m	ja
16.3	Balkon, 8. Etage	26,2 m	ja
16.4	Balkon, 7. Etage	23,3 m	ja
16.5	Balkon, 6. Etage	20,4 m	ja
16.6	Balkon, 5. Etage	17,5 m	ja
16.7	Balkon, 4. Etage	14,6 m	ja
16.8	Balkon, 3. Etage	11,7 m	ja
16.9	Balkon, 2. Etage	8,8 m	ja
16.10	Balkon, 1. Etage	5,9 m	ja
16.11	EG	1,5 m	ja

Tabelle 6.2: Übersicht über die Messpunkte, die Messpunktlage, die Höhen über Grund und die Sichtbedingungen zur Sendeanlage;
 Lateraler Abstand der Messpunkte zur Sendeanlage: 130 m
 Azimutale Ausrichtung zur Hauptstrahlrichtung (0° -Sektor): -45°

In den nachfolgenden Bildern sind die Ergebnisse der Messungen (blaue Punkte) dokumentiert und werden mit den Ergebnissen der Berechnungen (rote und grüne Kurve) verglichen. Die Berechnungen wurden sowohl mit der vom Betreiber angegebenen Sendeleistung durchgeführt („Berechnung“), als auch mit einem „Aufschlag“ auf die Sendeleistung von 3 dB („Berechnung + 3 dB“). Hiermit sollen Effekte wie Reflexionen und Beugungen, die durch konstruktive Interferenzen punktuell zu einer gegenüber der normalen Freiraumausbreitungsprognose erhöhten Immission führen können, modelliert werden.

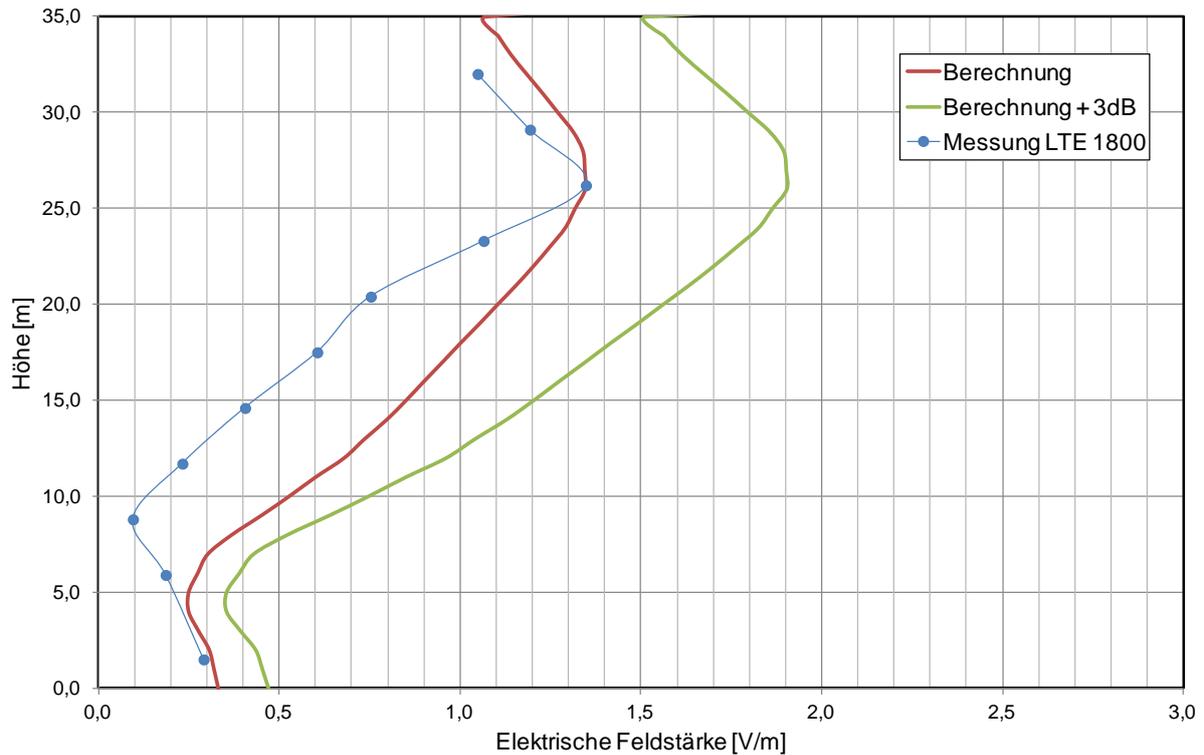


Bild 6.6: Höhenabhängigkeit der Immission: Vergleich zwischen Messung und Berechnung für LTE 1800

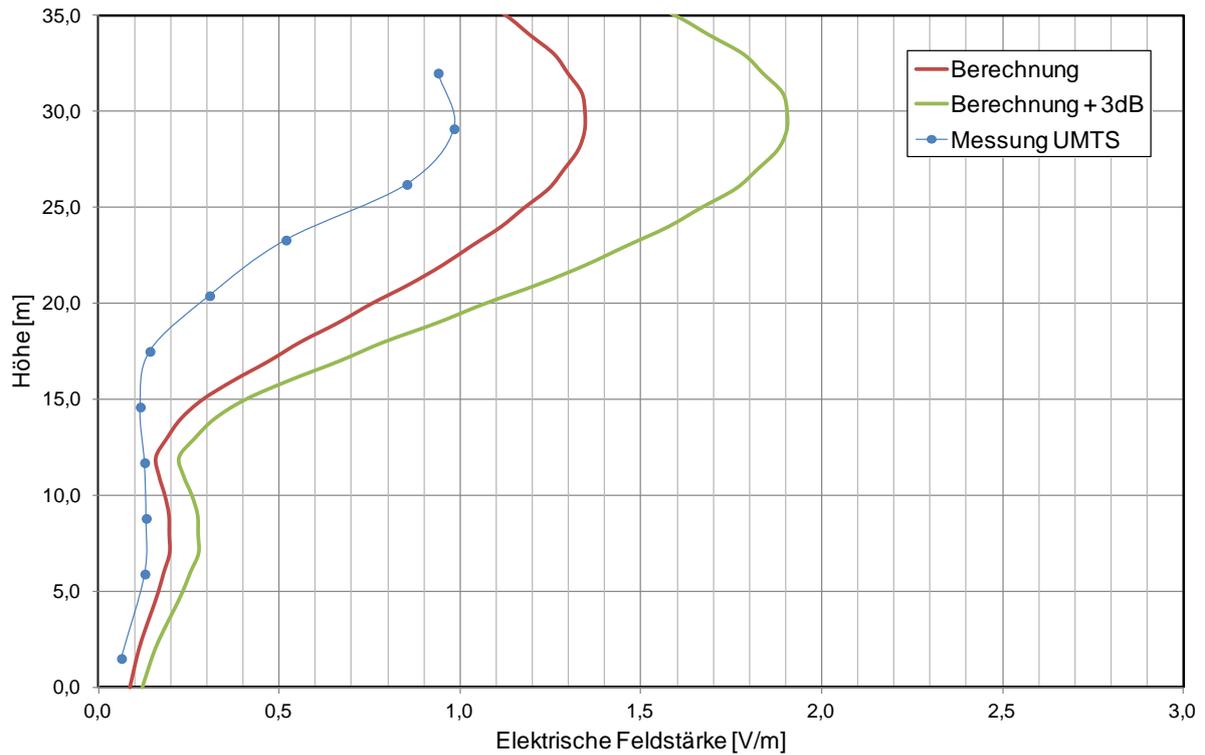


Bild 6.7: Höhenabhängigkeit der Immission: Vergleich zwischen Messung und Berechnung für UMTS

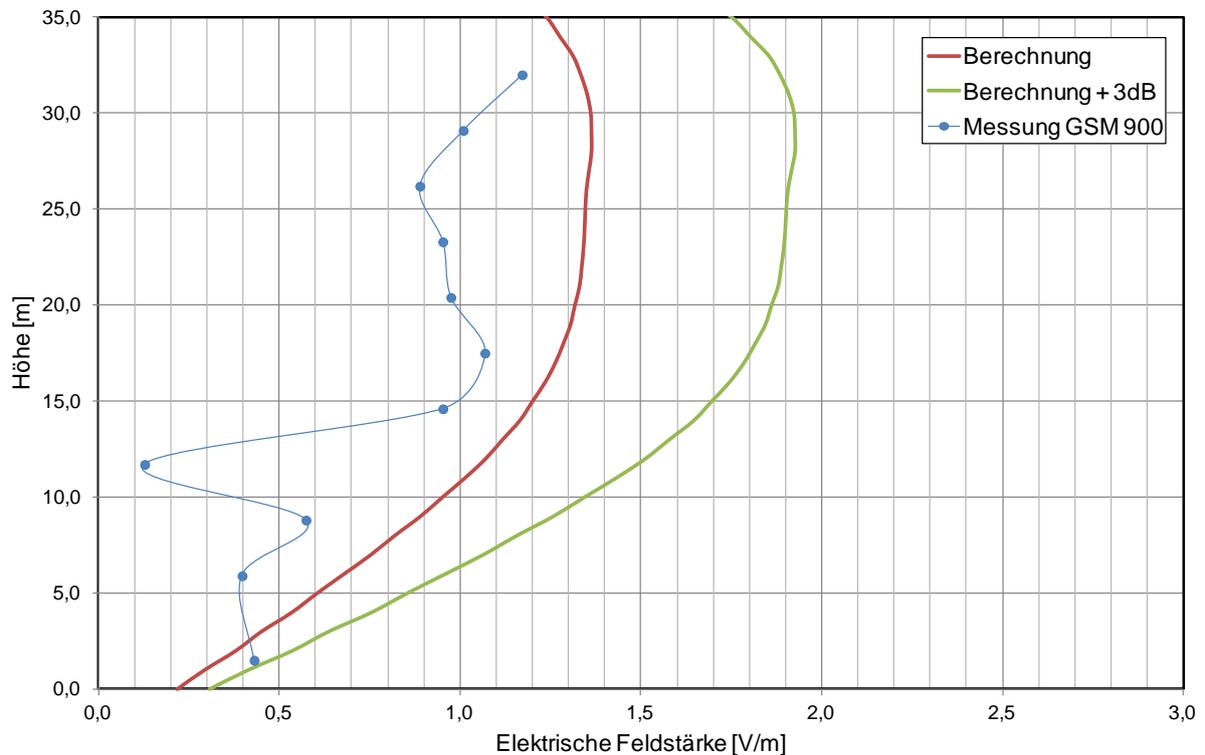


Bild 6.8: Höhenabhängigkeit der Immission: Vergleich zwischen Messung und Berechnung für GSM 900

Ein Vergleich zwischen Mess- und Berechnungsergebnissen liefert folgende Ergebnisse:

Die *qualitative* Übereinstimmung der Ergebnisse zwischen Messung und Rechnung ist beim LTE 1800 und UMTS System gut. Insbesondere die Lage der vertikalen Hauptstrahlrichtung (Maximum bei ca. 25-30 m Höhe) und des ersten Einzugs (lokales Minimum bei ca. 5-10 m (LTE 1800) bzw. 10-15 m (UMTS)) werden durch die Messung gut reproduziert. Die qualitative Übereinstimmung bei GSM 900 ist weniger gut. Durch die im Vergleich zu den anderen Mobilfunksystemen breitere Hauptstrahlrichtung spielen offensichtlich Reflexionen (z.B. an der Balkonbegrenzung) eine feldverzerrende Rolle.

Die *quantitative* Übereinstimmung der Ergebnisse zwischen Messung und Rechnung ist beim LTE 1800 System in Hauptstrahlrichtung gut. Außerhalb der Hauptstrahlrichtung sowie bei den anderen Systemen ist jedoch auch hier zu beobachten, dass die gemessenen Werte wie auch im vorhergehenden Szenario tendenziell eher unterhalb der prognostizierten Werte liegen. Als Ursache kommen prinzipiell die bereits in Abschnitt 6.1 diskutierten Gründe in Betracht.

7 Untersuchungen zur Vergleichbarkeit der Messergebnisse nach 26. BImSchV und MV 09 der BNetzA

Für NRW liegen aus den bundesweiten EMVU-Messreihen der vorhandenen aktuellen Umgebungsfeldstärken durch die Bundesnetzagentur (BNetzA) seit den 1990er Jahren umfangreiche EMF-Immissionsmessergebnisse vor. Die Messreihen werden nach der Messvorschrift MV 09/EMF/3 [MV 09] der BNetzA durchgeführt und sie werden nach derzeitiger Kenntnislage auch künftig weitergeführt. Sie unterscheiden sich hinsichtlich der angewendeten Messverfahren von den Immissionsmessungen nach der 26. BImSchV.

In diesem Kapitel wird untersucht, in wieweit eine systematische Korrelation zwischen den Messergebnissen beider Verfahren besteht bzw. wie groß die Spannbreite der Immissionsdifferenzen unter realen Bedingungen ist. Dazu wurden an zwei bezüglich der vorhandenen Immissionssituation möglichst unterschiedlichen Standorten die Immissionen im Frequenzbereich zwischen 9 kHz und 3 GHz frequenzselektiv mit beiden Verfahren gemessen. Die Messergebnisse werden bezüglich der Korrelation bzw. der Immissionsdifferenzen untersucht.

Das Messverfahren der Bundesnetzagentur ist in der „Messvorschrift für bundesweite EMVU-Messreihen der vorhandenen Umgebungsfeldstärken Reg TP MV 09/EMF/3“ [MV 09] detailliert beschrieben. Danach soll der Messpunkt so gewählt werden, dass er repräsentativ für die größtmögliche Feldstärke und damit für den Messort ist. Die Immissionen sind in einem Frequenzbereich von 9 kHz bis 3 GHz zu messen, der in 13 Frequenzteilbereiche untergliedert ist. Für jeden Teilbereich sind Vorgaben für die Start- und Stopp-Frequenz, die Sweeptime, die Auflösungs- und Videobandbreite (RBW und VBW) sowie die zu verwendende Antenne enthalten. Für breitbandige Funkdienste (z.B. DAB, DVB-T und UMTS) sind spezielle Einstellungen vorgegeben, die eine der Signalbandbreite entsprechende Auflösungsbandbreite sicherstellen. Pulsierende Aussendungen sind gesondert zu bewerten. Alle Immissionen werden mit dem „Peak-Detektor“ des Spektrumanalysators in der Einstellung „Max-hold“ gemessen. Die Messantenne befindet sich in einer Höhe von 1,5 m, wobei der Maximalwert unter Berücksichtigung von vertikaler und horizontaler Polarisationsrichtung ermittelt wird und Richtwirkungen der Messantennen durch Drehen so zu kompensieren sind, dass die Immissionen mit dem Maximalwert erfasst werden. In den jeweiligen Frequenzteilbereichen werden alle elektrischen Feldstärken aufgenommen, die über einer Schwelle von 40 dB unter dem Grenzwert der BEMFV liegen [BEMFV]. Sind keine Immissionen über dieser Schwelle vorhanden, sind stattdessen die zwei größten Feldstärkewerte im Teilbereich zu berücksichtigen. Über Summationsformeln sind alle gemessenen Immissionen, getrennt in einen Bereich 1 Hz bis 10 MHz und einen Bereich 100 kHz bis 3 GHz grenzwertgewichtet aufzusummieren. Die Summen dürfen als „Ausschöpfungsgrad der Grenzwerte“ den Wert 1 (bzw. 100 %) nicht überschreiten.

Die 26. BImSchV [26. BImSchV] sowie die diese Verordnung erläuternden Durchführungshinweise des Länderausschusses für Immissionsschutz [LAI 04] definieren, dass die Immissionsmessungen am Einwirkungsort mit der jeweils stärksten Exposition durchzuführen sind (örtliche Maximierung) und eine Beurteilung der Messergebnisse auf der Basis der gemess-

senen maximalen Werte zu erfolgen hat. Außerdem sind die Messungen bei der höchsten betrieblichen Anlagenauslastung durchzuführen; anderenfalls sind die Werte entsprechend hochzurechnen (zeitliche Maximierung).

Zur Bestimmung der maximalen Immissionen innerhalb eines Bereiches oder Raumvolumens wird zwischen Punktrastermethode, Drehmethode und Schwenkmethode unterschieden, wobei die Schwenkmethode präferiert wird [LAI 04]. Bei der Schwenkmethode wird der Messbereich mit der Messantenne langsam abgetastet, wobei gleichzeitig eine Änderung der Polarisations- und Raumrichtung der Antenne vorgenommen wird (letzteres entfällt bei Verwendung einer isotropen Messsonde). Die Messung erfolgt etwa in 1,5 Meter Höhe über dem Boden (Körperhöhe) wobei sich der Schwenkbereich typischerweise zwischen einer Höhe von 0,75 m und 1,75 m Höhe erstreckt (Körpervolumen). Mit der „Max-hold“ Funktion des Spektrumanalysators wird die maximal auftretende Immission im durchschwenkten Volumen erfasst.

Für Funkdienste mit auslastungsabhängigen Immissionen sind in [LAI 04] Verfahren beschrieben, die eine Extrapolation der gemessenen Immission auf höchste betriebliche Anlagenauslastung gewährleisten. Diese basieren auf einer Messung der Immission von bestimmten Signalisierungen, die von der Basisstation permanent mit konstanter, definierter und von der Verkehrsauslastung *unabhängiger* Sendeleistung abgestrahlt werden. Mittels des Verhältnisses von maximal möglicher (bei der BNetzA beantragter) Sendeleistung der Basisstation zur Leistung der gemessenen Signalisierung kann dann zuverlässig auf die Immission bei höchster betrieblicher Anlagenauslastung hochgerechnet werden.

Da die Grenzwerte der 26. BImSchV für den Hochfrequenzbereich als *zeitliche Effektivwerte* der elektrischen und magnetischen Feldstärken angegeben sind, ist bei der Messung der RMS-Detektor (Root Mean Square) zu verwenden.

Tabelle 7.1 fasst die wesentlichen Unterschiede zwischen den beiden Messverfahren zusammen:

Kriterium	Reg TP MV 09	26. BImSchV bzw. LAI
Messmethodik	Drehmethode, Polarisationen H+V	Schwenkmethode, alle Polarisationen
Detektor	Peak	RMS
Hochrechnung auf höchste betriebliche Anlagenauslastung	nein	ja

Tabelle 7.1: Für die Immissionsmessung maßgebliche Unterschiede zwischen der RegTP MV 09 und den Bestimmungen der 26. BImSchV bzw. den LAI-Empfehlungen

Im Folgenden werden die mit beiden Methoden erzielten Messergebnisse an zwei unterschiedlichen Messpunkten vorgestellt. Die Messpunkte unterscheiden sich hinsichtlich der dort vorhandenen Funkdienste:

Messpunkt 1 (Bild 7.1 links) befindet sich auf dem Gebäude der IMST GmbH in der Carl-Friedrich-Gauß-Str. 2 in 47475 Kamp-Lintfort. An diesem Messpunkt sind bezüglich der Gesamtmission die Immissionen einer in ca. 350 m Entfernung installierten Mobilfunkanlage eines Betreibers mit den Funkdiensten GSM, UMTS und LTE dominierend. Hierbei ist insbesondere zu berücksichtigen, dass es sich bei den Funkdiensten GSM, UMTS und LTE um Funkdienste mit einer auslastungs- und verbindungsqualitätsabhängigen Sendeleistungsregelung handelt, so dass ein Unterschied zwischen Momentanmission und der Immission bei höchster betrieblicher Anlagenauslastung zu erwarten ist. Weiterhin handelt es sich bei den Diensten UMTS und LTE um digital modulierte Funkdienste mit einem Crestfaktor (Unterschied zwischen kurzzeitiger Maximalleistung und mittlerer Signalleistung) in der Größenordnung von 10 dB. Hier ist in Abhängigkeit des eingesetzten Detektors (Peak oder RMS) mit unterschiedlichen Messwerten zu rechnen.



Bild 7.1: Messpunkt 1 (links) und Messpunkt 2 (rechts) der Vergleichsmessungen nach RegTP MV 09 und 26. BImSchV bzw. LAI-Empfehlungen

Messpunkt 2 (Bild 7.1 rechts) befindet sich auf einem Parkplatz neben der Altfelder Straße 305 in 47475 Kamp-Lintfort. An diesem Messort dominieren bezüglich der Gesamtmission die Immissionen einer etwa 100 m entfernten GSM-Mobilfunkanlage. Das GSM-Mobilfunksignal weist im Gegensatz zu UMTS, LTE, DVB-T oder DAB nur einen geringen Crestfaktor auf.

In den Tabellen 7.2 und 7.3 sind die Messergebnisse beider Verfahren dokumentiert. Neben der Gesamtmission im untersuchten Frequenzbereich zwischen 9 kHz und 3 GHz sind auch einzelne funkdienstespezifische Teilbereiche separat ausgewiesen, in denen relevante

Immissionsbeiträge gemessen wurden. Die Immissionen werden hier einheitlich als Summenfeldstärke angegeben. Dies ist für einen Vergleich der Ergebnisse beider Verfahren äquivalent zum Gesamtausschöpfungsgrad der Grenzwerte, da sich beide Verfahren auf die gleichen Grenzwerte beziehen.

Messpunkt 1			
Funkdienst	Reg TP MV 09	26. BImSchV bzw. LAI	Differenz
DAB	0,017 V/m	0005 V/m	9,7 dB
DVB-T	0,116 V/m	0,056 V/m	6,4 dB
LTE 800	0,977 V/m	0,473 V/m	6,3 dB
GSM 900 / 1800	0,369 V/m	0,403 V/m	-0,8 dB
UMTS	0,901 V/m	0,726 V/m	1,9 dB
Übrige zwischen 9 kHz – 3 GHz	0,074 V/m	0,045 V/m	4,4 dB
GESAMT	1,39 V/m	0,96 V/m	3,2 dB

Tabelle 7.2: Übersicht über die Messergebnisse am Messpunkt 1

Messpunkt 2			
Funkdienst	Reg TP MV 09	26. BImSchV bzw. LAI	Differenz
DAB	0,004 V/m	0,001 V/m	8,6 dB
DVB-T	0,034 V/m	0,012 V/m	9,4 dB
LTE 800	0,009 V/m	0,004 V/m	8,5 dB
GSM 900 / 1800	1,700 V/m	1,553 V/m	0,8 dB
UMTS	0,035 V/m	0,014 V/m	7,8 dB
Übrige zwischen 9 kHz – 3 GHz	0,025 V/m	0,022 V/m	1,5 dB
GESAMT	1,70 V/m	1,55 V/m	0,8 dB

Tabelle 7.3: Übersicht über die Messergebnisse am Messpunkt 2

Am Messpunkt 1 ergibt das Verfahren nach RegTP MV 09 ein um etwa 3 dB höheres Messergebnis als das Verfahren nach 26. BImSchV/LAI. Die Differenzen in einzelnen Teilbereichen sind stellenweise höher. Da die Funkdienste LTE 800 und UMTS (hoher Crestfaktor) zahlenmäßig die Gesamtimmission dominieren, bestimmen die Differenzen in diesen Teilbereichen die Gesamtdifferenz. Hier macht sich vor allem der Unterschied bei den eingesetzten Detektoren bemerkbar, der offenbar von der Hochrechnung auf maximale betriebliche Anlagenauslastung beim Verfahren nach 26. BImSchV/LAI nicht kompensiert wird.

Am Messpunkt 2 ist die Differenz mit weniger als 1 dB geringer und beide Verfahren liefern nahezu ein identisches Ergebnis. Die Gesamtimmission wird durch den Funkdienst GSM dominiert, der über einen niedrigen Crestfaktor verfügt.

Zusammenfassend kann folgendes Fazit gezogen werden:

Die Differenz der Messergebnisse zwischen dem Messverfahren der Bundesnetzagentur und dem Verfahren nach 26. BImSchV/LAI liegt an den beiden untersuchten Standorten zwischen etwa 1 und 3 dB. Die Differenzen in einzelnen funkdienstespezifischen Teilbereichen sind stellenweise höher und können bis zu etwa 10 dB betragen. Die Differenzen in den Teilbereichen können positiv oder negativ sein, so dass sie sich teilweise kompensieren. An beiden untersuchten Standorten wurden mit dem Messverfahren der BNetzA insgesamt und in der Mehrzahl der Teilbereiche größere Immissionen ermittelt als mit dem Verfahren nach 26. BImSchV/LAI. Die Gesamtdifferenz wird maßgeblich durch die Differenz im Teilbereich desjenigen Funkdienstes bestimmt, der die Gesamtmission dominiert. Bei dieser Auswertung ist jedoch zu berücksichtigen, dass lediglich zwei Standorte untersucht wurden. Insbesondere die gefundene Spannweite der Gesamtdifferenzen darf deswegen nicht auf beliebige Standorte verallgemeinert werden.

8 Vergleich der LTE-Immission von Basisstation und Endgerät

Für die Exposition der allgemeinen Bevölkerung sind neben den Immissionen durch (LTE-) Basisstationen auch diejenigen durch (LTE-) Endgeräte relevant. Im folgenden Kapitel werden daher die LTE-Immissionen von zwei LTE-Endgeräten bei maximaler Sendeleistung analysiert und mit den Immissionen von LTE-Basisstationen aus den Messungen gemäß Kapitel 3 verglichen. Die folgenden zwei Tabellen zeigen die verwendeten LTE-Endgeräte.

LTE-Mobiltelefon: HTC Velocity 4G	
Hersteller / Model	HTC / Velocity 4G
IMEI	359222040022540
S/N	HT23FVJ00750
Mobilfunknetze / GSM	850 / 900 / 1800 / 1900 MHz
Mobilfunknetze / UMTS	900 / 2100 MHz
Mobilfunknetze / LTE	800 / 2600 MHz
UE-Kategorie	3



Tabelle 8.1: LTE-Mobiltelefon HTC „Velocity 4G“

LTE-Surfstick: Telekom Speedstick LTE	
Hersteller / Model	Huawei / E398
IMEI	357149040067815
S/N	N3Q5TA1160803254
Mobilfunknetze / GSM	850 / 900 / 1800 / 1900 MHz
Mobilfunknetze / UMTS	2100 MHz
Mobilfunknetze / LTE	800 / 1800 / 2600 MHz
UE-Kategorie	3



Tabelle 8.2: LTE-Surfstick „Telekom Speedstick LTE“

Die Endgeräte wurden dabei sofern hardwaretechnisch möglich in den LTE-Frequenzbereichen LTE 800 und LTE 1800 betrieben, da, wie die Immissionsmessungen an Basisstationen nach Kapitel 3 zeigen, der derzeitige Netzausbau in Deutschland primär in diesen Frequenzbereichen stattfindet.

Die Messungen erfolgten in einer störungsfreien Umgebung (EMV-Absorberkammer). Mit einem LTE-Basisstationssimulator Anritsu MT 8820C wurde das jeweilige Endgerät zum Senden auf maximaler Sendeleistung angeregt. Anschließend wurden die elektrischen Feldstärken bei verschiedenen azimutalen Winkelausrichtungen und Abständen bestimmt.

8.1 HTC „Velocity 4G“

In folgendem Abschnitt werden die Messergebnisse für das HTC „Velocity 4G“ vorgestellt. Tabelle 8.3 zeigt zum einen die Parameter, mit denen das Endgerät betrieben wurde, und zum anderen die Einstellungen am Messempfänger.

Einstellungen - Endgerät		Einstellungen – Messempfänger (Narda SRM-3006 + isotrope Messantenne)	
Sendemittelfrequenz	847,0 MHz	Modus	Level Recorder
Bandbreite	10 MHz	Mittelfrequenz	847 MHz
Modus	FDD	Auflösebandbreite (RBW)	10 MHz
Modulation	QPSK	Videobandbreite (VBW)	2 kHz
Sendeleistung	maximal		

Tabelle 8.3: Einstellung für das Endgerät und den Messempfänger

Die Messungen wurden für die folgenden zwei Ausrichtungen bzw. Betriebsweisen des Mobiltelefons durchgeführt:

1. Telefonieren: Das Mobiltelefon wird hierbei an einem Kopfphantom betrieben
2. Datenverbindung: Das Mobiltelefon wird „flach“ liegend verwendet; der Benutzer blickt auf das Display

8.1.1 Kopfphantom

Der folgende Abschnitt zeigt die Messergebnisse für den Betrieb des HTC „Velocity 4G“ an einem Kopfphantom (vgl. Bild 8.1). Das Kopfphantom wurde mit einer gewebesimulierenden Flüssigkeit für den hier betrachteten Frequenzbereich gefüllt. Die Messergebnisse spiegeln also den Fall wider, wenn eine reale Person mit dem Mobiltelefon am Kopf telefoniert.

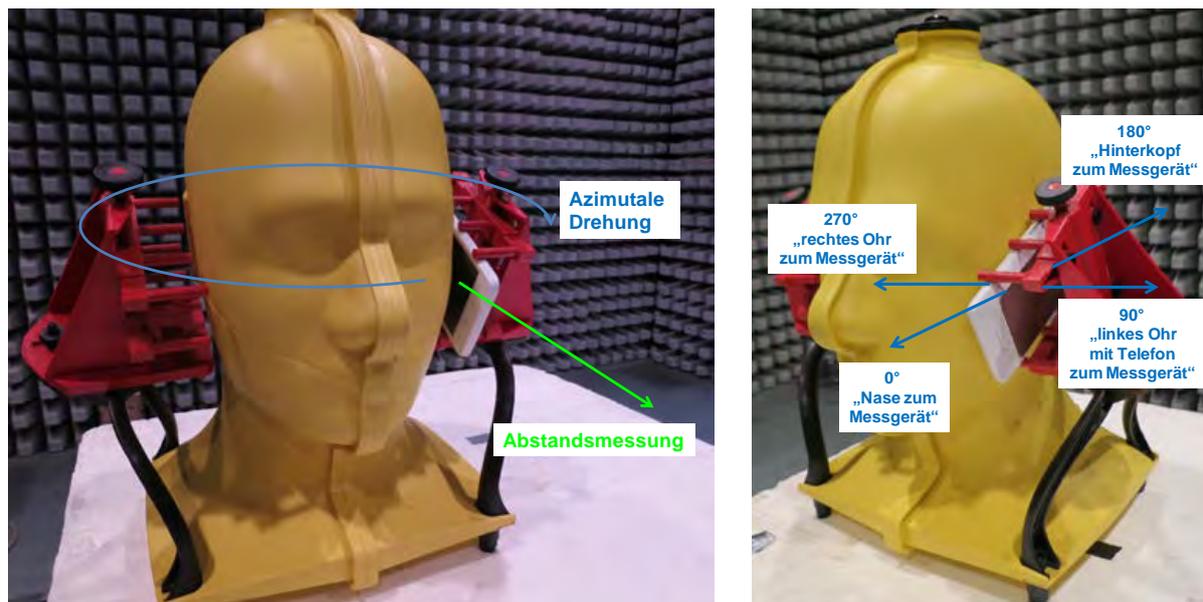


Bild 8.1: Aufbau der Abstandsmessung (links) und azimutale Ausrichtung

In der folgenden Tabelle sind die Messwerte als elektrische Feldstärke für die unterschiedlichen azimutalen Ausrichtungen und Abstände dargestellt.

Sendefrequenz: 847 MHz								
Elektrische Feldstärke [V/m]		Abstand in [m]						
		0,50	0,75	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
Azimutale Ausrichtung in [°]	0	1,12	0,78	0,54	0,32	0,17	0,16	0,09
	45	1,26	0,86	0,57	0,26	0,20	0,16	0,10
	90	2,21	1,49	1,29	0,72	0,43	0,34	0,19
	135	2,11	1,39	1,21	0,66	0,37	0,31	0,18
	180	1,08	0,61	0,56	0,30	0,18	0,15	0,09
	225	0,74	0,46	0,55	0,17	0,15	0,11	0,06
	270	0,74	0,54	0,48	0,25	0,12	0,12	0,06
	315	1,05	0,66	0,46	0,31	0,16	0,13	0,06
	360	1,12	0,78	0,54	0,32	0,17	0,16	0,09

Tabelle 8.4: Messresultate der elektrischen Feldstärke (in [V/m]) bei verschiedenen Abständen und azimutalen Ausrichtungen; HTC „Velocity 4G“ am Kopfphantom betrieben

Im direkten Kontakt zum Mobiltelefon (Rückseite) wurde mit einer Breitbandsonde eine elektrische Feldstärke von ca. 70 V/m gemessen.

Bild 8.2 visualisiert die azimutale Verteilung der elektrischen Feldstärke aus Tabelle 8.4. Es sind die ausgeprägte Hauptstrahlrichtung zwischen 90° und 135° und die Abschattung durch den Kopf im Bereich von 270° deutlich sichtbar.

Bild 8.3 zeigt den Abstandsverlauf in Richtung der maximalen Immission (90°-Richtung). Zu erkennen ist die gleichmäßige Abnahme der Immission hin zu größeren Abständen.

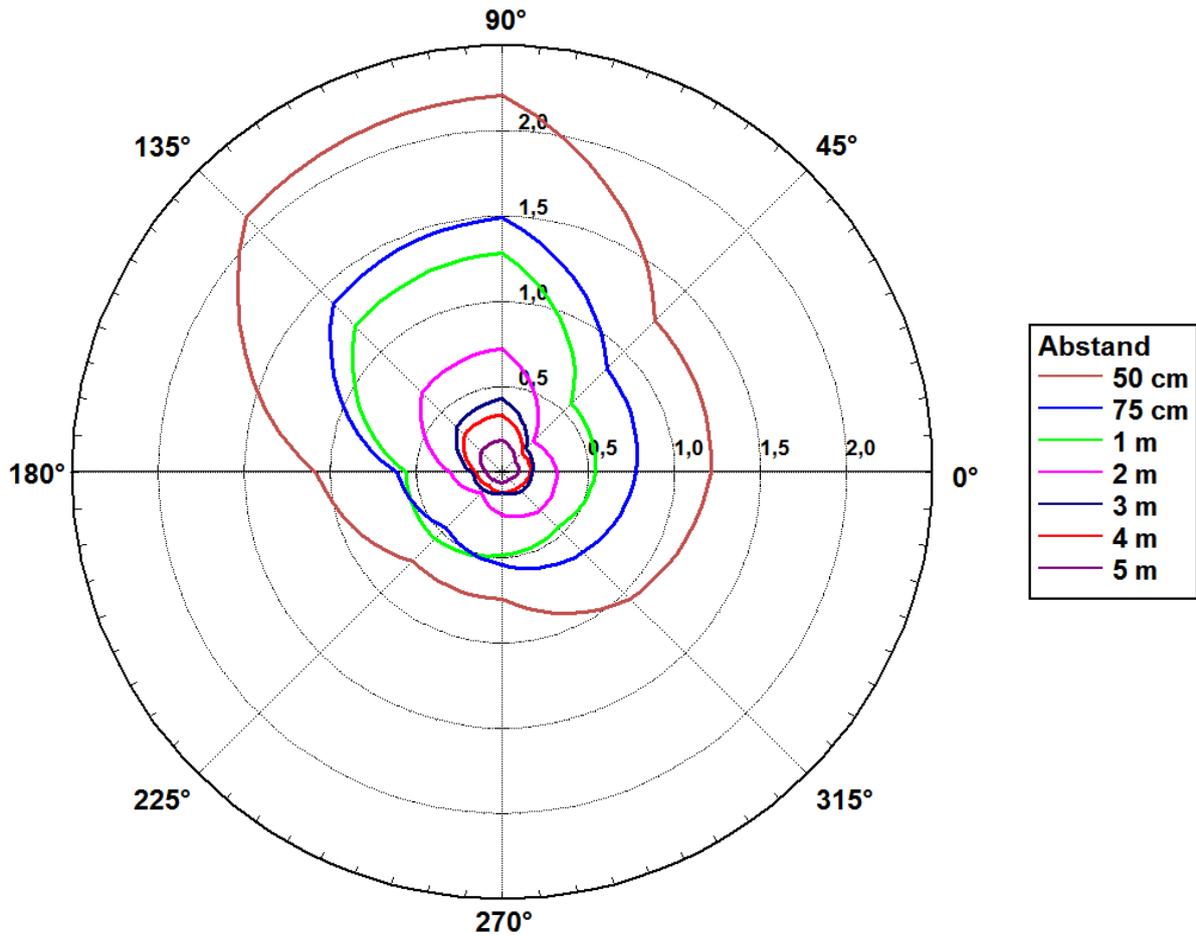


Bild 8.2: Azimutale Immissionsverteilung (Achsenwerte: Elektrische Feldstärke in [V/m]) vom HTC „Velocity 4G“ beim Betrieb am Kopfphantom, 847 MHz

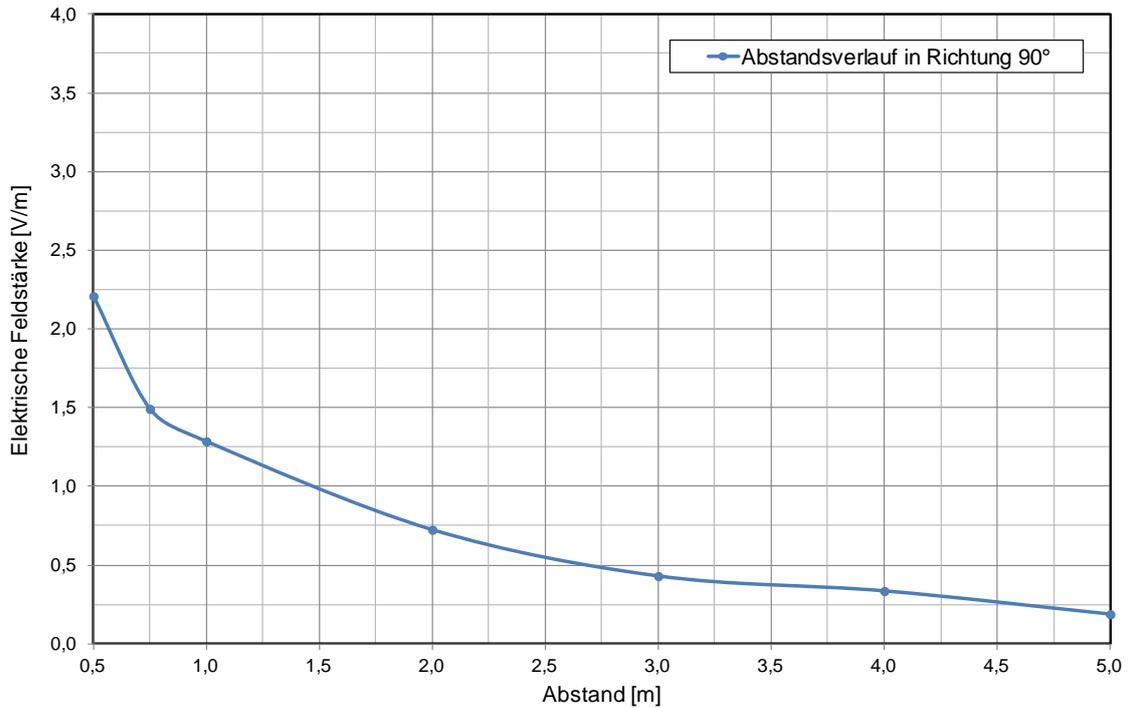


Bild 8.3: Abstandsverlauf der elektrischen Feldstärke in Richtung der maximalen Abstrahlung (vgl. Bild 8.2); 90°-Richtung, 847 MHz

8.1.2 „Flach liegend“

Der folgende Abschnitt zeigt die Messergebnisse für den Betrieb des HTC „Velocity 4G“ z.B. beim Browsen; das Mobiltelefon ist flach liegend auf einem Tisch positioniert (siehe Bild 8.4).

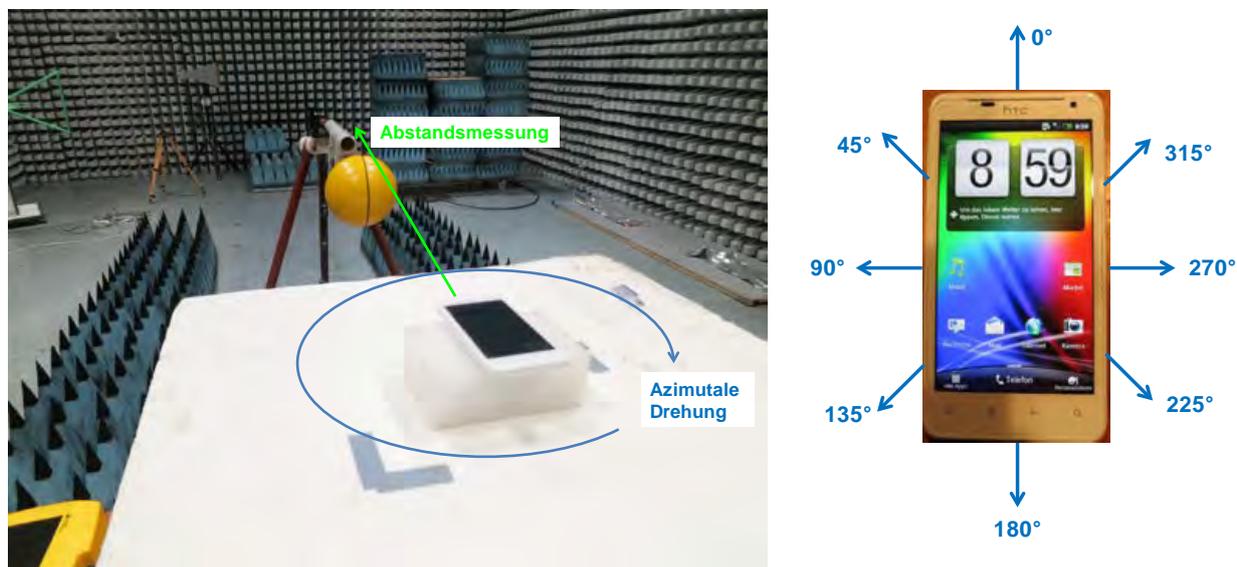


Bild 8.4: Aufbau der Abstandsmessung (links) und azimutale Ausrichtung

In der folgenden Tabelle sind die Messwerte als elektrische Feldstärke für die unterschiedlichen azimutalen Ausrichtungen und Abstände dargestellt.

Sendefrequenz: 847 MHz								
Elektrische Feldstärke [V/m]		Abstand in [m]						
		0,50	0,75	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
Azimutale Ausrichtung in [°]	0	0,56	0,38	0,56	0,26	0,13	0,10	0,11
	45	1,81	1,81	1,28	0,43	0,36	0,21	0,25
	90	2,11	1,98	1,61	0,41	0,50	0,28	0,26
	135	1,13	1,04	1,22	0,23	0,30	0,16	0,14
	180	0,40	0,37	0,58	0,23	0,15	0,12	0,10
	225	1,46	1,40	1,41	0,26	0,33	0,16	0,16
	270	2,13	2,31	1,46	0,63	0,56	0,24	0,29
	315	1,68	1,64	1,13	0,41	0,38	0,27	0,22
	360	0,56	0,38	0,56	0,26	0,13	0,10	0,11

Tabelle 8.5: Messresultate der elektrischen Feldstärke (in [V/m]) bei verschiedenen Abständen und azimutalen Ausrichtungen; HTC „Velocity 4G“ „flach liegend“

Im direkten Kontakt zum Mobiltelefon (Rückseite) wurde mit einer Breitbandsonde eine elektrische Feldstärke von ca. 70 V/m gemessen.

In den folgenden zwei Bildern ist zum einen die azimutale Verteilung der elektrischen Feldstärke aus Tabelle 8.5 visualisiert und zum anderen ist der Abstandsverlauf in Richtung der maximalen Immission (270°-Richtung) dargestellt.

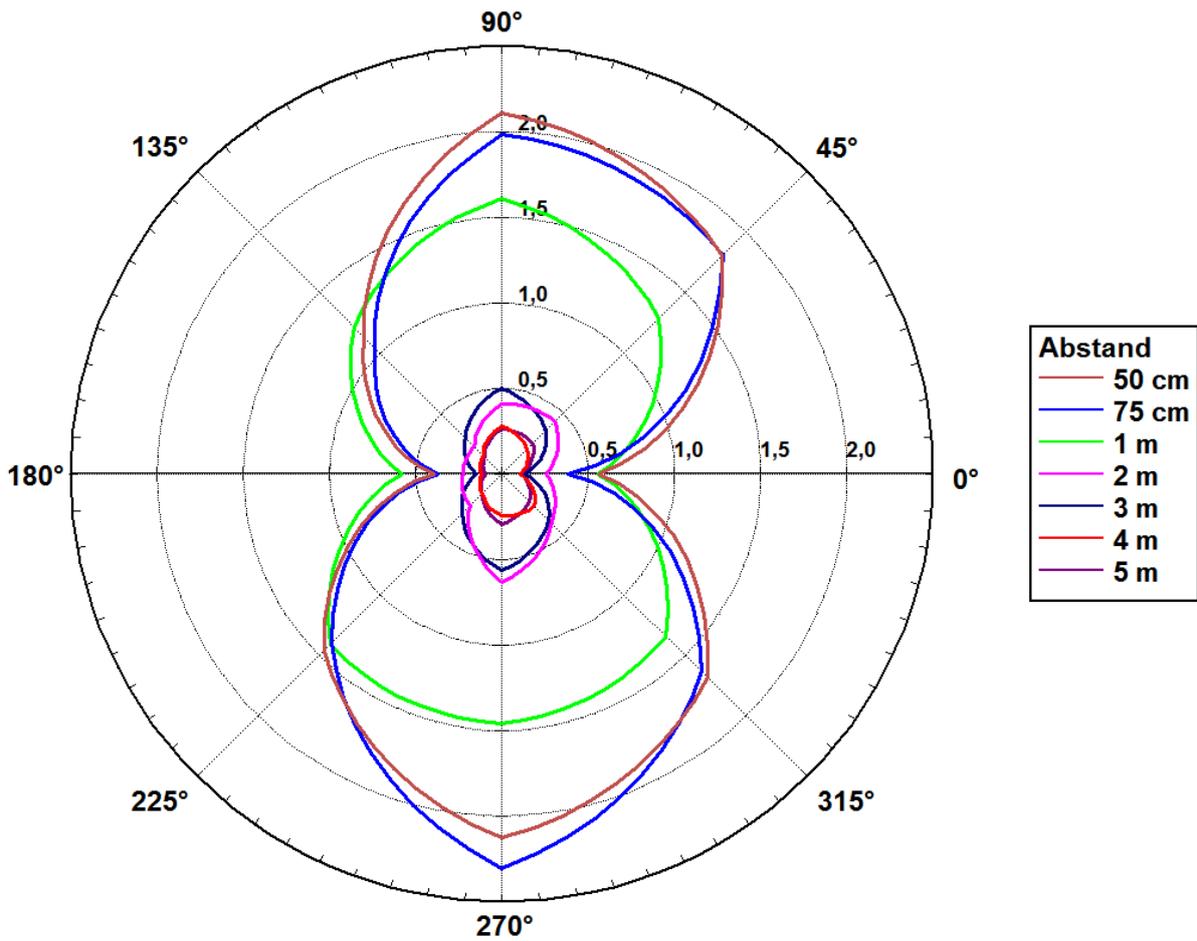


Bild 8.5: Azimutale Immissionsverteilung (Achsenwerte: Elektrische Feldstärke in [V/m]) vom HTC „Velocity 4G“ beim Browsen (Mobiltelefon „flach liegend“), 847 MHz

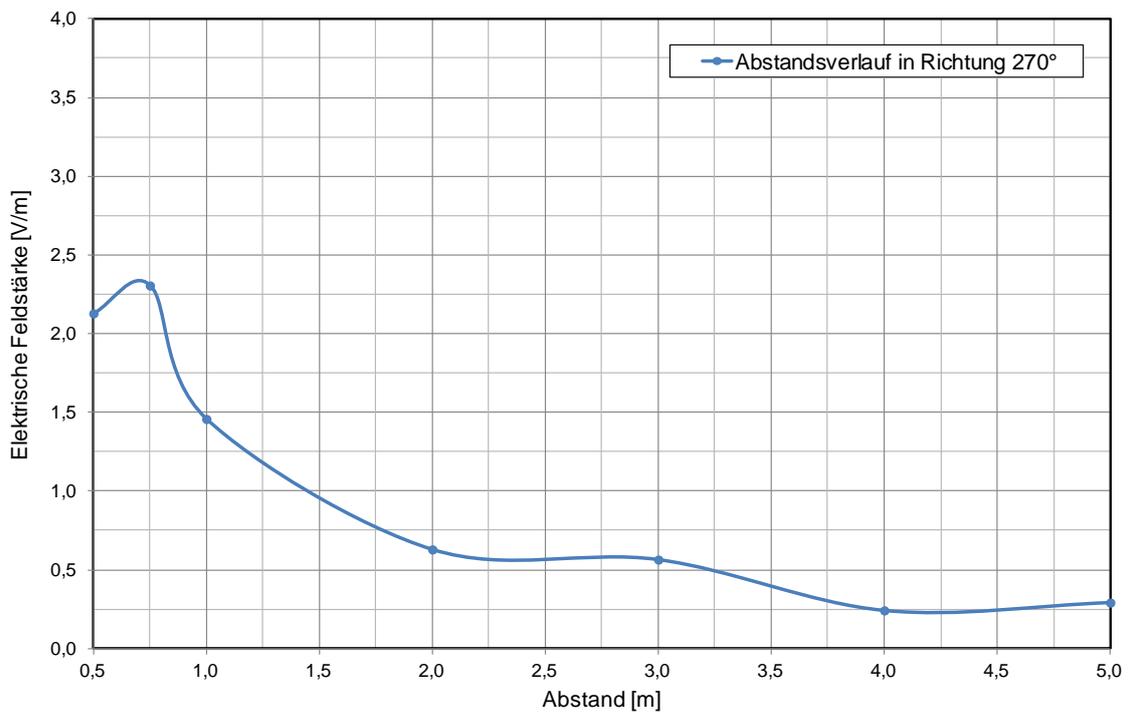


Bild 8.6: Abstandsverlauf der elektrischen Feldstärke in Richtung der maximalen Abstrahlung (vgl. Bild 8.5); 270°-Richtung, 847 MHz

Die azimutale Verteilung in Bild 8.5 zeigt im Vergleich zu Bild 8.2 in der hier betrachteten Position eher eine Dipolcharakteristik der Abstrahlung. Aus Bild 8.6 ergibt sich eine mehr oder weniger gleichmäßige Abnahme der Feldstärke; die vorliegenden „Ausreißer“ sind vermutlich in Reflexionen innerhalb der Absorberkammer begründet.

8.2 Telekom „Speedstick“

In folgendem Abschnitt werden die Messergebnisse für den Telekom „Speedstick LTE“ dargestellt. In Bild 8.7 ist der Aufbau zu sehen. Der Speedstick wurde auf der Rückseite eines Laptops betrieben und der Abstandsverlauf bei verschiedenen azimutalen Ausrichtungen bestimmt.

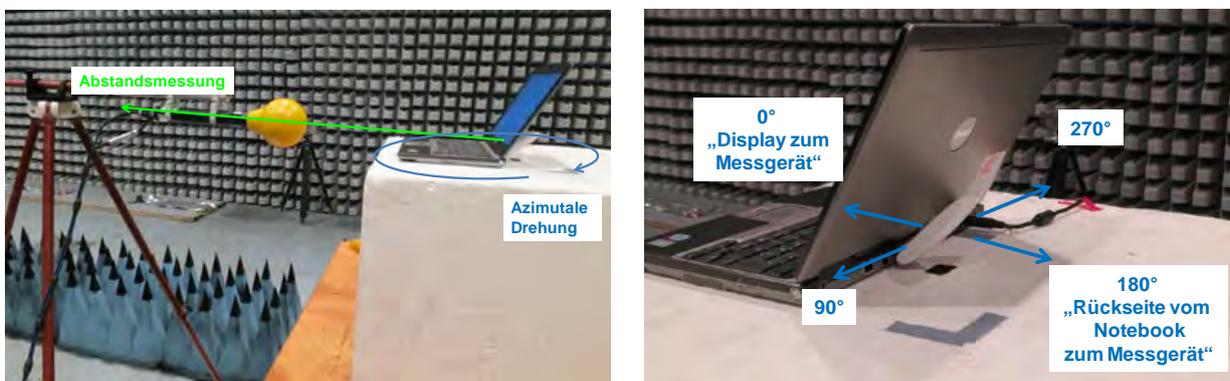


Bild 8.7: Aufbau der Abstandsmessung (links) und azimutale Ausrichtung (rechts) für den Telekom „Speedstick LTE“

Die Messungen wurden für folgende zwei Betriebsmodi untersucht

1. LTE 800: Sendefrequenz auf 847 MHz mit einer Bandbreite von 10 MHz
2. LTE 1800: Sendefrequenz auf 1720 MHz mit einer Bandbreite von 20 MHz

8.2.1 Sendefrequenz „847 MHz“

Der folgende Abschnitt zeigt die Messergebnisse für den Betrieb des Surfstick bei einer Frequenz von 847 MHz. In Tabelle 8.6 sind die Parameter, mit denen das Endgerät betrieben wurde, und die Einstellungen am Messempfänger zu sehen.

Parameter - Endgerät		Einstellungen – Messempfänger (Narda SRM-3006 + isotrope Messantenne)	
Sende-Mittenfrequenz	847,0 MHz	Modus	Level Recorder
Bandbreite	10 MHz	Mittenfrequenz	847 MHz
Modus	FDD	Auflösebandbreite (RBW)	10 MHz
Modulation	QPSK	Videobandbreite (VBW)	2 kHz
Sendeleistung	maximal		

Tabelle 8.6: Einstellung für den Telekom „Speestick LTE“ und den Messempfänger

In der folgenden Tabelle sind die Messwerte als elektrische Feldstärke für die unterschiedlichen azimutalen Ausrichtungen und Abstände dargestellt.

Sendefrequenz: 847 MHz								
Elektrische Feldstärke [V/m]		Abstand in [m]						
		0,50	0,75	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
Azimutale Ausrichtung in [°]	0	1,33	1,21	0,85	0,24	0,20	0,15	0,11
	45	1,42	1,18	0,94	0,51	0,32	0,24	0,30
	90	2,25	1,68	1,19	0,69	0,54	0,28	0,37
	135	3,06	2,18	1,67	0,92	0,65	0,35	0,47
	180	2,76	1,59	1,23	0,60	0,27	0,15	0,18
	225	2,08	1,36	0,93	0,59	0,54	0,27	0,36
	270	2,00	1,41	1,03	0,61	0,57	0,31	0,32
	315	1,88	1,77	1,08	0,61	0,53	0,34	0,39
	360	1,33	1,21	0,85	0,24	0,20	0,15	0,11

Tabelle 8.7: Messresultate der elektrischen Feldstärke (in [V/m]) bei verschiedenen Abständen und azimutalen Ausrichtungen; Telekom „Speedstick LTE“

Im direkten Kontakt zum Speedstick (Rückseite) wurde mit einer Breitbandsonde eine elektrische Feldstärke von 96 V/m gemessen.

Bild 8.8 visualisiert die azimutale Verteilung der elektrischen Feldstärke aus Tabelle 8.7. Es ist die ausgeprägte Hauptstrahlrichtung im Bereich von 135° deutlich sichtbar, die offenbar durch das komplexe Zusammenwirken von Surfstick und Notebook bestimmt wird.

Bild 8.9 zeigt den Abstandsverlauf in Richtung der maximalen Immission (135°-Richtung). Zu erkennen ist die gleichmäßige Abnahme der Immission hin zu größeren Abständen. Im Abstand von 50 cm sind die Werte etwas höher im Vergleich zum Mobiltelefon aus dem vorangegangenen Abschnitt.

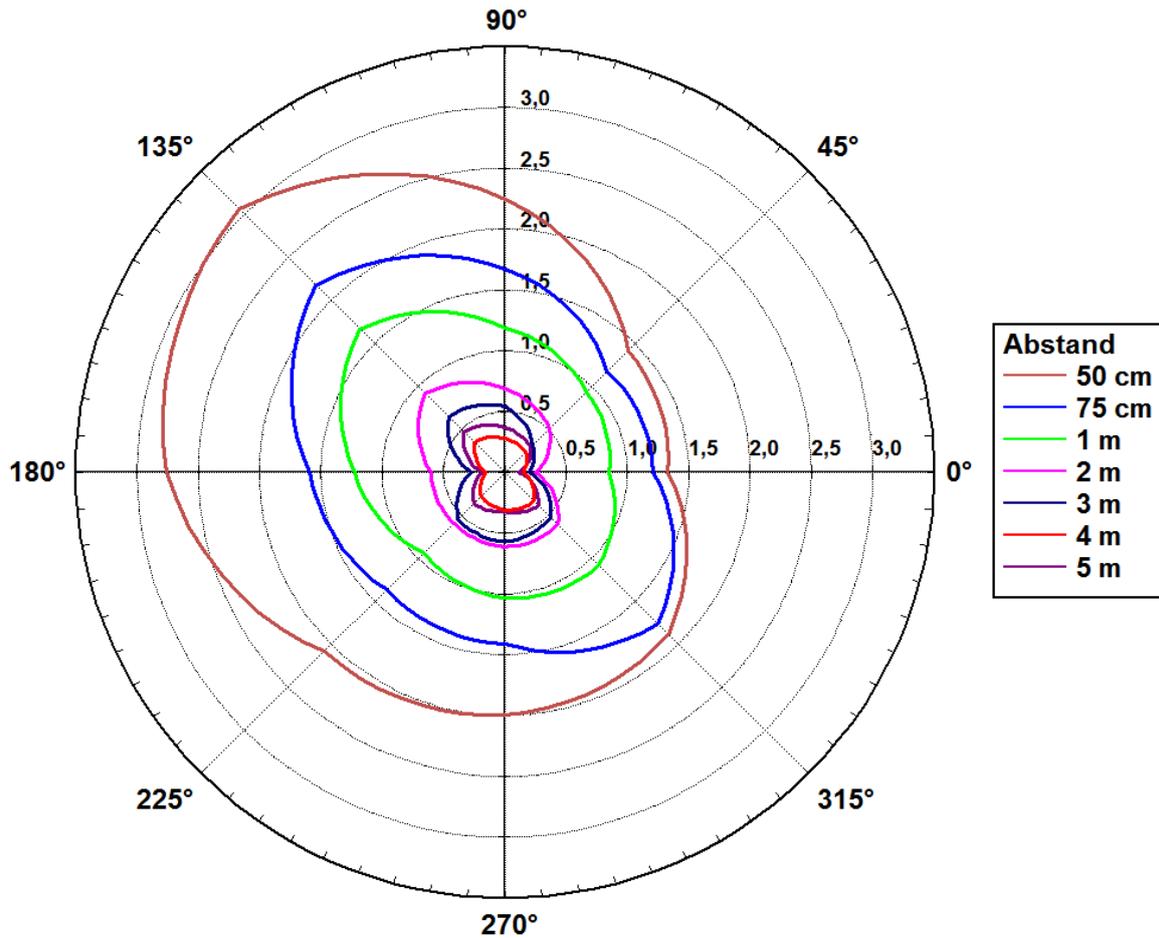


Bild 8.8: Azimutale Immissionsverteilung (Achsenwerte: Elektrische Feldstärke in [V/m]), 847 MHz

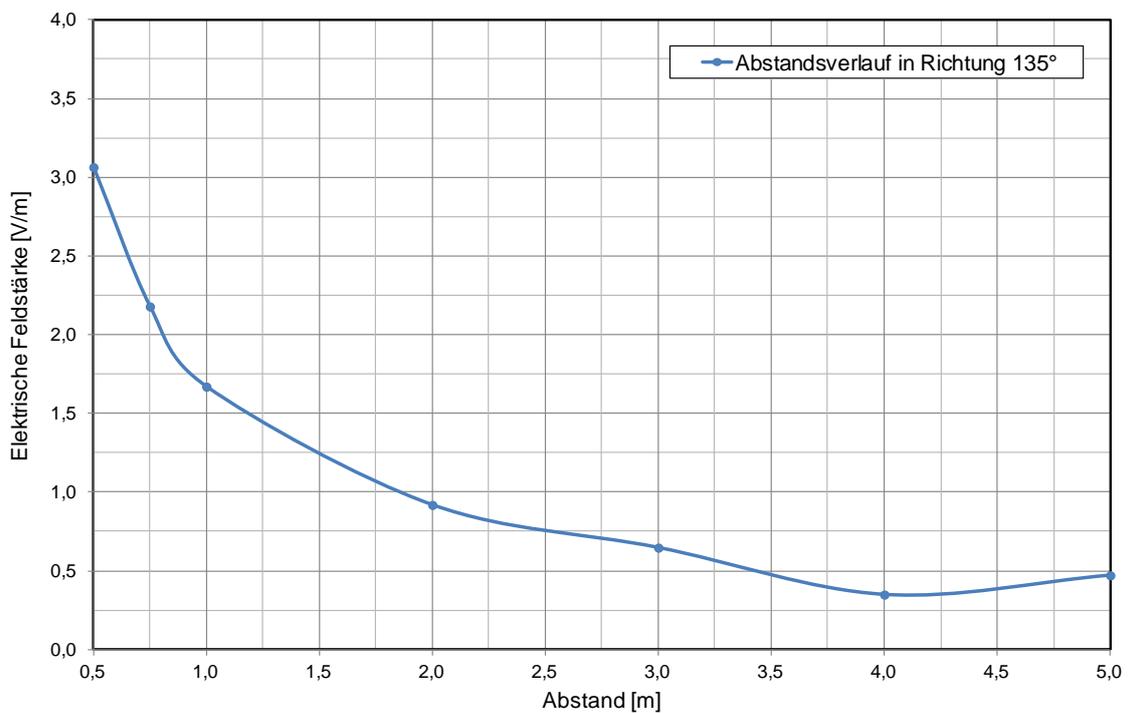


Bild 8.9: Abstandsverlauf in Richtung der maximalen Abstrahlung (vgl. Bild 8.8); 90°-Richtung 847 MHz

8.2.2 Sendefrequenz „1720 MHz“

Der folgende Abschnitt zeigt die Messergebnisse für den Betrieb des Sufsticks bei einer Frequenz von 1720 MHz. In Tabelle 8.8 sind die Parameter, mit denen das Endgerät betrieben wurde, und die Einstellungen am Messempfänger zu sehen.

Parameter - Endgerät		Einstellungen – Messempfänger (Narda SRM-3006 + isotrope Messantenne)	
Sende-Mittelfrequenz	1720,0 MHz	Modus	Level Recorder
Bandbreite	20 MHz	Mittelfrequenz	1720 MHz
Modus	FDD	Auflösebandbreite (RBW)	20 MHz
Modulation	QPSK	Videobandbreite (VBW)	2 kHz
Sendeleistung	maximal		

Tabelle 8.8: Einstellung für den Telekom „Speedstick LTE“ und den Messempfänger

In der folgenden Tabelle sind die Messwerte für die unterschiedlichen azimutalen Ausrichtungen und Abstände dargestellt.

Sendefrequenz: 1720 MHz								
Elektrische Feldstärke [V/m]		Abstand in [m]						
		0,50	0,75	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
Azimutale Ausrichtung in [°]	0	1,24	1,03	0,42	0,21	0,21	0,18	0,10
	45	1,29	0,87	0,73	0,33	0,17	0,20	0,17
	90	1,40	1,08	0,74	0,60	0,19	0,37	0,25
	135	4,14	2,45	2,20	0,94	0,65	0,49	0,55
	180	5,49	3,57	3,41	1,50	0,90	0,63	0,72
	225	4,60	2,95	2,44	0,87	0,79	0,48	0,51
	270	1,83	1,15	0,81	0,32	0,26	0,18	0,22
	315	1,60	0,96	0,70	0,37	0,20	0,24	0,16
	360	1,24	1,03	0,42	0,21	0,21	0,18	0,10

Tabelle 8.9: Messresultate der elektrischen Feldstärke (in [V/m]) bei verschiedenen Abständen und azimutalen Ausrichtungen; Telekom „Speedstick LTE“

Im direkten Kontakt zum Speedstick (Rückseite) wurde mit einer Breitbandsonde eine elektrische Feldstärke von 70 V/m gemessen.

Bild 8.10 zeigt die azimutale Verteilung der elektrischen Feldstärke aus Tabelle 8.9. Es ist die ausgeprägte Richtcharakteristik mit Hauptstrahlrichtung in Richtung Notebook-Rückseite mit eingestecktem Stick deutlich sichtbar.

Bild 8.11 zeigt den Abstandsverlauf in Richtung der maximalen Immission (180°-Richtung). Zu erkennen ist die wiederum die gleichmäßige Abnahme der Immission hin zu größeren Abständen. Die Werte der elektrischen Feldstärke sind im Vergleich zu LTE 800 höher.

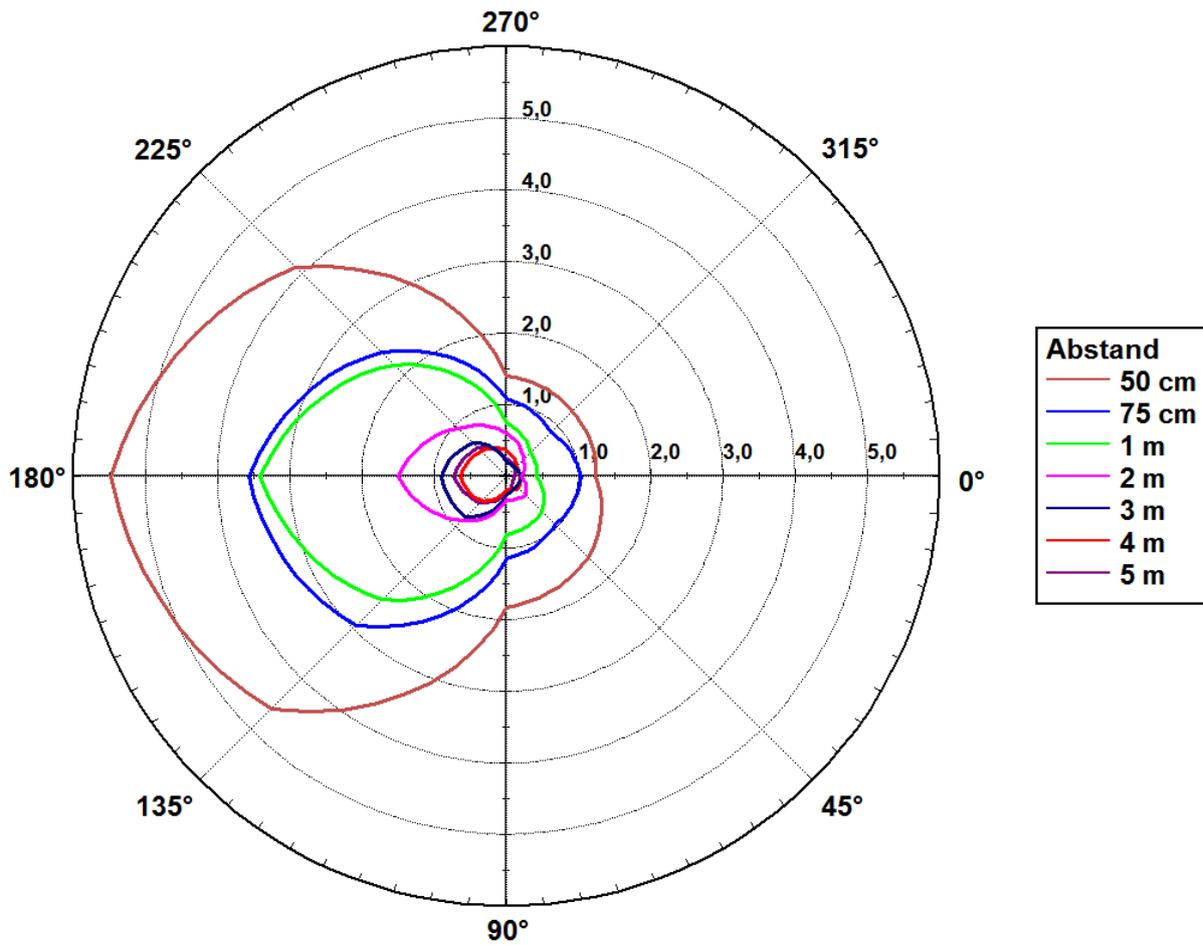


Bild 8.10: Azimutale Immissionsverteilung (Achsenwerte: Elektrische Feldstärke in [V/m]), 1720 MHz

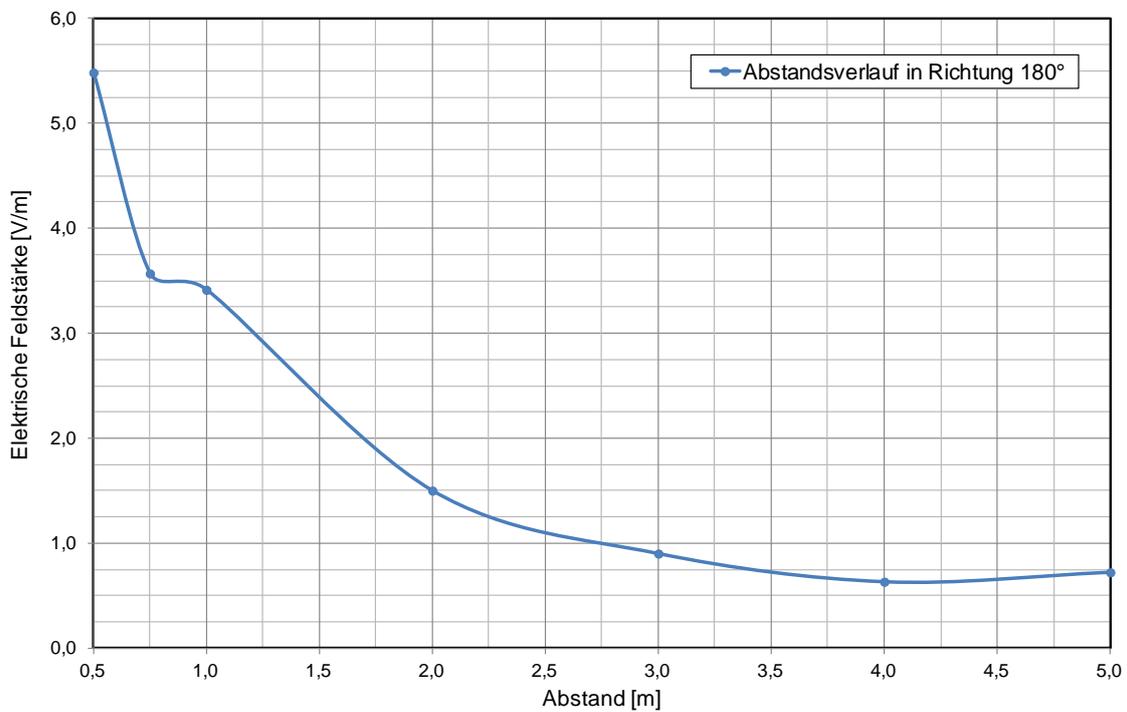


Bild 8.11: Abstandsverlauf in Richtung der maximalen Abstrahlung (vgl. Bild 8.10); 270°-Richtung, 1720 MHz

8.3 Vergleich der LTE-Immissionen von Endgeräten und Basisstationen

In den Abschnitten 8.1 und 8.2 wurden die Immissionen von zwei LTE-Endgeräten bei verschiedenen Abständen und azimutalen Ausrichtungen bestimmt. In Tabelle 8.10 sind die mittleren gemessenen elektrischen Feldstärken (Median) in Bezug auf die Grenzwertschöpfung in Abhängigkeit des Abstandes für beide LTE-Endgeräte zusammenfassend dargestellt. Tabelle 8.11 zeigt die mittlere (Median) Immission der LTE-Basisstationen aus Kapitel 3.

LTE Endgeräte (HTC „Velocity 4G“ & Telekom „Speedstick LTE“)							
Elektrische Feldstärke [% vom Grenzwert]	Abstand in [m]						
	0,50	0,75	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
Medianwert	3,32	2,99	2,23	0,79	0,58	0,41	0,40

Tabelle 8.10: Mittlere LTE-Immissionen (Median) von den untersuchten LTE-Endgeräten in unterschiedlichen Abständen

Basisstationen (aus Kapitel 3)	
Elektrische Feldstärke [% vom Grenzwert]	LTE
Medianwert	0,68

Tabelle 8.11: Mittlere LTE-Immission (Median) der LTE-Basisstationen aus Kapitel 3

Der Vergleich der mittleren Immission (Median) zeigt, dass in Abständen zwischen 2 und 3 m der untersuchten LTE-Endgeräte vergleichbare Werte wie im Umfeld von LTE-Basisstationen erreicht werden. Bei geringeren Abständen überwiegt im Mittel die Immission der LTE-Endgeräte, bei größeren Abständen die der LTE-Basisstationen.

Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass diese Schlussfolgerungen sich nur begrenzt auf beliebige LTE-Endgeräte verallgemeinern lassen, da nur zwei Endgeräte in zwei Frequenzbereichen untersucht wurden und die Zahl der verfügbaren LTE-Endgeräte in nächster Zeit deutlich anwachsen dürfte.

Danksagung

An dieser Stelle sei all jenen Personen und Organisationen gedankt, die einen Anteil am Gelingen des vorliegenden Projektes hatten. Dank gilt vor allem

- Frau Dr. E. Stöcker-Meier vom Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen und Herrn R. Kindel vom Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen für die Initiierung, Finanzierung und Betreuung vorliegenden Vorhabens,
- Herrn F. Weinbrenner von der Firma Deutsche Telekom Technik GmbH für die Unterstützung bei der Durchführung der LTE-Messungen,
- den Herren P. Lumma und M. Munkenbeck von der Firma Vodafone D2 GmbH für die Unterstützung bei der Durchführung von LTE-Messungen,
- Herrn B. Heideck von der Firma E-Plus Mobilfunk GmbH & Co. KG für die Unterstützung bei der Durchführung der LTE-Messungen,
- den Herren R. Bergmeier und H. Rudolph von der Firma Telefónica Germany GmbH & Co. OHG für die Unterstützung bei der Durchführung der LTE-Messungen,
- den Personen und Organisationen, die freundlicherweise die Zugänge zu den jeweiligen Messpunkten gewährt haben.

Anhang

A1 Fotos der Messorte von Kapitel 3

Nachfolgend sind die Messpunkte der 10 Messorte in Nordrhein-Westfalen aus Kapitel 3 mit Fotos dokumentiert. Der Messpunkt, an dem mittels Schwenkmethode die maximale Immission bestimmt wurde, ist durch die Person des Messenden bzw. den grünen Kreis gekennzeichnet. Die untersuchte LTE-Anlage ist, sofern sie vom Messpunkt aus sichtbar ist, mit einem blauen Kreis markiert.

A1.1 Messort 1



Bild A1.1.1: Messpunkt 1.1



Bild A1.1.2: Messpunkt 1.2



Bild A1.1.3: Messpunkt 1.3



Bild A1.1.4: Messpunkt 1.4



Bild A1.1.5: Messpunkt 1.5

A1.2 Messort 2



Bild A1.2.1: Messpunkt 2.1



Bild A1.2.2: Messpunkt 2.2



Bild A1.2.3: Messpunkt 2.3



Bild A1.2.4: Messpunkt 2.4



Bild A1.2.5: Messpunkt 2.5

A1.3 Messort 3



Bild A1.3.1: Messpunkt 3.1

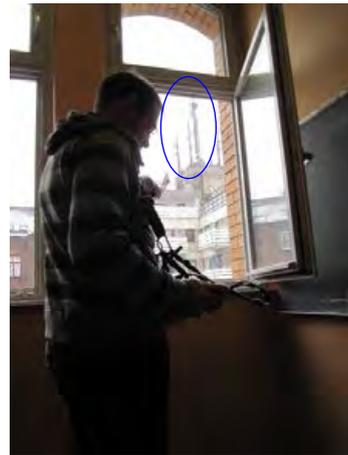


Bild A1.3.2: Messpunkt 3.2



Bild A1.3.3: Messpunkt 3.3



Bild A1.3.4: Messpunkt 3.4



Bild A1.3.5: Messpunkt 3.5

A1.4 Messort 4



Bild A1.4.1: Messpunkt 4.1

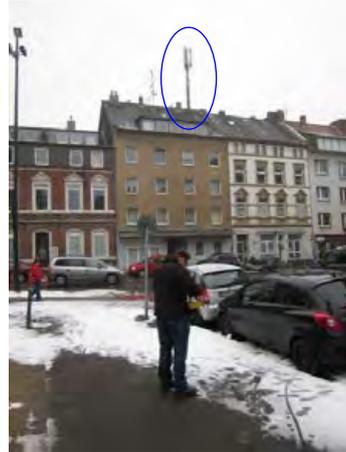


Bild A1.4.2: Messpunkt 4.2



Bild A1.4.3: Messpunkt 4.3



Bild A1.4.4: Messpunkt 4.4



Bild A1.4.5: Messpunkt 4.5

A1.5 Messort 5



Bild A1.5.1: Messpunkt 5.1



Bild A1.5.2: Messpunkt 5.2



Bild A1.5.3: Messpunkt 5.3

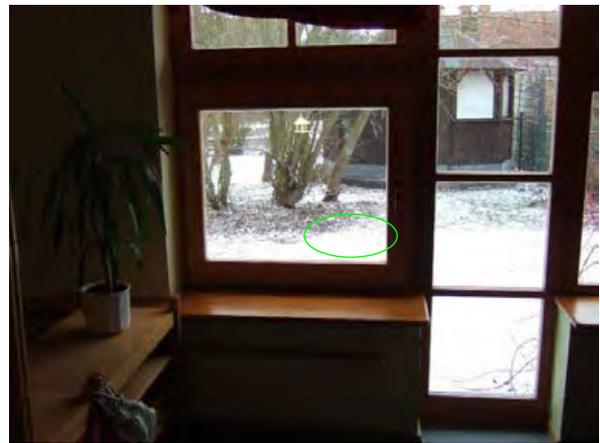


Bild A1.5.4: Messpunkt 5.4



Bild A1.5.5: Messpunkt 5.5



Bild A1.5.6: Messpunkt 5.6

A1.6 Messort 6



Bild A1.6.1: Messpunkt 6.1



Bild A1.6.2: Messpunkt 6.2



Bild A1.6.3: Messpunkt 6.3



Bild A1.6.4: Messpunkt 6.4



Bild A1.6.5: Messpunkt 6.5

A1.7 Messort 7



Bild A1.7.1: Messpunkt 7.1

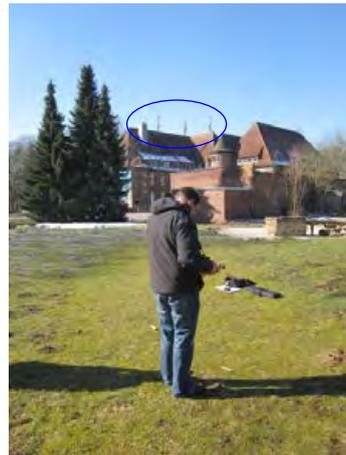


Bild A1.7.2: Messpunkt 7.2



Bild A1.7.3: Messpunkt 7.3



Bild A1.7.4: Messpunkt 7.4

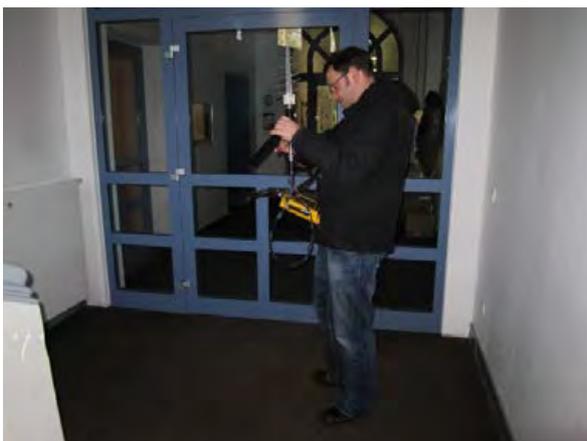


Bild A1.7.5: Messpunkt 7.5

A1.8 Messort 8



Bild A1.8.1: Messpunkt 8.1



Bild A1.8.2: Messpunkt 8.2



Bild A1.8.3: Messpunkt 8.3



Bild A1.8.4: Messpunkt 8.4



Bild A1.8.5: Messpunkt 8.5

A1.9 Messort 9



Bild A1.9.1: Messpunkt 9.1



Bild A1.9.2: Messpunkt 9.2



Bild A1.9.3: Messpunkt 9.3



Bild A1.9.4: Messpunkt 9.4



Bild A1.9.5: Messpunkt 9.5

A1.10 Messort 10



Bild A1.10.1: Messpunkt 10.1



Bild A1.10.2: Messpunkt 10.2



Bild A1.10.3: Messpunkt 10.3



Bild A1.10.4: Messpunkt 10.4 (grün: Messort)

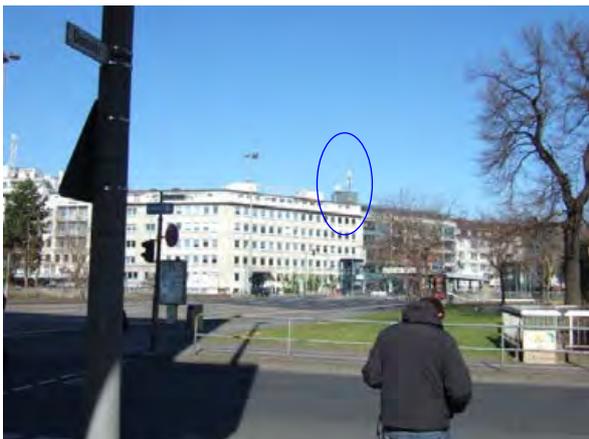


Bild A1.10.5: Messpunkt 10.5

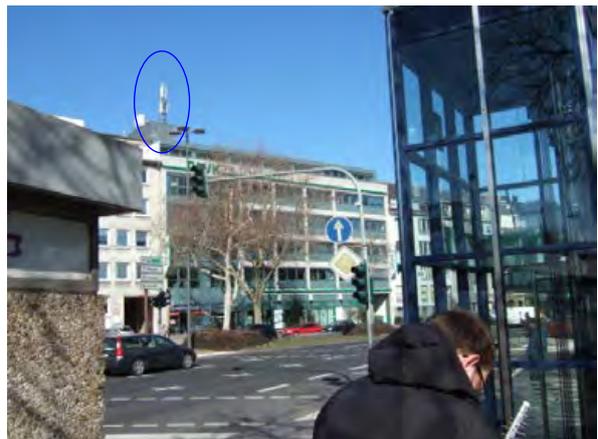


Bild A1.10.6: Messpunkt 10.6

A2 Erläuterung zu den Grenzwerten

Für den Schutz von Personen vor sowie zur Vorsorge von Personen gegen schädliche Umwelteinwirkungen elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Felder (außermedizinisch) im Hochfrequenzbereich besteht in Deutschland seit dem 16. Dezember 1996 mit der „Sechszwanzigsten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV)“ und den darin festgelegten Grenzwerten eine gesetzliche Regelung in diesem Bereich. Dieses Gesetz ist seit dem 01. Januar 1997 in Kraft [26. BImSchV]. Die darin festgelegten Immissionsgrenzwerte basieren auf den international anerkannten Empfehlungen des Komitees für nichtionisierende Strahlen der Internationalen Strahlenschutzvereinigung (IRPA/INIRC), der Internationalen Kommission für den Schutz vor nichtionisierenden Strahlen (ICNIRP), die die Arbeit von IRPA/INIRC fortsetzt, sowie den Empfehlungen der Strahlenschutzkommission (SSK) und gewährleisten als einzuhaltende Schutzwerte den Schutz vor bekannten Gesundheitsgefahren und erheblichen Belästigungen [393/96].

Die Verordnung gilt für die Errichtung und den Betrieb von Hochfrequenzanlagen und Niederfrequenzanlagen, die gewerblichen Zwecken dienen oder im Rahmen wirtschaftlicher Unternehmungen Verwendung finden.

Im Hochfrequenzbereich gilt die 26. BImSchV für ortsfeste Sendeanlagen mit einer Sendeleistung von 10 W EIRP (äquivalente isotrope Strahlungsleistung) oder mehr, die elektromagnetische Felder im Frequenzbereich von 10 MHz bis 300 GHz erzeugen. Sie ist damit auf LTE- und Mobilfunkbasisstationen voll anwendbar.

Zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen 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 A2.1 bestimmten 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 32fache der Werte nach Tabelle A2.1 nicht überschreiten.

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

Tabelle A2.1: 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 überföhrbar und beinhalten dieselbe Information. Deswegen ist es hier ausreichend, lediglich die GröÙe 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 A2.2 fasst die relevanten Grenzwerte der 26. BImSchV für die Abstrahlung der Basisstationen (Downlink) in den Bereichen LTE 800 MHz, LTE 2600 MHz sowie in den Mobilfunkbereichen 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 MHz	38,6	0,10	4,0
LTE 1800 MHz	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 A2.2: Grenzwerte für die LTE- und Mobilfunkfrequenzbereiche nach 26. BImSchV. Der Grenzwert wird bei der Auswertung in diesem Bericht als konstant über dem gesamten Frequenzbereich des jeweiligen Funksystems angesetzt.

Sofern neben Mobilfunkimmissionen auch Immissionen durch andere Funkdienste gemessen wurden, gelten dafür die Grenzwerte nach Tabelle A2.1 und, speziell im Fall von Immissionen bei Frequenzen unterhalb von 10 MHz, die Referenzwerte nach EU-Ratsempfehlung 1999/519/EG [1999/519/EG].

Wirken, so wie in vorliegendem Fall, gleichzeitig Felder unterschiedlicher 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:

$$\text{GW_ASG}_{\text{thermisch}} = \sqrt{\sum_{i=100 \text{ kHz}}^{1 \text{ MHz}} \left(\frac{E_i}{c}\right)^2 + \sum_{i>1 \text{ MHz}}^{300 \text{ GHz}} \left(\frac{E_i}{E_{L,i}}\right)^2} \quad (\text{A1})$$

- E_i gemessene elektrische Feldstärke bei der Frequenz i ;
- $E_{L,i}$ Referenzwert für die elektrische Feldstärke nach Tabelle A2.1;
- c beträgt $87 \cdot \sqrt{f}$ V/m.

Der mit dem Faktor 100 multiplizierte grenzwertbezogene Ausschöpfungsgrad nach Gleichung A1 ergibt die prozentuale Ausschöpfung des zulässigen Feldstärke-Grenzwertes. Dieser darf den Wert 100 nicht überschreiten.

Literaturverzeichnis

- [26. BImSchV] **26. BImSchV**, *Sechszwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV)*, BGBl. Jg. 1996 Teil I Nr. 66, 20.12.1996.
- [BEMFV] **BEMFV**, *Verordnung über das Nachweisverfahren zur Begrenzung elektromagnetischer Felder vom 20. August 2002*, BGBl. Jg. 2002 Teil I Nr. 60, 27.08.2002.
- [BOR 02] **Chr. Bornkessel, M. Neikes und A. Schramm**, *Elektromagnetische Felder in NRW - Untersuchung der Immissionen durch Mobilfunk-Basisstationen*, Studie im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (MUNLV) des Landes Nordrhein-Westfalen, Abschlussbericht *Untersuchung der Immissionen durch Mobilfunk Basisstationen*, IMST GmbH, Kamp-Lintfort (2002).
- [BOR 05] **Chr. Bornkessel, M. Schubert, M. Neikes, A. Schramm und P. Schmidt**, *Elektromagnetische Felder in NRW - Untersuchung der Immissionen durch Mobilfunk-Basisstationen*, Studie im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (MUNLV) des Landes Nordrhein-Westfalen, Abschlussbericht *Feldmessungen im Umfeld von UMTS-Mobilfunkseanlagen*, IMST GmbH, Kamp-Lintfort (2005).
- [BOR 05-1] **Chr. Bornkessel und M. Schubert**, *Entwicklung von Mess- und Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Exposition der Bevölkerung durch elektromagnetische Felder in der Umgebung von Mobilfunk Basisstationen*, Studie im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz, Abschlussbericht *Entwicklung geeigneter Mess- und Berechnungsverfahren*, Kamp-Lintfort, (2005).
- [GEN 98] **N. Geng, W. Wiesbeck**, *Planungsmethoden für die Mobilkommunikation*, Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, (1998).
- [LAI 04] **Länderausschuss für Immissionsschutz**, *Hinweise zur Durchführung der Verordnung über elektromagnetische Felder (26. Bundes-Immissionsschutzverordnung)*, Fassung vom 26.03.2004, www.lai-immissionsschutz.de, (2004).
- [MV 09] **Reg TP MV 09/EMF/3**, *Messvorschrift für bundesweite EMVU-Messreihen der vorhandenen Umgebungsfeldstärken*, Ausgabe Februar 2003, Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post, Bonn (2003).

Landesamt für Natur, Umwelt
und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen
Leibnizstraße 10
45659 Recklinghausen
Telefon 02361 305-0
poststelle@lanuv.nrw.de

www.lanuv.nrw.de

