

II. Entwicklung geeigneter Mess- und Berechnungsverfahren

**Bearbeitungszeitraum
1. März 2005 – 31. Oktober 2005**

Kurzfassung

Im zweiten Teilbericht vorliegenden Untersuchungsvorhabens werden sowohl Mess-, als auch Berechnungsverfahren entwickelt bzw. bestehende Verfahren modifiziert, deren Einsatz zur Erhebung der real vorhandenen Immissionen elektromagnetischer Felder im Umfeld von UMTS-Sendeanlagen im dritten Teilbericht beschrieben ist.

Bezüglich *Berechnungsverfahren* wurden für diese Studie verschiedene kommerzielle Softwarepakete im Hinblick auf ihre Eignung zur Ermittlung der Exposition der Bevölkerung in der Umgebung von UMTS-Funksendeanlagen untersucht. Der Begriff „Umgebung“ umfasst hierbei den Bereich außerhalb des Sicherheitsabstandes der Basisstation bis zum Rand des Versorgungsgebietes der entsprechenden Anlage. Anhand eines Kataloges von praxisrelevanten Konfigurationen wurde die Eignung der jeweiligen Software untersucht.

Bezüglich der Eingabeparameter kann zusammenfassend festgehalten werden, dass die bereits in [BOR 05] entwickelte Synthese eines Antennendiagramms zur Kompensation der Abhängigkeit von Frequenz, Downtilt und Montageumgebung direkt übernommen werden kann. Darüber hinaus hat sich gezeigt, dass markante Unterschiede in den Abstrahlcharakteristiken von GSM und UMTS in unterschiedlich breiten Hauptkeulen und unterschiedlichem Gewinn liegen. Bezogen auf die generelle Immissionssituation lässt sich an dieser Stelle schlussfolgern, dass die Wahrscheinlichkeit, sich in direkter Nähe einer Basisstation in Hauptstrahlrichtung zu befinden, bei einer GSM 900-Anlage höher ist als bei einer UMTS-Anlage. Für Messpunkte in Hauptstrahlrichtung ist allerdings damit zu rechnen, dass bei gleicher Sendeleistung aufgrund des höheren Gewinns die absolute Immission durch UMTS größer sein wird als durch GSM 900. Bei einer grenzwertbezogenen Betrachtung muss an dieser Stelle relativierend berücksichtigt werden, dass die Referenzwerte von UMTS und GSM 900 unterschiedlich sind.

Eine multifrequenzielle Nachbildung der Feldquelle zur Berücksichtigung der vergleichsweise großen Signalbandbreite bei UMTS ist aufgrund des enormen Mehraufwandes nicht zu empfehlen. Von den hier verwendeten Softwarepaketen wäre eine Realisierung nur mit Wireless Insite möglich. Dieses stellt die Informationen über Amplitude und Phase am Empfangsort für jede berechnete Frequenz zur Verfügung. Die Einzelresultate müssen anschließend vom Anwender eigenständig in der Art weiter verarbeitet werden, dass diese zu einer kohärenten Überlagerung zusammengefasst werden können. Insgesamt hat die Bandbreite von 5 MHz einen homogenisierenden Einfluss auf die Feldverteilung, so dass die Schwankungsbreite zwischen Maximal- und Minimalwert innerhalb eines betrachteten Volumens kleiner wird als bei einer Simulation mit nur einer Frequenz. Wird nun allerdings der erhebliche Mehraufwand bei der Berechnung und der nachträgliche Aufwand der kohärenten Überlagerung in die Betrachtung mit einbezogen, so ist es für eine Berechnung unter Grenzwertüberprüfungsaspekten (Maximalwertsuche im Volumen) nicht zwingend erforderlich, die Feldquelle multifrequenziell nachzubilden. Denn hier liegt der prognostizierte Feldstärkewert bei einer Frequenz oberhalb des Wertes, der bei Überlagerung mehrerer Frequenzen auftritt.

Da das Simulationsgebiet nicht nur die direkte Senderumgebung, sondern eine gesamte Versorgungszelle umfasst, muss der Geländeverlauf auf jeden Fall in der Berechnung berücksichtigt werden. Darüber hinaus wurden Methoden vorgestellt, die es ermöglichen,

auch die Vielzahl von Gebäuden in den betrachteten Softwarepaketen berücksichtigen zu können.

Insgesamt zeigen die Vergleiche der Simulationsergebnisse von den hier betrachteten Softwarepaketen keine gravierenden Unterschiede. Die Methode „Reine Freiraumausbreitung + 3 dB“ liefert gerade in Situationen mit direkter Sicht zur Sendeantenne annähernd die gleichen Ergebnisse wie die anderen hier betrachteten Programme. Es hat sich aber auch gezeigt, dass in Situationen, in denen keine direkte Sicht zur Sendeantenne herrscht, die Berechnungsergebnisse der anderen Programme wesentlich kleiner sind als die mit Freiraumausbreitung berechneten. Diese Punkte stellen jedoch im vorliegenden Fall, bei denen das gesamte Versorgungsgebiet und nicht nur die unmittelbare Umgebung betrachtet werden soll, die Mehrheit dar.

Dennoch scheinen zunächst alle Softwarepakete mit den gerade angesprochenen Einschränkungen der Methode „Reine Freiraumausbreitung + 3 dB“ an dieser Stelle geeignet, die Immissionsverteilung von UMTS-Sendeanlagen zu bestimmen, und werden somit im nächsten Projektteil für den Vergleich zwischen Berechnung und Messung an ausgewählten Szenarien herangezogen. Zu beachten ist hierbei allerdings, dass Wireless Insite aufgrund des enormen Rechenaufwandes keine flächendeckende Immissionsverteilung im gesamten Versorgungsgebiet liefern kann und Quickplan ausschließlich für Outdoor-Szenarien geeignet ist.

Zur *messtechnischen* Bestimmung der Exposition durch hochfrequente Felder von UMTS-Sendeanlagen existieren mit breitbandigen, frequenzselektiven (spektralen) und codeselektiven Verfahren drei Methoden, die völlig unterschiedliche Messprinzipien verwenden. In vorliegender Studie werden die drei genannten Messverfahren eingehend untersucht.

Für Messungen, die den Zweck verfolgen, die *Einhaltung der Grenzwerte nach 26. BImSchV* nachzuweisen, werden folgende Schlussfolgerungen gezogen:

- Aufgrund der großen Unsicherheiten bei der Extrapolation auf höchste betriebliche Anlagenauslastung sind breitbandige Verfahren für Messungen im Rahmen der Überprüfung der Einhaltung der Grenzwerte nach 26. BImSchV wenig geeignet.
- Auch eine frequenzselektive Messung bietet noch relativ große Unsicherheiten bei der Extrapolation auf höchste betriebliche Anlagenauslastung, insbesondere der Einfluss der Verkehrslast führt zu einer regelmäßigen Überbewertung der Exposition. Mit breitbandigen und frequenzselektiven Messungen ist aufgrund der vorhandenen Überbewertungen die Einhaltung der Grenzwerte sicher nachweisbar, jedoch nicht deren Überschreitung.
- Die zuverlässigsten Messergebnisse liefert eine codeselektive Erfassung der Exposition. Eine Hochrechnung auf maximale Anlagenauslastung ist auf einfache Weise mit relativ geringem Aufwand möglich. Vorhandener Datenverkehr beeinträchtigt die Extrapolation nicht. Aufgrund dieser Vorteile sollte die codeselektive Messung bevorzugt im Rahmen von Untersuchungen angewendet werden, bei denen die Immissionen bei höchster betrieblicher Anlagenauslastung zuverlässig ohne nennenswerte Überbewertung bestimmt werden sollen.

Für die Maximalwertsuche im Messvolumen hat sich die „Schwenkmethode“ als effizientes Verfahren herausgestellt. Eine Maximalwertsuche mit der Punktrastermethode führt in der

Regel zu einer Unterbewertung, sofern für die Messungen praktikable Punktmengen verwendet werden. Auch die zweistufige Maximalwertsuche (Vormessung plus Präzisionsmessung an dem vorher als maximal klassifizierten Punkt) kann aufgrund des Einflusses der messenden Person zu einer Unterbewertung führen.

Als Messantennen bei der „Schwenkmethode“ können logarithmisch-periodische Antennen, dipolartige Antennen oder auch isotrope Sonden eingesetzt werden, wobei sich logarithmisch-periodische Antennen durch einen äußerst geringen Einfluss des Messenden in Vergleich zu schwächer richtenden Antennen auszeichnen. Bei codeselektiven Messsystemen mit sehr geringer Messrate ist auf eine besonders langsame Abtastung des Messvolumens zu achten. Bei Messgeräten mit „schnellem“ und „langsamem“ Betriebsmodus ist die langsame Messung aufgrund der höheren Genauigkeit zu bevorzugen.

Die Reproduzierbarkeit des codeselektiven Messverfahrens in Verbindung mit der Schwenkmethode konnte in umfangreichen Messreihen als gut klassifiziert werden. Die Vertrauensgrenze als Maß für die Wiederholpräzision wird zu $\pm 1,8$ dB abgeschätzt.

Die absoluten Nachweisgrenzen bei der codeselektiven Messung liegen im Bereich der Mindestversorgungsfeldstärken. Bei Anwesenheit mehrerer UMTS-Signale verringert sich jedoch die relative Dynamik der Systeme auf typisch 20 dB, d.h. Signale mit der gleichen Trägerfrequenz, die mehr als etwa 20 dB unter dem stärksten Signal liegen, werden dann häufig nicht mehr zuverlässig erfasst.

Für Messungen, bei denen die *Ermittlung von örtlichen und zeitlichen Mittelwerten bzw. zeitlichen Verläufen* im Fokus steht, sollten frequenzselektive Messverfahren in Verbindung mit isotropen Antennen eingesetzt werden. Hierbei ist die Gefahr von Fehlbewertungen der Immission durch falsche Messgeräteeinstellungen allerdings sehr hoch: Bei den Messungen ist ein RMS-Detektor unabdingbar. Abhängig von der Abtastrate des Spektrumanalysators ist auf eine ausreichend große Sweeptime zu achten. Die Auflösebandbreite sollte mindestens ebenso groß wie die Signalbandbreite von UMTS sein. Hier existieren allerdings vor allem für ältere Analysatoren mit einer Kanalleistungsmessung bzw. einer Bandbreitenkorrektur Alternativen, die aber in der Praxis vor allem bei fehlender Sichtverbindung zur Anlage einen Trend zu höheren Abweichungen der Messergebnisse von den Referenzmessungen aufweisen.

In verschiedenen Szenarien durchgeführte Mittelungsmessungen zeigen leistungsbezogene Unterschiedsfaktoren zwischen „realen“ raum- und zeitgemittelten Werten und dem auf maximale Anlagenauslastung hochgerechneten Wert zwischen etwa 25 und 60. Da derzeit jedoch die Verkehrsauslastung der untersuchten Stationen sehr gering ist, wird im zukünftigen Regelbetrieb der UMTS-Anlagen mit etwas geringeren Unterschieden zu rechnen sein. Die größten Differenzen zwischen örtlichen Maximal- und Minimalwerten ergaben sich erwartungsgemäß bei Indoor-Szenarien.

Mit Langzeitmessungen an einem festen Ort kann sowohl die Leistungsregelung der Basisstation, als auch zeitliche Änderungen im Ausbreitungsweg (z.B. durch Bewegung des anwesenden Messpersonals) untersucht werden.

Messungen mit Breitbandmessgeräten beschränken sich auf Einsätze in unmittelbarer Antennennähe im Rahmen der Überprüfung von Sicherheitsabständen oder bei der Überprüfung zulässiger Werte für den Arbeitsschutz. In Abständen von mehreren 10 Metern können sie darüber hinaus eingesetzt werden, um einen Raumbereich vorzuselektieren, in dem mit spektraler oder codeselektiver Messung eine detaillierte Überprüfung der Immissionssituation erfolgt. Durch Messungen konnte nachgewiesen werden, dass die hohe Bandbreite sowie der große Crestfaktor von UMTS von einem sehr verbreitet eingesetzten Breitbandmessgerät in einem für Vorortmessungen üblichen Amplitudenbereich (1 bis 15 V/m) richtig erfasst wurde und nicht zu Fehlbewertungen führte.

In einem Ausblick wurde eine Anwendbarkeit primär des codeselektiven Messverfahrens bei zukünftigen Entwicklungen von UMTS-Sendeanlagen untersucht: Für den später geplanten TDD-Mode von UMTS sind codeselektive Messverfahren derzeit nicht bekannt. Die sinnvollste Messmethode bietet vermutlich eine spektrale Messung der Spitzenleistung des stärksten Zeitschlitzes („zero span“) und eine nachfolgende Extrapolation auf den ungünstigen Lastfall. Hinsichtlich des Einsatzes von intelligenten Antennensystemen ist eine generelle Übertragbarkeit des codeselektiven Messverfahrens gegeben, da der (nicht adaptive) P-CPICH permanent in der Zelle verbleibt und u.U. sogar von derselben Antenne abgestrahlt wird wie die Verkehrskanäle. Auch eine aktive Regelung des P-CPICH kann prinzipiell bei der Messung korrekt berücksichtigt werden, da im Übertragungsprotokoll zwischen Basisstation und Endgerät die Information über die momentan gewählte CPICH-Leistungsstufe mit enthalten ist.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	2
II.1 Einleitung	8
II.2 Berechnungsverfahren zur Expositionsbestimmung bei UMTS-Sendeanlagen	9
II.2.1 Grundsätzliches	9
II.2.2 Eingabeparameter	13
II.2.2.1 Anlagenbezogene Parameter	13
II.2.2.2 Geländedaten	25
II.2.2.3 Gebäudedaten	27
II.3 Simulationen	29
II.3.1 Vorbetrachtungen	29
II.3.1.1 Integration von Gebäudeinformationen	30
II.3.1.2 Einfluss des Geländes auf die Immissionsverteilung	35
II.3.1.3 Multifrequenzielle Anregung	39
II.3.2 Konfiguration 1: Pikozone	45
II.3.3 Konfiguration 2: Basisstation auf einem Haus	50
II.3.4 Konfiguration 3: Stadtgebiet	54
II.3.5 Fazit	59
II.4 Messverfahren zur Expositionsbestimmung bei UMTS-Sendeanlagen	61
II.4.1 Grundsätzliches	61
II.4.2 Wesentliche Fragestellungen	64
II.4.2.1 Breitbandmessung	64
II.4.2.2 Frequenzselektive Messung	65
II.4.2.3 Codeselektive Messung	70
II.4.3 Auswertung vorhandener Messempfehlungen	71
II.4.4 Erfassungsmethoden	77
II.4.4.1 Örtliche Feldstärkevariationen	77
II.4.4.2 Zeitliche Feldstärkevariationen	88
II.4.5 Geräteeinstellungen	89
II.4.5.1 Breitbandmessung	89

II.4.5.2	<i>Frequenzselektive Messung</i>	92
II.4.5.2.1	Messzeit.....	92
II.4.5.2.2	Detektortyp	93
II.4.5.2.3	Sweep-time	94
II.4.5.2.4	Auflösebandbreite (RBW).....	95
II.4.5.2.5	Kanalleistungsmessung.....	99
II.4.5.3	<i>Codeselektive Messung</i>	103
II.4.6	Antennen	114
II.4.7	Nachweisgrenzen	120
II.4.7.1	<i>Breitbandmessung</i>	120
II.4.7.2	<i>Frequenzselektive Messung</i>	120
II.4.7.3	<i>Codeselektive Messung</i>	126
II.4.8	Reproduzierbarkeit	126
II.4.9	Messunsicherheit	132
II.4.9.1	<i>Frequenzselektive Messung</i>	132
II.4.9.2	<i>Codeselektive Messung</i>	134
II.4.10	Dokumentation	136
II.4.11	Qualitätssicherung	138
II.4.12	Messverfahren zur Überprüfung der Grenzwerte	140
II.4.13	Messverfahren zur Ermittlung von Durchschnittswerten	146
II.4.13.1	<i>Generelle zeitliche und örtliche Erfassungsmethoden</i>	146
4.13.2	<i>Anwendung der Erfassungsmethoden auf reale Szenarien</i>	152
II.4.14	Zukünftige Entwicklungen	161
II.4.14.1	<i>Einsatz der TDD-Version von UMTS</i>	161
II.4.14.2	<i>Intelligente Antennensysteme</i>	162
II.4.14.3	<i>Aktive Regelung des CPICH</i>	164
	Literaturverzeichnis	166
	Abkürzungsverzeichnis	169
	Verzeichnis häufig verwendeter Symbole	171
	Anhang: Vorgaben für eine Messnorm	A1-A5

II.1 Einleitung

Im zweiten Berichtsteil vorliegenden Untersuchungsvorhabens werden sowohl Mess-, als auch Berechnungsverfahren entwickelt bzw. bestehende Verfahren modifiziert, die im dritten Teil zur Erhebung der real vorhandenen Immissionen elektromagnetischer Felder im Umfeld von UMTS-Sendeanlagen eingesetzt werden.

Bezüglich *Berechnungsverfahren* werden die Untersuchungen auf kommerziell verfügbare Softwarepakete konzentriert. Anhand von praxisrelevanten Konfigurationen werden die einzelnen Softwarepakete auf ihre Eignung hin untersucht. Das Einsatzgebiet soll nicht nur das direkte Umfeld einer UMTS-Station, sondern deren gesamtes Versorgungsgebiet abdecken. Dies erfordert Überlegungen hinsichtlich der Einbeziehung von Gelände- und Gebäudedaten. Es wird überprüft, in wieweit die Berechnungen entsprechend der Bandbreite eines realen UMTS-Signals von etwa 5 MHz mit einer breitbandigen Anregung vorgenommen werden müssen, oder ob eine in der konventionellen Funknetzplanung verwendete schmalbandige Anregung hinreichend ist. Zusätzlich wird mit einem Freiraumausbreitungsmodell untersucht, mit welchen Veränderungen der Immission in der Umgebung von UMTS-Stationen im Vergleich zu GSM-Stationen theoretisch zu rechnen ist.

Bezüglich *Messverfahren* werden, beginnend mit einer Definition der Anforderungen an entsprechende Verfahren und der Auswertung vorhandener Messempfehlungen, geeignete und praxistaugliche Verfahren untersucht und bezüglich ihrer Eignung und Begrenzung diskutiert. Hierbei wird ein Schwerpunkt auf die für die Grenzwertbetrachtung relevante Ermittlung von örtlichen und zeitlichen Maximalwerten gelegt; darüber hinaus werden jedoch auch Verfahren zur Ermittlung von örtlichen und zeitlichen Mittelwerten bzw. Momentanwerten diskutiert. Die Untersuchungen konzentrieren sich auf die derzeit eingesetzte FDD-Variante von UMTS sowie auf derzeit verwendete Antennenlösungen und Netz-Regelungsmechanismen. In einem Ausblick wird jedoch auch die Übertragbarkeit hinsichtlich neuer Entwicklungen diskutiert.

II.2 Berechnungsverfahren zur Expositionsbestimmung bei UMTS-Sendeanlagen

II.2.1 Grundsätzliches

Das vorliegende Kapitel befasst sich mit der Untersuchung von Berechnungsverfahren zur Expositionsbestimmung bei UMTS-Sendeanlagen. In einem dieser Studie vorangegangenen Projekt des Deutschen Mobilfunk-Forschungsprogramms mit dem Titel „*Entwicklung von Mess- und Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Exposition der Bevölkerung in der Umgebung von Mobilfunk-Basisstationen*“ [BOR 05] konnten wichtige grundsätzliche Erkenntnisse über geeignete Berechnungsverfahren für GSM-Mobilfunkanlagen gewonnen werden. Allerdings beschränkten sich die vorgenannten Untersuchungen auf einen Umkreis mit einem maximalen Radius von 200 m um die Anlage.

So hat sich in [BOR 05] beispielsweise gezeigt, dass feldtheoretische Verfahren und auch hybride Verfahren (feldtheoretisch + geometrische Optik) in Bezug auf Anwendung, Speicherbedarf, Rechenleistung und Berechnungsraum bereits für Immissionsberechnungen in der unmittelbaren Umgebung der Sendeanlage zu aufwändig sind. Sie erfordern z.B. durch die detailliert zu modellierende Mobilfunkantenne großes Know How und sind insofern nur für Benutzer mit einschlägiger Erfahrung (z.B. Antennentechniker) geeignet. Daher werden in vorliegender Studie primär strahlenoptische bzw. auf Freiraumausbreitung basierende Programme mit Berücksichtigung von Gebäudedämpfung und Reflexion betrachtet.

In [BOR 05] hat sich darüber hinaus gezeigt, dass diese beiden Verfahren einen guten Prognosewert der Feldstärke, verglichen mit entsprechenden Messergebnissen, liefern. Hierbei ist aber zu beachten, dass gerade in Konfigurationen, in denen keine direkte Sicht zur Basisstation vorlag (NLOS), auch Unterschätzungen der gemessenen Immissionen möglich sind. Deswegen wurde empfohlen, im Sinne eines Worst-Case Verfahrens die Methode „reine Freiraumausbreitung mit einem Zuschlag von 3 dB“ zu wählen, sofern eine sichere Aussage hinsichtlich der Frage der Einhaltung der Grenzwerte gefordert ist.

Im Unterschied zu [BOR 05] liegt der Schwerpunkt der Berechnung in der hier vorliegenden Studie nicht nur auf der direkten Umgebung bis 200 m Entfernung von der Sendeanlage, sondern auf der gesamten zu versorgenden Mobilfunkzelle (siehe Tabelle II.2.1). In wie weit dies Konsequenzen auf die in [BOR 05] getroffenen Aussagen hat, wird in vorliegender Studie näher untersucht.

Für UMTS gibt es je nach Anwendung verschiedene Zelltypen, die als Makro-, Mikro- und Piko-Zelle bezeichnet werden (siehe Tabelle II.2.1).

Typ der Funkzelle	typischer Zellradius	Erläuterungen (Umgebung, Antennen etc.)
Makro-Zelle	2 km bis 8 km	außerhalb von Gebäuden (ländlich oder städtisch), BS-Antenne oberhalb aller Hindernisse
Mikro-Zelle	Bis zu ca. 2 km	außerhalb von Gebäuden (städtisch), BS-Antenne unterhalb des mittleren Gebäudeniveaus
Piko-Zelle	Bis zu ca. 500 m	innerhalb oder außerhalb von Gebäuden; BS-Antenne unterhalb des mittleren Gebäudeniveaus

Tabelle II.2.1: Begriffsbestimmung zu Makro-, Mikro- und Piko-Zelle bei UMTS

Aus obiger Tabelle wird ersichtlich, dass im Gegensatz zu [BOR 05] in dieser Studie durch die erforderliche Erfassung der gesamten Funkzelle ein bedeutend größeres Areal nachgebildet werden muss, was in einer entsprechend aufwändigeren Modellierung resultieren wird. So müssen z.B. alle Gebäude in der betrachteten Zelle nachgebildet werden. Darüber hinaus muss überprüft werden, in wie weit auch das Gelände in einer Berechnung berücksichtigt werden muss.

Im Vorgängerprojekt wurden kommerzielle Softwarepakete auf ihre Eignung für GSM-Basisstationen untersucht. Daher muss in der hier vorliegenden Aufgabenstellung überprüft werden, in wie weit durch das gegenüber dem GSM-Signal veränderte UMTS-Signal Änderungen am Berechnungsalgorithmus vorgenommen werden müssen. Dies betrifft insbesondere die im Vergleich zu GSM wesentlich höhere Signalbandbreite von etwa 4-5 MHz, die entsprechende Untersuchungen an der Feldanregung im Simulationsmodell erfordert.

Für die in dieser Studie betrachtete Aufgabenstellung wurden die in folgender Tabelle dargestellten Softwarepakete untersucht. Sie sind kommerziell verfügbar und beinhalten oftmals mehrere 10 Mannjahre Entwicklungsaufwand. Ferner sind sie von vielen Anwendern evaluiert und die Bedienung ist gut dokumentiert.

Programm	Verfahren	Hersteller	Internet	Version
EFC-400	strahlenoptisch (auf Basis der DIN VDE 0848)	FGEU	www.fgeu.de	Version 2005 (Build 2542)
Quickplan	strahlenoptisch	TeS	www.t-e-s.it	Version 2.2.5
WinProp	strahlenoptisch	AWE-Com.	www.awe-communications.com	Version 5.8.1
Wireless Insite	strahlenoptisch	Remcom	www.remcom.com	Version 2.1.0
Fieldview	Freiraumausbreitung	EM-Institut	www.em-institut.de	Version 3.3

Tabelle II.2.2: Verwendete kommerziell verfügbare Softwarepakete

Das Programm *EFC-400* wurde von der Forschungsgesellschaft für Energie und Umwelt-technologie mbH entwickelt. Wie schon in der Softwareversion, die in [BOR 05] verwendet wurde, beruht das Berechnungsverfahren auf der reinen Freiraumausbreitung. Der Gebäudeeinfluss kann über die Angabe eines globalen bzw. individuellen Dämpfungsfaktors berücksichtigt werden. Neben der Reflexion am Erdboden wurden in stetiger Weiterentwicklung nun auch Reflexionen an Gebäuden bzw. Wänden in das Programm integriert. In der in dieser Studie verwendeten Version kann hierzu ein Multireflexionslevel vom Benutzer gewählt werden, der die Anzahl der zu berechnenden Reflexionen bestimmt. In diesem Zusammenhang ist aber zu beachten, dass keine Informationen bezüglich der Phase in die Berechnung eingehen. Darüber hinaus wurden neue Importfilter für Gebäude, Algorithmen zur Erkennung der Überlappungen von Gebäudewänden und vieles mehr integriert.

Die folgenden Voraussetzungen sind vom Hersteller angegeben, um einen optimalen Ablauf des Programms zu gewährleisten:

- Prozessor: 2 GHz
- Freier Arbeitsspeicher: 128 MB
- Grafikkarte: Open GL Beschleunigung
- Freier Festplattenplatz: 20 GB
- Betriebssystem: Microsoft Windows
- Kosten für eine Einzellizenz: 13.590,- €

QuickPlan ist eine Planungssoftware für terrestrische zellulare Netzwerke und wurde von TeS Teleinformatica e Sistemi s.r.l entwickelt. Die in dieser Studie verwendete Version 2.2.5 basiert auf dem strahlenoptischen Modell.

Alle für die Berechnung relevanten Informationen (Antennentypen, Gebäude, Koordinaten, Materialien usw.) werden in einer Oracle Datenbank abgelegt, die im Programm integriert ist. Durch diese Struktur bedingt hat der Anwender bei jedem Start der Software Zugriff auf alle Daten, die er bereits in die Datenbank eingegeben hat. Folgende Voraussetzungen sind vom Hersteller angegeben:

- Prozessor: Pentium II 233 MHz
- Arbeitsspeicher: 384 MB
- Grafikkarte: Auflösung mit mindestens 16 Mio. Farben
- Freier Festplattenplatz: 150 MB
- Betriebssystem: Microsoft Windows
- Kosten für eine Einzellizenz: 12.500,- € (ab Version 2)

Die Software *Wireless Insite* wurde von der Firma Remcom entwickelt und basiert auch auf dem strahlenoptischen Wellenausbreitungsmodell. Es ist möglich, eine dreidimensionale Simulationsumgebung zu modellieren. Als Voraussetzungen sind vom Hersteller folgende Parameter angegeben:

- Prozessor: Pentium III 800 MHz (oder vergleichbarer AMD)
- Freier Arbeitsspeicher: Minimum 512 MB
- Grafikkarte: OpenGL Beschleunigung
- Freier Festplattenplatz: Minimum 500 MB
- Betriebssystem: Windows 2000 oder XP
- Kosten für eine Einzellizenz: 12.000,- US \$

Die Software *WinProp* wurde von der Firma AWE-Communications entwickelt. Sie ist modular aufgebaut, so dass der Benutzer das Programm seiner Aufgabenstellung nach entsprechend zusammen setzen kann. Darüber hinaus existieren je nach eingesetztem Modul verschiedene auf das jeweilige Problem optimierte Ausbreitungsmodelle. In dieser Studie wird zunächst das Modul „WallMan“ verwendet. Hiermit kann die Simulationsumgebung (z.B. Stadtgebiet, Indoor-Szenario) modelliert und für den anschließenden Einsatz im Wellenausbreitungsmodul „ProMan“ vorbereitet werden. Als Voraussetzungen sind vom Hersteller folgende Parameter angegeben:

- Prozessor: Intel CPU oder vergleichbar mit min. 1000 MHz
- Freier Arbeitsspeicher: Minimum 256 MB
- Grafikkarte: min. 1024 x 768 Pixel und 65536 Farben
- Freier Festplattenplatz: Minimum 2 GByte
- Betriebssystem: Windows (95/98/ME/NT 4.0/2000/XP)
- Kosten für eine Einzellizenz: stark abhängig von der Anzahl der eingesetzten Module; für die hier zu lösende Aufgabe ca. 6.500,- € für eine Jahreslizenz

Die Software *Fieldview* wurde von der EM-Institut GmbH entwickelt und beruht auf der Berechnung mit reiner Freiraumausbreitung. Es können Antennendiagramme eingelesen und anschließend die Immissionsverteilung in horizontaler oder vertikaler Ebene berechnet werden. Darüber hinaus ist es auch möglich, einen frei wählbaren additiven Zuschlag zur Sendeleistung anzugeben. Als Voraussetzungen sind vom Hersteller folgende Parameter angegeben:

- Betriebssystem: Windows (95/98/ME/NT 4.0/2000/XP)
- Kosten für eine Einzellizenz: 1.300,- €

Da die Vorhersagegenauigkeit der Immissionsverteilung bei obigen Verfahren in erster Linie durch die Qualität der Eingabedaten bestimmt wird (vgl. [BOR 02]), werden in den folgenden Abschnitten die für eine Simulation benötigten Eingabedaten näher auf die hier betrachtete Aufgabenstellung hin untersucht.

II.2.2 Eingabeparameter

Die erforderlichen Eingabeparameter für die oben vorgestellten Softwarepakete lassen sich grob in die drei Bereiche anlagenbezogene Parameter, Geodaten und Gebäudedaten aufteilen und werden in den folgenden Abschnitten eingehender untersucht.

II.2.2.1 Anlagenbezogene Parameter

Die für die Simulation notwendigen Parameter der Mobilfunksendeanlage sind begrenzt der Standortbescheinigung (StOB) zu entnehmen (vgl. [BOR 05]). Hierzu zählen z.B. die Montagehöhe der Unterkante der Sendeantenne über Grund oder die Hauptstrahlrichtung im Azimut. Es werden aber noch weitere Parameter für eine Simulation benötigt, die nicht der StOB entnommen werden können. In diesem Fall ist die Mithilfe der Betreiber unumgänglich. Dies betrifft technische Angaben über Antennenart, die Sendeleistung am Antenneneingang, Anzahl der Kanäle usw.

Da die Abstrahlcharakteristik der Mobilfunkantennen maßgeblich für die Verteilung der Immission im Umfeld der Basisstation verantwortlich ist, wird diese im folgenden näher betrachtet. In [BOR 05] hat sich durch Herstellerdaten und eigene Messungen gezeigt, dass das Antennendiagramm der Mobilfunkantennen sowohl vom jeweils eingestellten elektrischen Downtilt als auch der Frequenz abhängt. Dies wird in den Bildern II.2.1 und II.2.2 nochmals für eine typische UMTS-Sendeantenne (K742212) verdeutlicht. In Bild II.2.1 ist zu beachten, dass die Antennendiagramme um den Winkel des elektrischen Downtilts in der Art gedreht wurden, dass die Hauptstrahlrichtungen übereinander liegen und somit eine bessere Vergleichbarkeit gewährleistet ist.

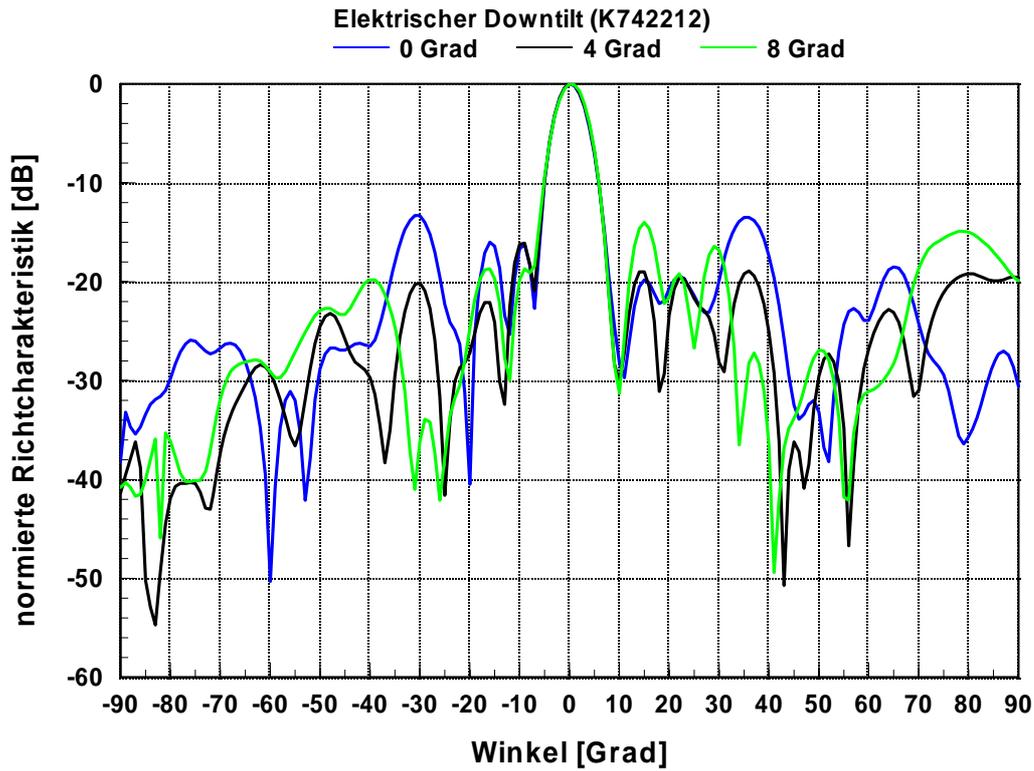


Bild II.2.1: Abhängigkeit der Richtcharakteristik einer Mobilfunksendeantenne vom eingestellten elektrischen Downtilt; Herstellerangaben

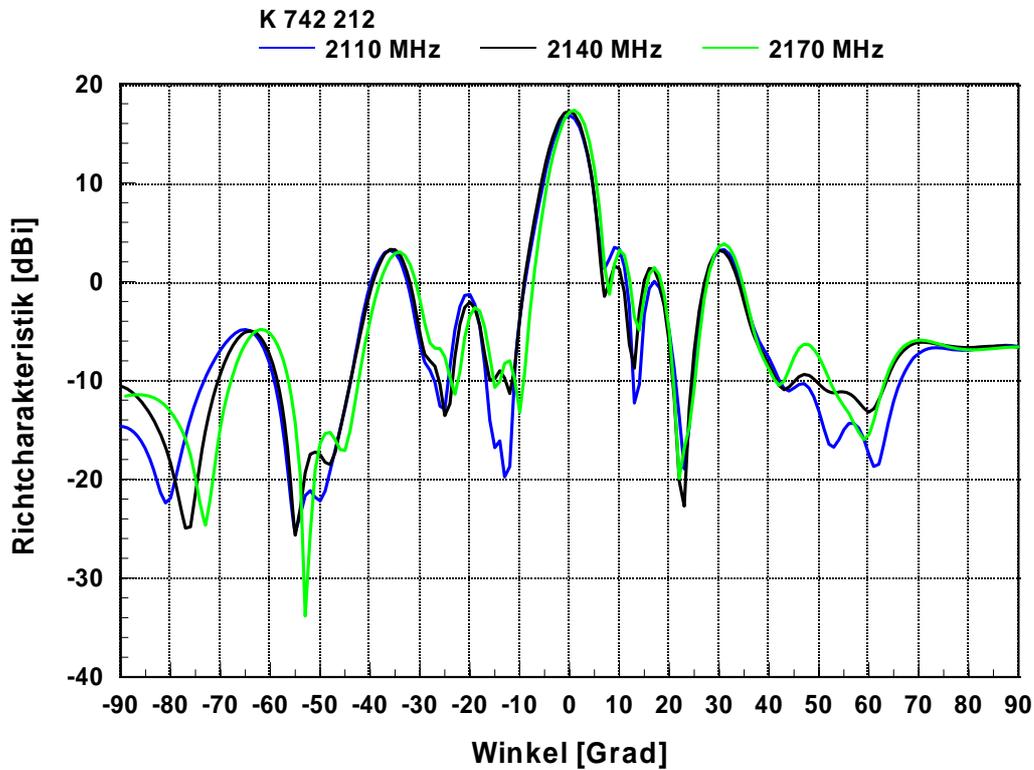


Bild II.2.2: Abhängigkeit der Richtcharakteristik von der Frequenz; Messungen der IMST GmbH

Bei der Frequenzabhängigkeit der Richtcharakteristik der Mobilfunkantenne ist im Gegensatz zu GSM zu beachten, dass die Netzstruktur bei UMTS auf einem Gleichwellennetz basiert. Jeder Betreiber hat hierzu jeweils zwei *feste Frequenzbänder* ersteigert – *Frequenzplanwechsel* wie bei GSM existieren bei UMTS folglich nicht. Diese Abhängigkeit weist demnach bei UMTS einen geringeren Stellenwert auf als es bei GSM der Fall ist.

Wie detailliert in [BOR 05] beschrieben wird ein synthetisiertes Antennendiagramm erzeugt: Das Diagramm wird dabei auf den maximalen Wert im Nebenzipfelbereich aufgefüllt, getrennt nach Vorder- und Hinterbereich. Damit ist auch der Einfluss der Montageumgebung berücksichtigt.

Der Frequenzbereich von UMTS umfasst im Downlink über alle Betreiber gesehen 60 MHz (2110 – 2170 MHz). Eine Synthese des Antennendiagramms wie in [BOR 05] vorgeschlagen bedeutet vor diesem Hintergrund für die Frequenzabhängigkeit, dass die einmal synthetisierte Abstrahlcharakteristik für alle Betreiber gleichermaßen eingesetzt werden kann. Darüber hinaus wird mit nur *einer* numerischen Simulation bezüglich des Downtiltwinkels nicht eine sehr spezifische Momentaufnahme erhalten, sondern eine allgemein gültigere Prognose der Immission.

Da die Ergebnisse bezüglich der Ableitung eines synthetisierten Abstrahldiagramms aus [BOR 05] auf die hier vorliegende Aufgabenstellung direkt übertragbar sind, wird der Schwerpunkt im folgenden auf die generellen Unterschiede der Abstrahlcharakteristik zwischen GSM und UMTS Mobilfunkantennen gelegt.

In Bild II.2.3 ist jeweils ein Antennendiagramm verschiedener Mobilfunksendeantennen aufgeteilt nach dem GSM 900-, GSM 1800- und UMTS-System gegenübergestellt. Hierbei handelt es sich um typisch verwendete Basisstationsantennen.

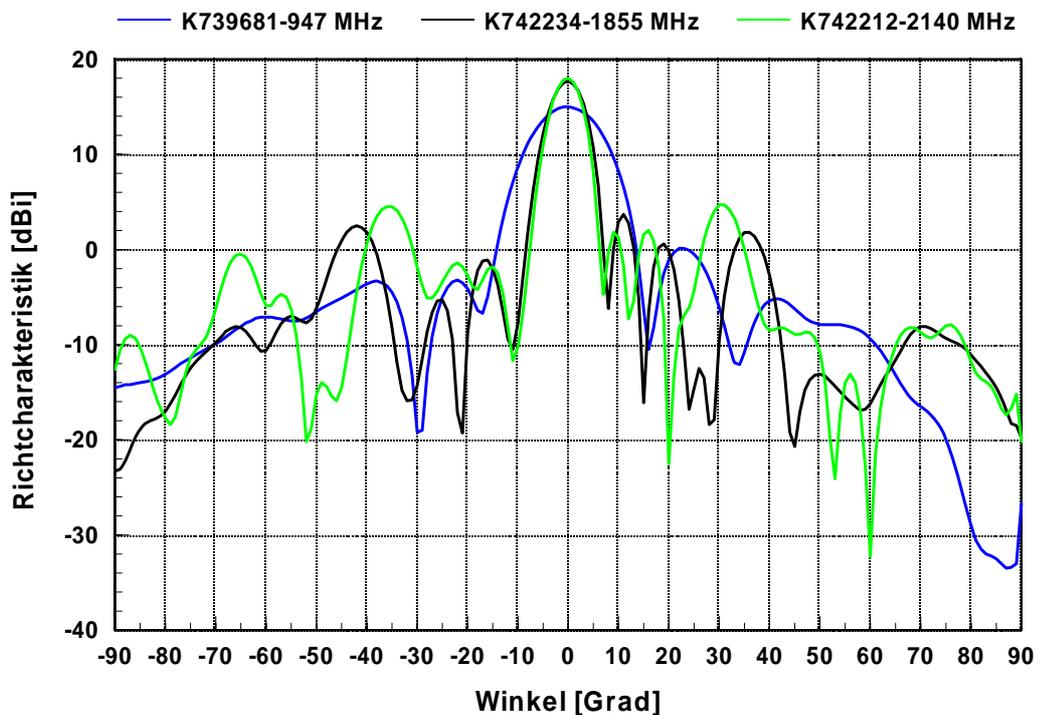


Bild II.2.3: Abstrahlcharakteristik verschiedener typischer Antennen für die GSM-Systeme und UMTS im Vergleich

Aus Bild II.2.3 lassen sich folgende zwei markante Unterschiede vor allem zwischen GSM 900 und UMTS feststellen:

- Der Antennengewinn von UMTS-Antennen für den gleichen Anwendungsfall (hier z.B. Innerstädtische Versorgung) ist größer als bei GSM 900.
- Die Mobilfunkantennen bei UMTS weisen für den gleichen Anwendungsfall (hier z.B. Innerstädtische Versorgung) eine deutlich schmalere Hauptkeule auf als bei GSM 900.

Um die Auswirkungen dieser Unterschiede in der Abstrahlcharakteristik auf die Immissionssituation zu studieren, werden im folgenden vereinfachte Simulationen durchgeführt. Hierzu wurde das Programm „Fieldview“ vom EM-Institut verwendet, das auf reiner Freiraumausbreitung beruht. Für die Berechnungen wurden folgende Parameter verwendet.

- Sendeleistung: 10 W (GSM und UMTS)
- Montagehöhe: 20 m (GSM und UMTS)
- Downtilt: 2° (GSM und UMTS)

Um die verschiedenen Immissionssituationen besser miteinander vergleichen zu können, werden im Simulationsraum mehrere Vergleichspunkte verteilt und die berechnete elektrische Feldstärke an diesen Punkten verglichen. Grundlage für die Koordinaten dieser Vergleichspunkte ist das in folgendem Bild dargestellte Koordinatensystem. Hierin ist beispielhaft eine dreidimensionale Abstrahlcharakteristik einer Mobilfunkantenne mit den entsprechenden Koordinaten zu sehen.

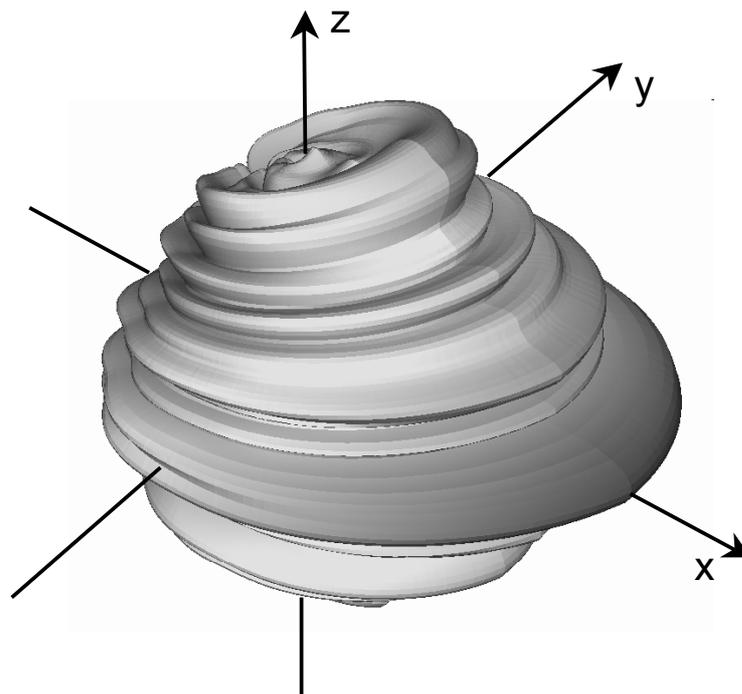


Bild II.2.4: Koordinatensystem für die hier betrachteten Beispiele

Die berechneten Werte der elektrischen Feldstärke werden an folgenden Punkten miteinander verglichen. Der Basisstationsstandort hat hier die Koordinaten (0,0,20).

Vergleichspunkt	x-Koordinate [m]	y-Koordinate [m]	z-Koordinate [m]
a	50	0	18
b	50	0	10
c	100	0	15
d	100	0	5

Tabelle II.2.3: Koordinaten der Vergleichspunkte

In den zwei folgenden Bildern ist zum einen die flächige Immissionssituation von drei unterschiedlichen Mobilfunkantennen und zum anderen der Vergleich der elektrischen Feldstärke an den ausgewählten Vergleichspunkten dargestellt.

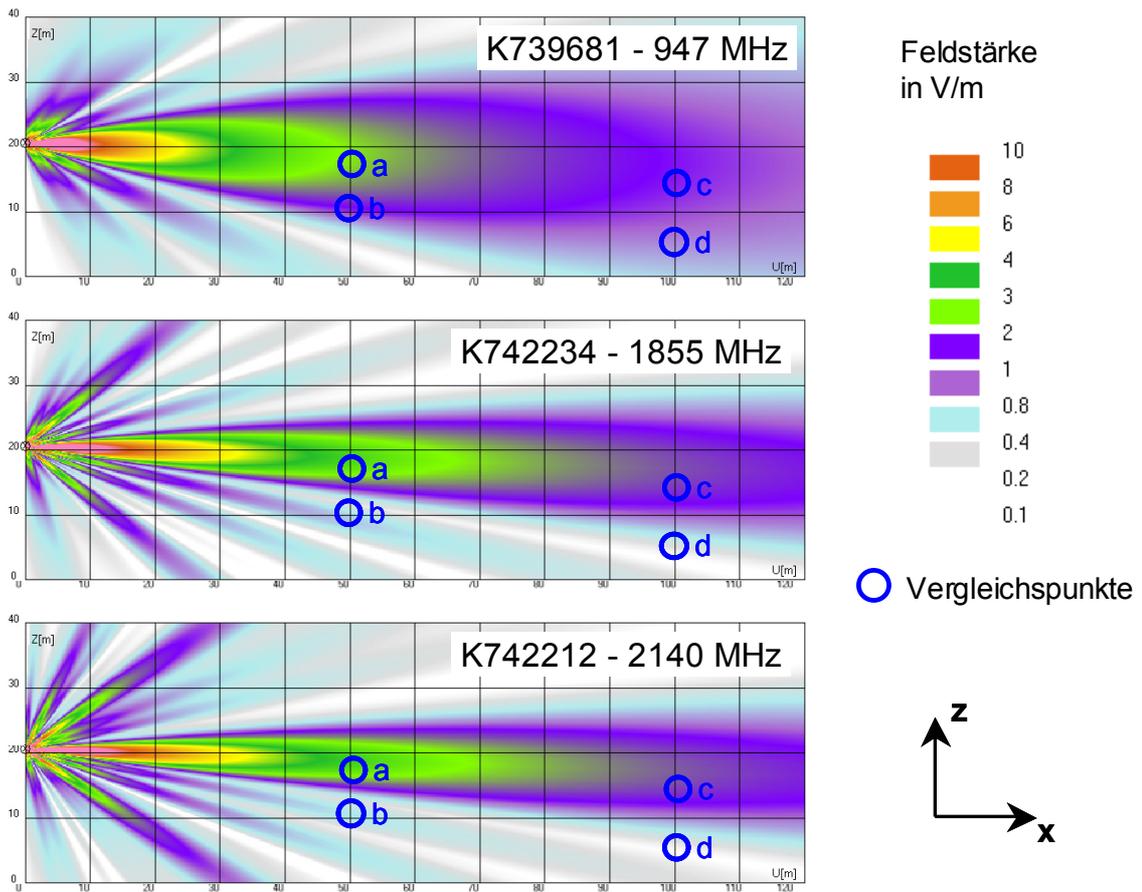


Bild II.2.5: Berechnungen der Immissionssituation von drei unterschiedlichen Mobilfunkantennen mit reiner Freiraumausbreitung, Längsschnitt

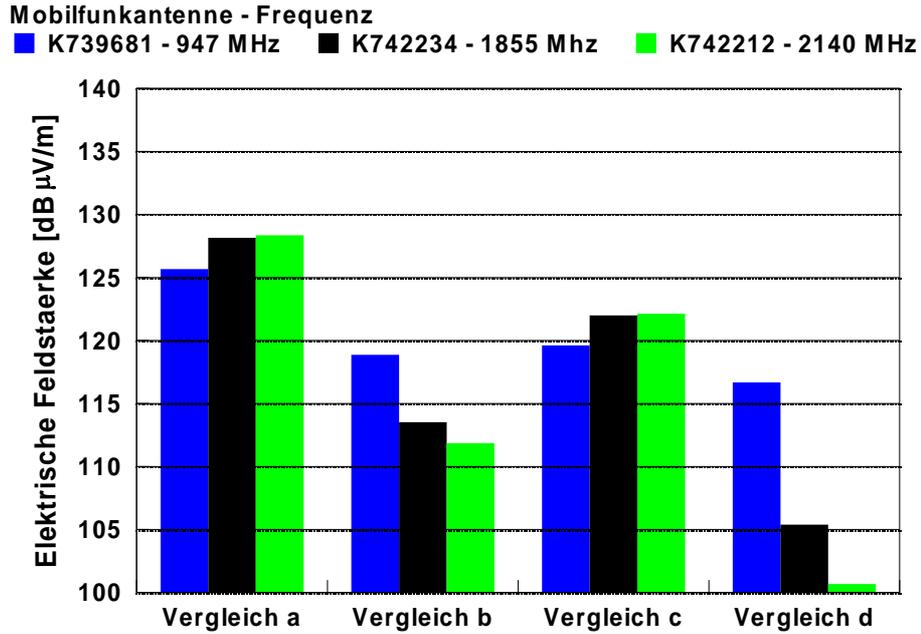


Bild II.2.6: Vergleich der Feldstärkewerte an den vier Vergleichspunkten

Das Bild II.2.5 verdeutlicht nochmals anschaulich, dass die Mobilfunkantenne für GSM 900 einen wesentlich breiteren Strahlkegel aufweist als die Antenne für UMTS. Dies wird durch die Vergleichspunkte b bzw. d in Bild II.2.6 bestätigt, die sich beide innerhalb der Hauptkeule der GSM 900-Antenne, aber außerhalb der Hauptkeule der UMTS-Antenne befinden. Die Vergleichspunkte a und c liegen im Gegensatz dazu jeweils in Hauptstrahlrichtung der Antennen. Die größere absolute elektrische Feldstärke bei UMTS gegenüber der Simulation bei 900 MHz ist hier durch den höheren Gewinn der UMTS-Sendeantenne zu erklären. An dieser Stelle muss aber noch angemerkt werden, dass der durch den differierenden Gewinn hervorgerufene Immissionsunterschied in Hauptstrahlrichtung zwischen UMTS und GSM 900 bei einer grenzwertbezogenen Betrachtung in der Art relativiert werden muss, da sich die Referenzwerte beider Systeme in einer ähnlichen Größenordnung unterscheiden.

Im folgenden wird erneut das obige Beispiel aus einer anderen Perspektive betrachtet. Nun liegt das Hauptaugenmerk auf dem Querschnitt der Abstrahlcharakteristik. Der Beobachter sieht in die Richtung der sendenden Antennen. Die berechneten Werte der elektrischen Feldstärke werden an folgenden Punkten miteinander verglichen.

Vergleichspunkt	x-Koordinate [m]	y-Koordinate [m]	z-Koordinate [m]
1	40	0	18
2	40	0	12
3	40	0	3
4	40	40	18

Tabelle II.2.4: Lage der Vergleichspunkte

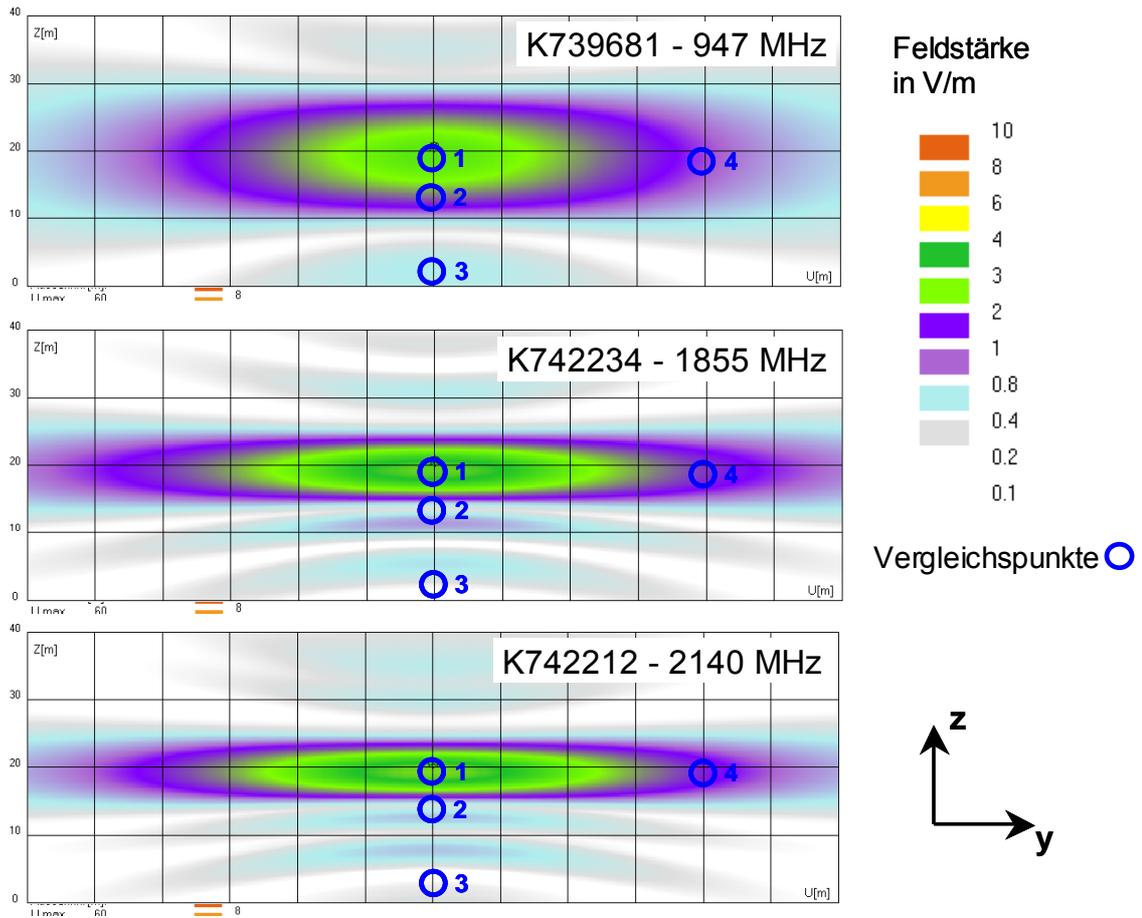


Bild II.2.7: Berechnungen der Immissionssituation von drei unterschiedlichen Mobilfunkantennen mit reiner Freiraumausbreitung, Querschnitt

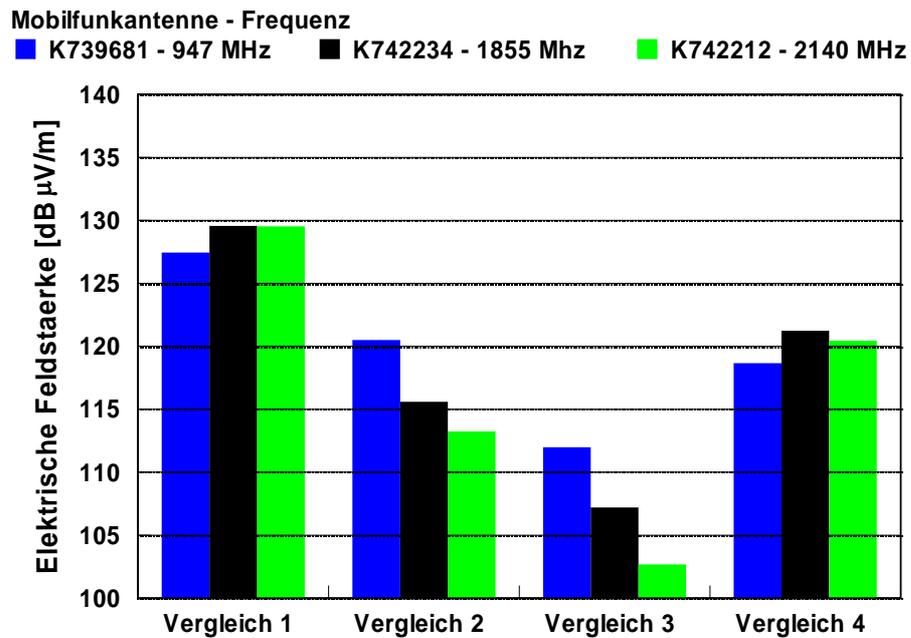


Bild II.2.8: Vergleich der Feldstärke in den 4 Vergleichspunkten

Auch aus dieser Perspektive wird in Bild II.2.7 die schmalere Hauptkeule der UMTS-Sendeantenne deutlich. Die Vergleichspunkte 1 bzw. 4 liegen jeweils in Hauptstrahlrichtung, weisen aber begründet durch den höheren Gewinn der Sendeantenne bei UMTS eine größere absolute elektrische Feldstärke auf. Der Vergleichspunkt 2 liegt in der Hauptstrahlrichtung von GSM, aber außerhalb der schmalere Hauptkeule von UMTS. Der Unterschied im Vergleichspunkt 3 ist in dieser Konfiguration an den differierenden Nebenkeulen begründet.

Im folgenden werden die obigen Betrachtungen in analoger Weise an einer Multibandantenne durchgeführt, die gleichzeitig für GSM 900, GSM 1800 und UMTS eingesetzt werden kann. Auch hier wurde aus den Erfahrungen eigener Messprojekte eine typische Antenne aus dieser Kategorie ausgewählt.

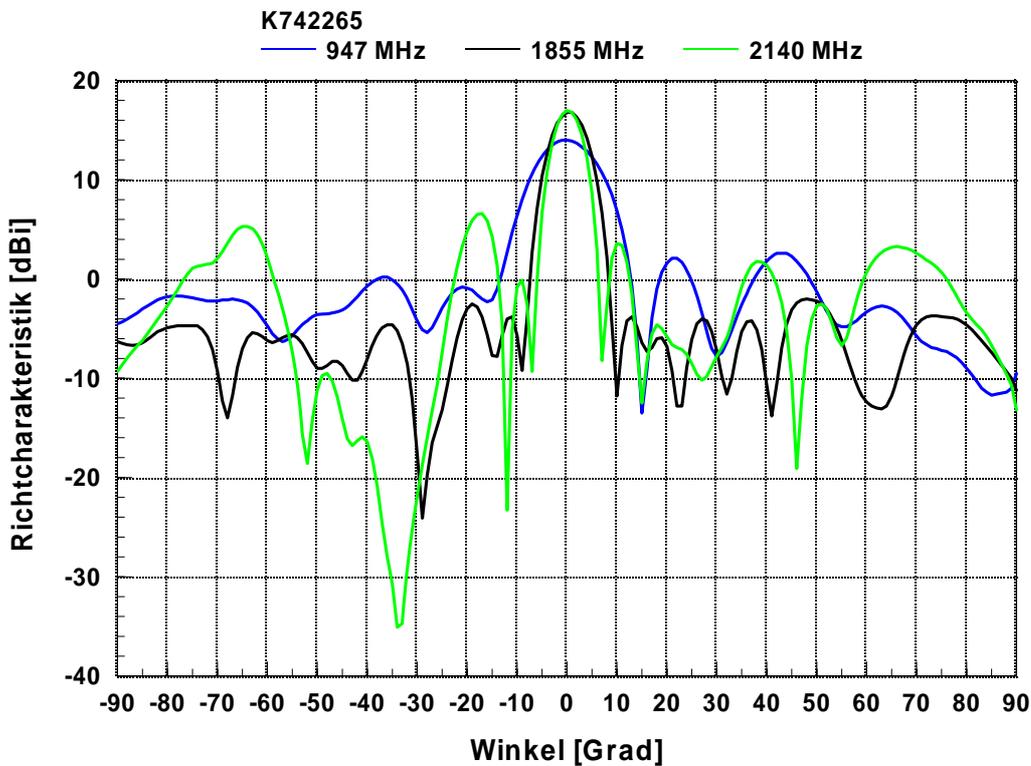


Bild II.2.9: Charakteristik einer Multiband-Antenne für die GSM-Systeme und UMTS im Vergleich

Wie bereits im ersten Beispiel zu sehen, weist auch eine Multiband-Basisstationsantenne für UMTS verglichen mit GSM 900 einen höheren Gewinn und eine schmalere Hauptkeule auf.

Bezogen auf die Immissionssituation lässt sich an dieser Stelle schlussfolgern, dass die Wahrscheinlichkeit, in direkter Nähe einer Basisstation in Hauptstrahlrichtung zu sein, bei einer GSM 900-Anlage höher ist als bei einer UMTS-Anlage. Hinzukommend wird aufgrund des höheren Gewinns die absolute Immission in Hauptstrahlrichtung bei UMTS größer sein als bei GSM 900.

Im folgenden wird exemplarisch die Immissionsverteilung eines Basisstationsstandortes betrachtet, bei dem zu einem bestehenden GSM 900 System ein UMTS-System installiert wird. Bei derartigen Konfigurationen haben die Erfahrungen aus Messprojekten gezeigt, dass

die UMTS-Mobilfunkantennen oftmals unterhalb der GSM-Antennen montiert werden. Darüber hinaus wird angenommen, dass bei Vollausbau des UMTS-Netzes die Basisstationen zur Vermeidung von Interferenzen im Gleichwellennetz einen stärkeren Downtilt aufweisen als dies bei GSM der Fall ist.

Nachfolgend wird nach diesen Überlegungen ein Beispiel für die Unterschiede in Montagehöhe und Downtilt mit den folgenden Parametern betrachtet.

- Sendeleistung: 10 W (sowohl GSM als auch UMTS)
- Montagehöhe: 20 m für GSM, 18 m für UMTS
- Downtilt: 3° für GSM, 6° für UMTS

Die berechneten Werte der elektrischen Feldstärke werden an folgenden Punkten miteinander verglichen. Der Basisstationsstandort hat hier die Koordinaten (0,0,20) für GSM 900 bzw. (0,0,18) für UMTS.

Vergleichspunkt	x-Koordinate [m]	y-Koordinate [m]	z-Koordinate [m]
a	50	0	15
b	70	0	17
c	100	0	2

Tabelle II.2.5: Lage der Vergleichspunkte

Im folgenden Bild ist die flächige Immissionssituation der hier untersuchten Konfiguration zunächst im einzelnen für GSM 900 bzw. UMTS und dann in der Überlagerung beider Systeme zu sehen.

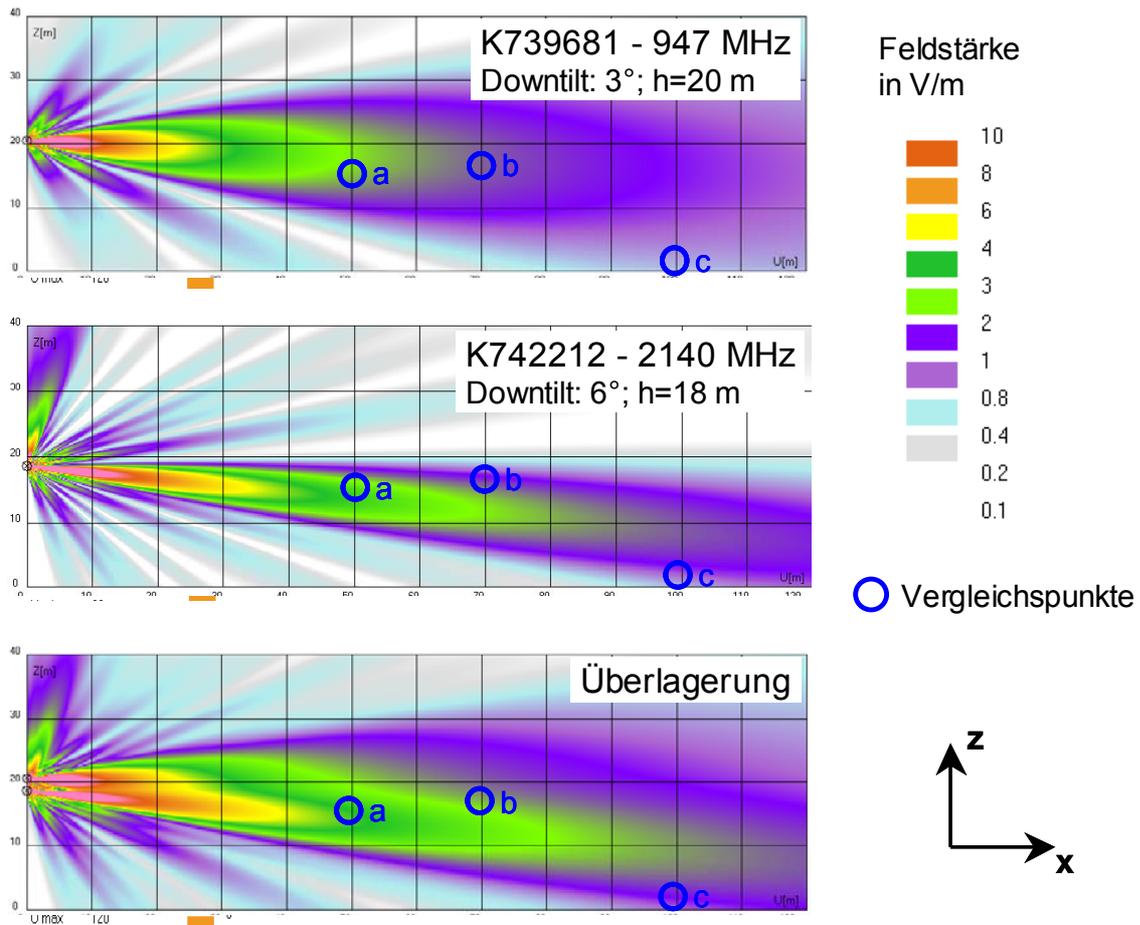


Bild II.2.10: Berechnungen der Immissionssituation von zwei bezüglich Downtilt und Montagehöhe unterschiedlichen Mobilfunkantennen mit reiner Freiraumausbreitung, Längsschnitt

In Bild II.2.10 ist zunächst wieder deutlich die schmalere Hauptkeule der UMTS-Sendeantenne zu erkennen. Darüber hinaus differiert die Immissionssituation auch durch die kleinere Montagehöhe bzw. den höheren elektrischen Downtilt der UMTS Mobilfunkantennen deutlich. Dies zeigen auch die Feldstärkewerte an den eingezeichneten Vergleichspunkten. Diese sind in Bild II.2.11 dargestellt.

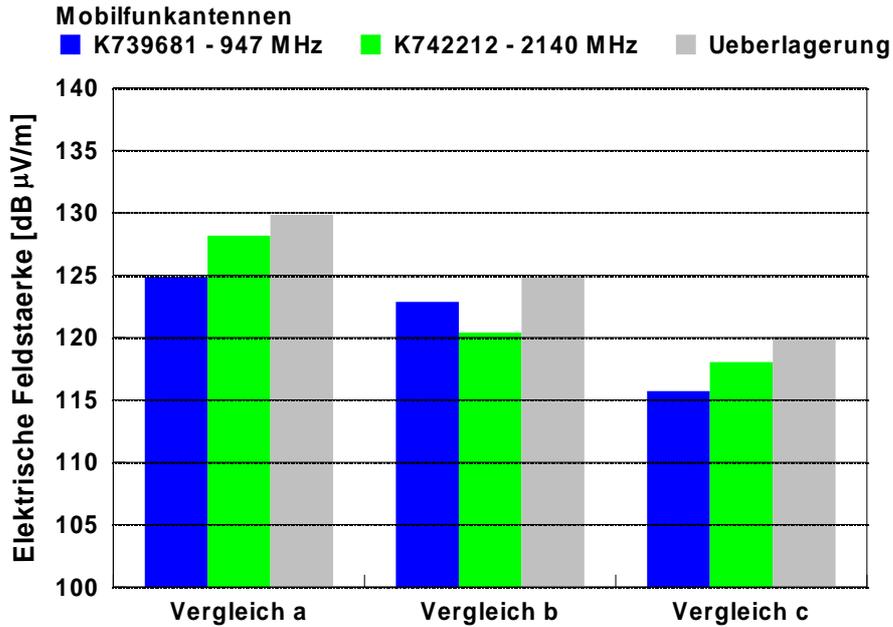


Bild II.2.11: Vergleich der elektrischen Feldstärke

Der Vergleichspunkt a liegt jeweils in der Hauptstrahlrichtung beider hier betrachteten Systeme und weist durch den höheren Gewinn der UMTS-Sendeantenne einen größeren absoluten elektrischen Feldstärkewert auf. Der Vergleichspunkt b befindet sich am oberen Rand der Hauptkeule von UMTS und genau in Hauptstrahlrichtung vom GSM-System. Bei Vergleichspunkt c wird wieder der höhere Gewinn der UMTS-Sendeantenne in der berechneten Feldstärke deutlich.

Im folgenden wird analog zum ersten Beispiel die Immissionssituation in einer Querschnittsebene zur Basisstation betrachtet. Die berechneten Werte der elektrischen Feldstärke werden an folgenden Punkten miteinander verglichen.

Vergleichspunkt	x-Koordinate [m]	y-Koordinate [m]	z-Koordinate [m]
1	60	0	17
2	60	0	13
3	60	0	3
4	60	40	17
5	60	40	13

Tabelle II.2.6: Lage der Vergleichspunkte

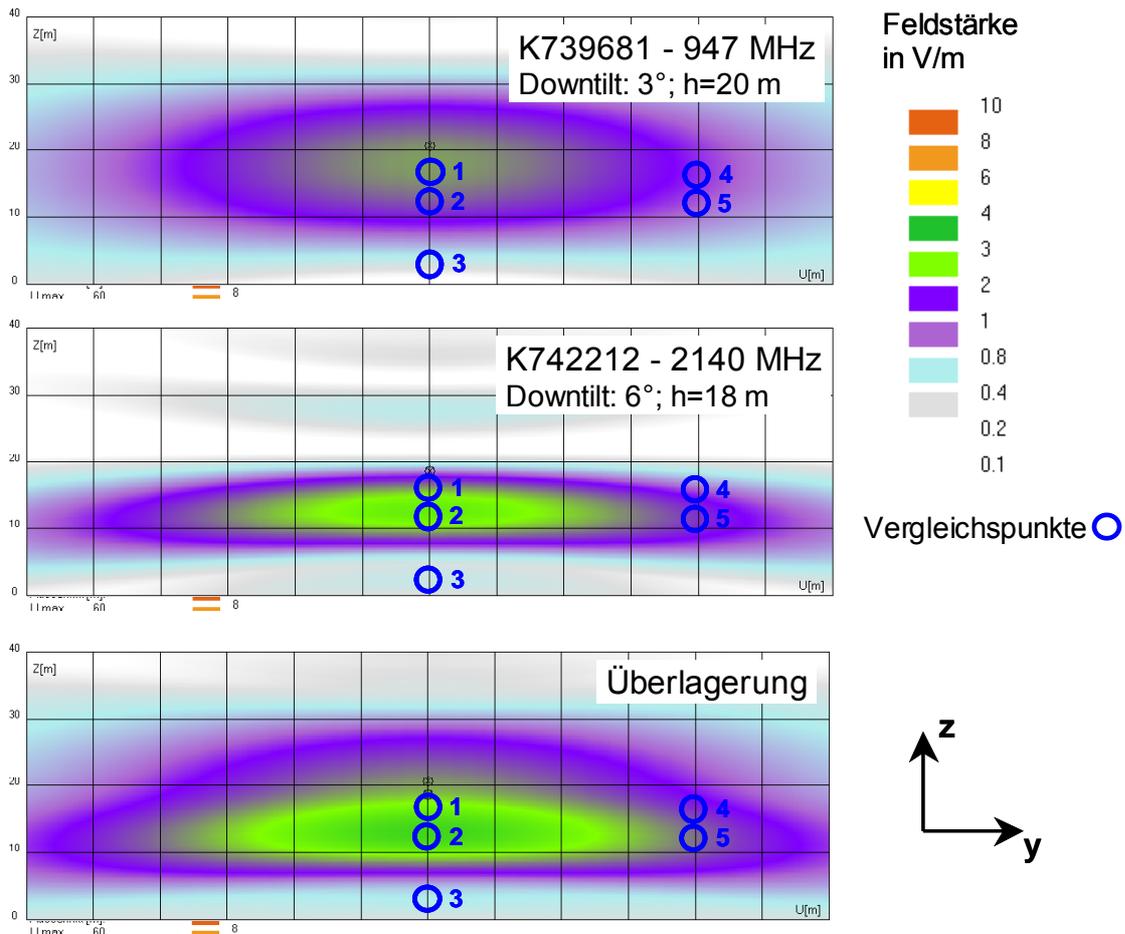


Bild II.2.12: Berechnungen der Immissionssituation von zwei bezüglich Downtilt und Montagehöhe unterschiedlichen Mobilfunkantennen mit reiner Freiraumausbreitung, Querschnitt

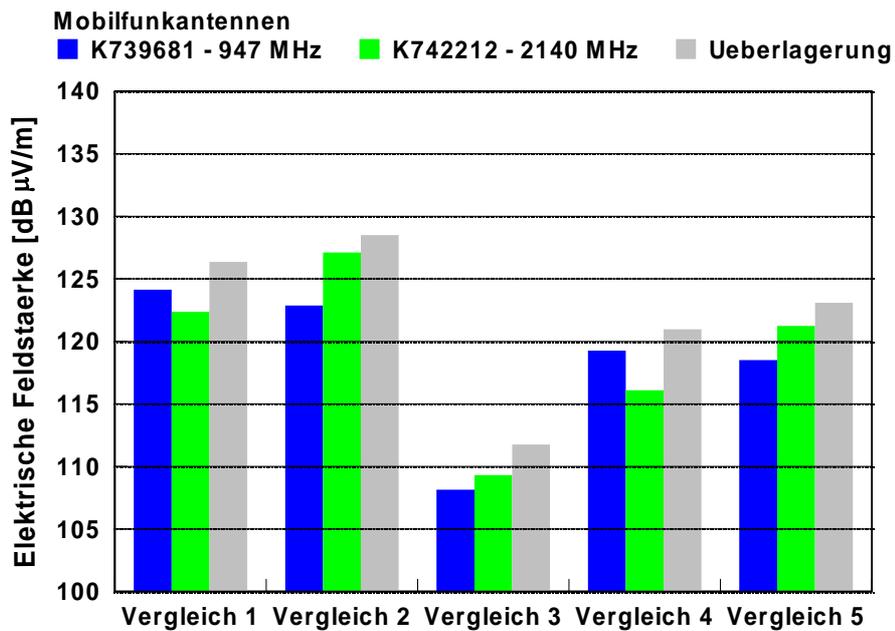


Bild II.2.13: Vergleich der Feldstärkewerte an den definierten Vergleichspunkten

Wie schon in den vorangegangenen Beispielen sind die Unterschiede in der Feldstärke durch die Lage der Vergleichspunkte zu erklären. Liegen sie in der Hauptstrahlrichtung von beiden Systemen, wird der absolute Feldstärkewert für UMTS aufgrund des größeren Gewinns höher sein. Auf der anderen Seite ist die Wahrscheinlichkeit, in direkter Nähe einer Basisstation in Hauptstrahlrichtung zu sein, bei einer GSM 900-Anlage höher als bei einer UMTS-Anlage.

II.2.2.2 Geländedaten

Wie oben bereits erwähnt, wird in dieser Studie nicht nur die unmittelbare Umgebung bis zu 200 m eines Mobilfunksenders (vgl. [BOR 05]), sondern das gesamte Versorgungsgebiet betrachtet. Dieses kann bis zu mehrere Kilometer im Durchmesser betragen. Im Gegensatz zu einer Berechnung auf einer ebenen Grundfläche wird das Geländeprofil (und damit verbunden die geänderten absoluten Gebäudehöhen) einen Einfluss auf die ortsbezogene Immission haben und sollte somit bei einer Berechnung geeignet berücksichtigt werden.

Es existiert eine Vielzahl von unterschiedlichen Modellen und entsprechenden Datenformaten für die Darstellung von Geländeverläufen. In der folgenden Liste ist eine kleine Auswahl zu sehen.

- USGS¹ Digital Elevation Model (USGS DEM)
- NASA Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)
- Digitales Geländemodell (DGM)

In der hier vorliegenden Aufgabenstellung ist es wichtig, dass das verfügbare Datenformat insofern umgewandelt bzw. bearbeitet werden kann, um es möglichst einfach mit den jeweiligen Softwarepaketen importieren zu können. Hierzu wurden eine Reihe von frei verfügbaren Programmen recherchiert. Für diese Studie werden folgende Programme für die Konvertierung und Bearbeitung der digitalen Elevationsdaten verwendet:

- **3DEM (Visualization Software LLC) [3DEM]**

Die Software ist frei verfügbar und es lassen sich Geländedaten verschiedener Datenformate (siehe Bild II.2.14) bearbeiten und in ein GeoTiff, USGS ASCII DEM bzw. eine Matrix konvertieren. Es können zum Beispiel einzelne Bereiche separiert und als neue Datei abgespeichert werden. Auf diese Weise kann nur die zu betrachtende Region in die jeweiligen Programme importiert und somit Speicherbedarf reduziert werden.

¹ USGS: U.S. Geological Survey (engl.) → Geologische Überwachungsbehörde der USA

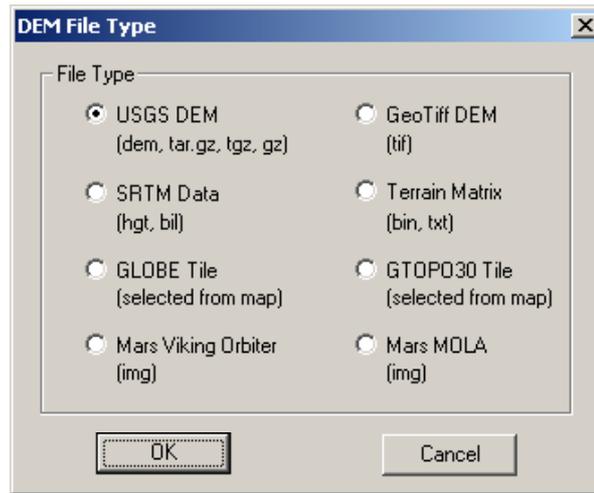


Bild II.2.14: Datenformate, die mit 3DEM bearbeitet werden können

- **VT-Builder [VTP]**

Auch das Programm VT-Builder ist kostenlos verfügbar. Verschiedene Datenformate können eingelesen, bearbeitet und konvertiert werden. Darüber hinaus ist es auch möglich mehrere Geländedatendateien (so genannte „Kacheln“) zusammenzufügen.

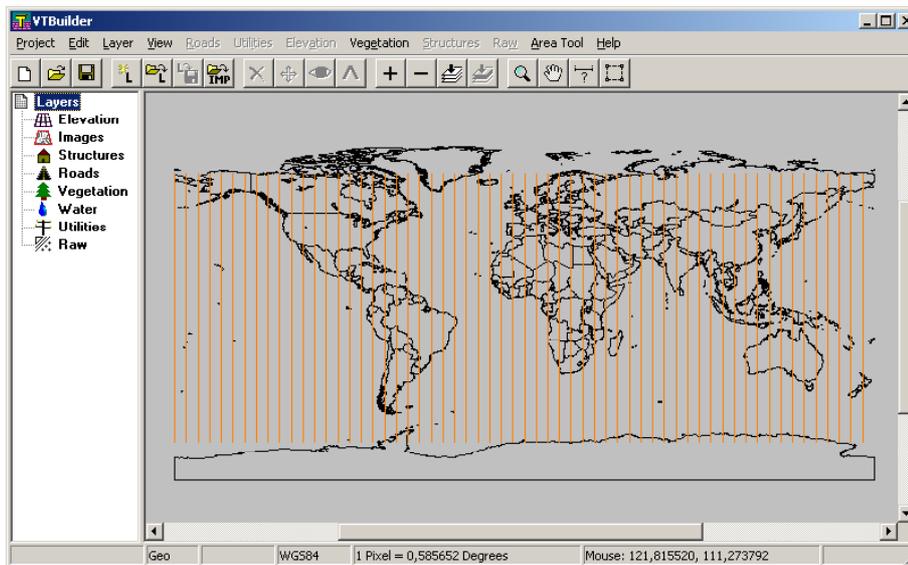


Bild II.2.15: Benutzeroberfläche vom VT-Builder [VTP]

- **Landserf [LS]**

Auch das Programm Landserf ist kostenlos verfügbar. Verschiedene Datenformate können eingelesen, bearbeitet und konvertiert werden.

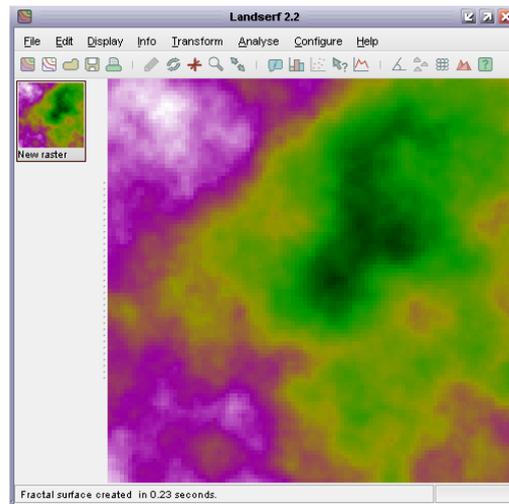


Bild II.2.16: Benutzeroberfläche von Landserf [LS]

Für diese Studie werden als Grundlage die SRTM Elevationsdaten [SRTM] verwendet, da sie eine geeignete Auflösung aufweisen und kostenlos für jedermann verfügbar sind. Sie wurden durch die „Shuttle Radar Topography Mission“ generiert. Die Höheninformation wurden hierbei aus dem vom Spaceshuttle ausgesandten und an der Erdoberfläche rückgestreuten Radarsignal ermittelt.

Diese SRTM-Daten werden mit dem VT-Builder und 3DEM in das Dateiformat USGS DEM umgewandelt und können so am einfachsten verarbeitet und in die jeweiligen Softwarepakete integriert werden.

II.2.2.3 Gebäudedaten

Auch die Gebäudedaten werden durch Abschattung, Reflexionen, Beugungen usw. großen Einfluss auf die Immissionsverteilung nehmen und sollten insofern auch in einer Berechnung geeignet berücksichtigt werden.

Für die Gebäudedaten werden prinzipiell die Länge, die Breite und die Höhe benötigt. Der vollständige Grundriss der Gebäude ist entweder Satellitenbildern (siehe Bild II.2.17) oder den Geobasisdaten des Liegenschaftskatasters (siehe Bild II.2.18) zu entnehmen. Beispielsweise sind in NRW ca. 80 % der Fläche digital erfasst. Der Datenbestand insgesamt enthält ca. 3,7 Mio. Hauptgebäude und ungefähr die gleiche Anzahl an Nebengebäuden. Die Geobasisdaten des Liegenschaftskatasters werden bei den Katasterbehörden der Kreise und kreisfreien Städte geführt und können zentral für NRW über das Geodatenzentrum beim Landesvermessungsamt kostenpflichtig bestellt werden.



Bild II.2.17: Satellitenbild einen städtischen Bereichs (exemplarisch)

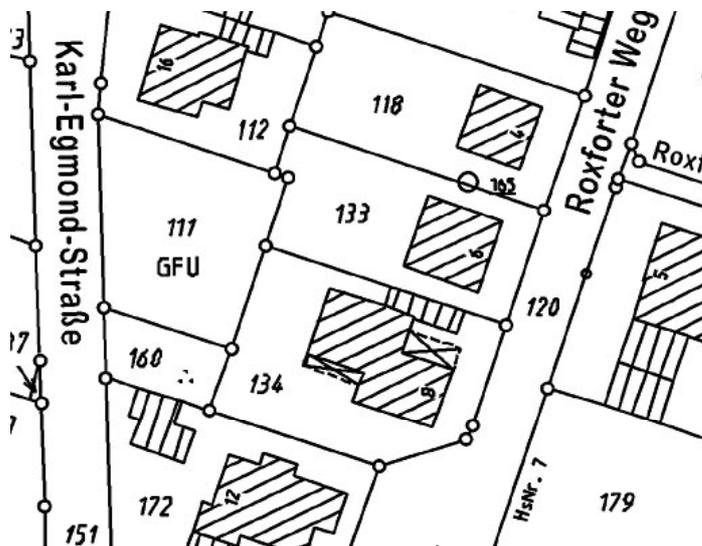


Bild II.2.18: Auszug aus einem Liegenschaftskataster

Allgemein ist zu beachten, dass in den Gebäudereferenzen generell keine Gebäudehöhen enthalten sind. In den Vektordaten der automatisierten Liegenschaftskarte ist zwar ein Attribut „Anzahl Vollgeschosse“ vorgesehen, von dem auf die Höhe geschlossen werden könnte, aber dieses ist noch nicht vollständig erfasst.

II.3 Simulationen

Im folgenden werden verschiedene Konfigurationen mit den jeweiligen Softwarepaketen modelliert und berechnet. Für den Vergleich zwischen rechentechnisch prognostizierter und messtechnisch ermittelter Exposition im dritten Projektteil ist es sinnvoll, verschiedene, praxisrelevante Expositionsszenarien zu definieren. Hierbei werden exemplarisch folgende Konfigurationen ausgewählt:

- Pikozone
- Basisstation auf einem Haus und Bestimmung der Immissionsverteilung in einer darunter liegenden Wohnung
- Basisstation auf einem Haus und Bestimmung der Immissionsverteilung innerhalb eines Stadtgebietes mit einer Fläche von ca. 1 km²

Diese Konfigurationen beinhalten neben verschiedenen UMTS-Zelltypen, Indoor- und Outdoor-Szenarien und differierenden Sichtbedingungen auch unterschiedliche Abstände (direkte Senderumgebung bis Ende der Versorgungszelle) zur Basisstation. Anhand dieser typischen Anwendungsfälle werden die Softwarepakete im folgenden *prinzipiell* auf ihre Eignung für vorliegende Aufgabenstellung überprüft. Ein Vergleich mit Messwerten wird im dritten Projektteil anhand von ausgewählten Szenarien durchgeführt.

Alle Berechnungen wurden auf einem Computer mit folgenden Eckdaten durchgeführt:

- Betriebssystem: Microsoft Windows 2000
- Prozessor: Pentium IV
- Taktfrequenz: 1,8 GHz
- Arbeitsspeicher: 1 GB
- Grafikkarte: Aopen Gforce 4 TI 4200, 64 MB, Open GL

II.3.1 Vorbetrachtungen

Vor den eigentlichen Simulationen und deren Vergleich werden zunächst einige Vorbetrachtungen durchgeführt, deren Ergebnisse in den Berechnungen direkt Verwendung finden.

Zunächst sind in Bild II.3.1 die Winkeldefinitionen von Azimut und Downtilt in den einzelnen in dieser Studie verwendeten Softwarepakete vergleichend gegenüber gestellt. Bei der Anwendung der Programme ist hierbei besonders darauf zu achten, dass nicht einfach der Winkel z.B. aus der Standortbescheinigung übernommen wird.

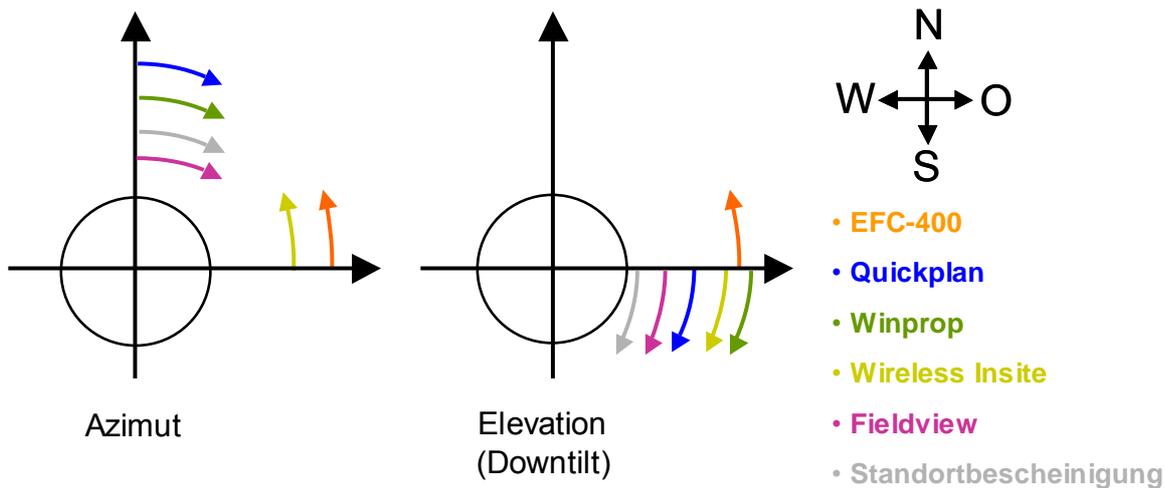


Bild II.3.1: Vergleich der Drehwinkeldefinitionen für Azimut und Elevation in den einzelnen Softwarepaketen und der Standortbescheinigung; die Himmelsrichtungen beziehen sich auf die azimutale Ausrichtung

Für eine verbesserte Vergleichbarkeit der Simulationsergebnisse der verschiedenen Softwarepakete untereinander wurde in allen Berechnungen Material für Gebäude und Wände mit folgenden Parameter verwendet:

- rel. Permittivität: 4
- Leitfähigkeit: 0,01 S/m

Ferner wurden der entsprechende Dämpfungsfaktor von ca. 4 dB und Reflexionsfaktor von ca. 40% für die Simulationen mit EFC-400 aus einer Berechnung mit Wireless Insite abgeschätzt.

Hinzukommend muss an dieser Stelle erwähnt werden, dass Indoor-Szenarien wie auch schon in [BOR 05] mit dem Programm Quickplan generell nicht modelliert werden können. Daher wird Quickplan bei derartigen Konfigurationen im weiteren nicht verwendet.

II.3.1.1 Integration von Gebäudeinformationen

In [BOR 05] wurde die Modellierung der Gebäude auf Basis von Satellitenbildern durchgeführt. Im Unterschied dazu wird in dem hier vorliegenden Projekt nicht nur die direkte Senderumgebung bis ca. 200 m Entfernung, sondern die gesamte Zellgröße betrachtet, die auch im städtischen Bereich Größenordnungen im Kilometerbereich aufweisen kann (vgl. Tabelle II.2.1). Im folgenden Satellitenbild ist exemplarisch ein derartiger Bereich mit mittlerer Bebauung dargestellt. Die nachfolgenden Beispiele bzw. Maßnahmen zur Integration der Gebäudedaten in die jeweiligen Programme beziehen sich alle auf das in diesem Ausschnitt dargestellte Gebiet.



Bild II.3.2: Satellitenbild

Obiges Bild zeigt anhand der Vielzahl von Gebäuden deutlich, dass der Modellierungsaufwand für die manuelle Erstellung jedes einzelnen Gebäudes nicht mehr praktikabel ist. Insofern werden im folgenden Möglichkeiten näher untersucht, diesen Aufwand zu minimieren und für jedes der untersuchten Softwarepakete eine praktikable Lösung zu finden.

Ein Ansatzpunkt ist hierbei die Möglichkeit, bei z.B. Winprop oder Quickplan die Gebäude aufgrund von schwarz ausgefüllten Grundrissen (siehe Bild II.3.3) zu generieren.

Bei der Betrachtung von Bild II.2.17 und Bild II.2.18 wird schnell deutlich, dass als Grundlage für dieses Ziel nur Katasterpläne geeignet sind. Hier ist aber zu beachten, dass die Gebäudegrundrisse zum einen nur schraffiert vorliegen und zum anderen diese noch weitere Informationen (z.B. Hausnummer, Straßenverläufe usw.) enthalten. Würde man einen derartigen Katasterplan mittels eines grafischen Programms bearbeiten wollen, um an die schwarz-weißen Grundrissbilder zu gelangen, wäre der Aufwand hierfür in gleicher Weise erheblich wie die einzelne Modellierung der Gebäude.

Um dieses Problem dennoch lösen zu können, wurde mit dem Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen (<http://www.lverma.nrw.de/index.htm>) zusammengearbeitet. Als Ergebnis dieses Austausches konnten Filter für die in digitaler Form vorliegenden Katasterpläne in der Art eingestellt werden, dass jegliche für den hier betrachteten Anwendungsfall überflüssige Information herausgefiltert wurde und darüber hinaus die Gebäudegrundrisse als schwarze Flächen dargestellt werden konnten (siehe Bild II.3.3).



Bild II.3.3: Vom Landesvermessungsamt generiertes schwarz-weiß Bild auf Grundlage eines Katasterplans

Die so erzeugten Bilder können mit Winprop bzw. Quickplan als Hintergrundbild eingelesen werden. Die Häuser werden durch einen internen Algorithmus mit einheitlicher Höhe auf die schwarz ausgefüllten Grundrisse aufgesetzt. Um die richtigen Abmessungen der Gebäude zu erhalten, können bei Quickplan zwei geografische Koordinatenpaare eingegeben und bei Winprop eine Referenzstrecke bestimmt werden. Die Kosten für derartige Daten belaufen sich nach Auskunft des Landesvermessungsamtes NRW je nach Informationsdichte auf ca. 40 – 150 € je km². Je nach Größe der Fläche existiert noch eine Rabattstaffelung. Die Informationsdichte wird über die Anzahl der Gebäude ermittelt. Eine grobe Einteilung der Kosten ist in folgender Tabelle zu sehen.

Gebiet	Bebauung	Kosten (in €) pro km ²
Dörfliche Umgebung	Wenig Bebauung	~ 40 - 60
Vorstädtische Umgebung	Lockere Bebauung	~ 60 - 100
Großstadt	Enge Bebauung	~ 100 - 150

Tabelle II.3.1: Kosten für Gebäudedaten

Die obigen Kosten entsprechen ca. 10% der Kosten für Vektordaten. Weitere Daten sind der Internetseite des Landesvermessungsamtes zu entnehmen.

Die oben beschriebene Vorgehensweise ist bei EFC-400 bzw. Wireless Insite nicht möglich. Hier können aber Vektordaten eingelesen werden. Auf Basis der Gebäudegrundrisse als schwarz-weiß Bild kann hier folgende Vorgehensweise durchgeführt werden.

Als erster Schritt wird das schwarz-weiß Bild vektorisiert (z.B. mit Corel Draw). Dies ist in folgendem Bild dargestellt. Als Resultat erhält man die Gebäudegrundrisse als jeweils geschlossenen Polygonzug, der im dxf-Format gespeichert werden kann.

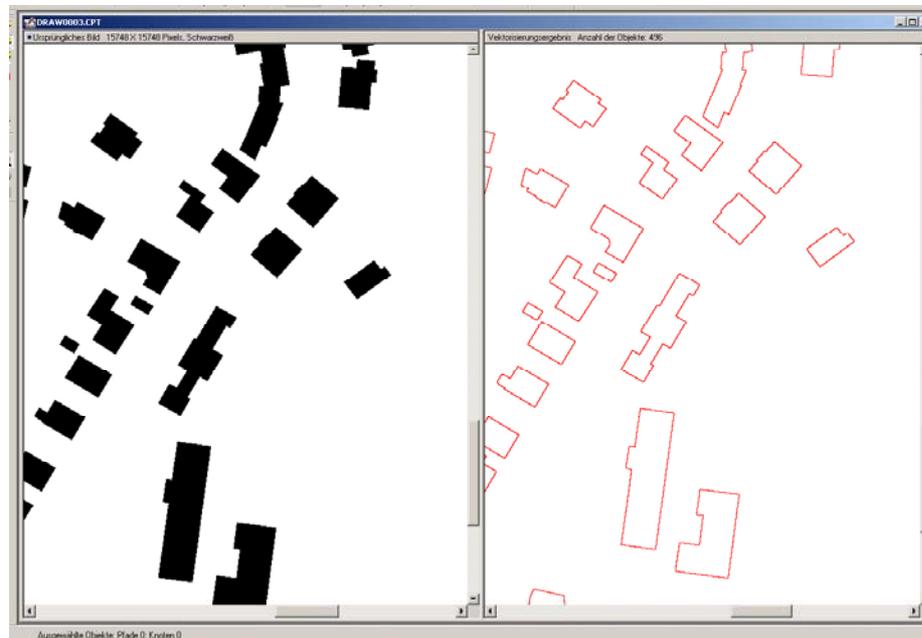


Bild II.3.4: Vektorisieren mit Corel Draw
links: Schwarz-weiß Bild mit den Gebäudegrundrissen
rechts: Vektorisierte Grundrisse als zweidimensionale Polygonzüge

Die so erzeugte dxf-Datei mit den zweidimensionalen Daten der Grundrisse der Gebäude kann nun direkt mit dem Programm EFC-400 importiert werden. Hierzu muss wie schon bei Quickplan und Winprop zunächst eine globale Höhe für alle Gebäude gewählt werden, die anschließend für jedes einzelne Gebäude individuell variiert werden kann.

Um die Gebäude auch mit Wireless Insite importieren zu können, muss noch ein weiterer Bearbeitungsschritt unternommen werden. Die zweidimensionalen Daten werden mit einem CAD Programm (z.B. Autocad) geöffnet (siehe Bild II.3.5).

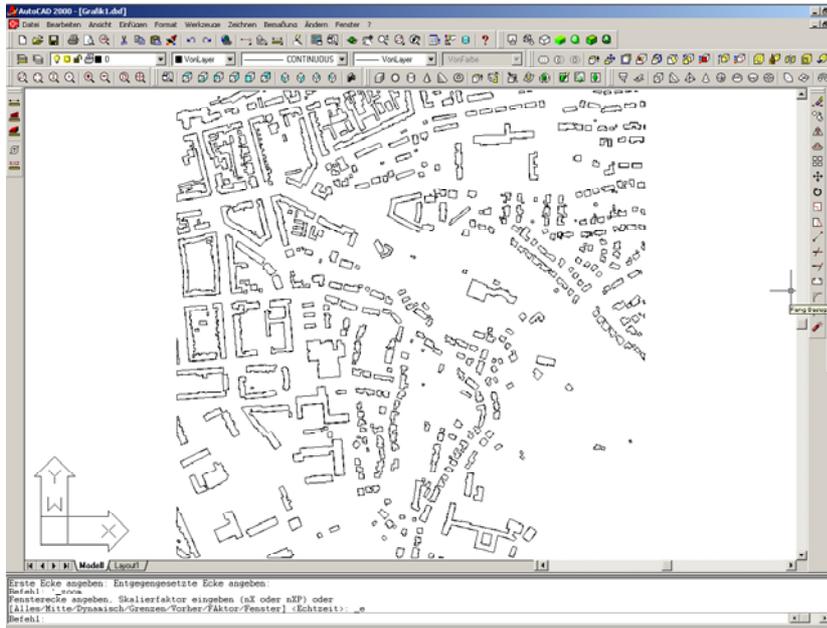


Bild II.3.5: DXF-Datei mit den zweidimensionalen Grundrissen der Gebäude

Anschließend werden alle Grundrisse gleichzeitig markiert und ihnen wird wiederum als dritte Dimension eine einheitliche Höhe zugeordnet. Im folgenden Bild ist diese Vorgehensweise zur besseren Übersichtlichkeit nur für ein einzelnes Gebäude anschaulich dargestellt. Diese nun dreidimensionalen Daten können schließlich mit Wireless Insite problemlos importiert werden.

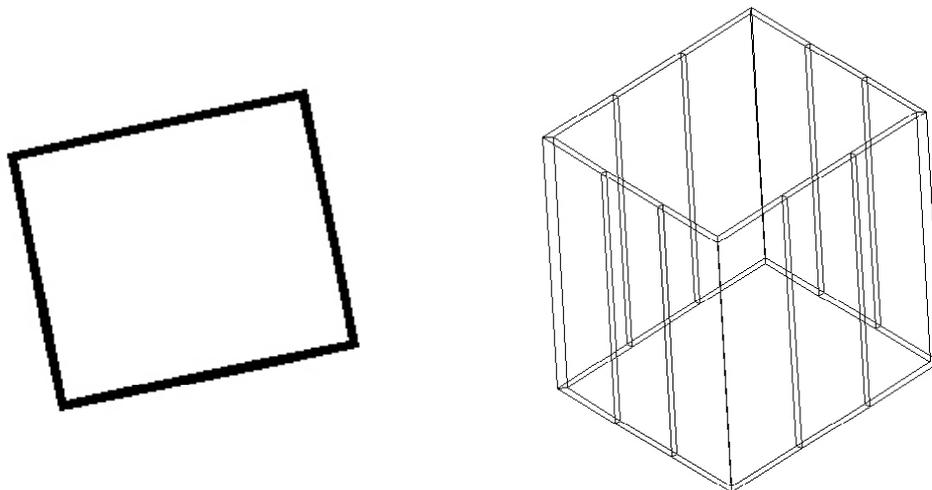


Bild II.3.6: Generation von Höheninformationen mit Autocad

Abschließend müssen die auf diese Weise für alle Softwarepakete generierten Gebäudedaten an die korrekte geographische Position verschoben werden, damit sie mit den entsprechenden Höheninformationen des Geländes korrespondieren. Diese Vorgehensweise ist am einfachsten auf Basis von UTM- bzw. Gauss-Krüger Koordinaten durchzuführen.

II.3.1.2 Einfluss des Geländes auf die Immissionsverteilung

Der folgende Abschnitt beschäftigt sich mit dem Einfluss des Geländes auf die Immissionsverteilung. Hierzu wurde eine Region mit einer Höhendifferenz von 25 m ausgewählt (siehe Bild II.3.7). Der niedrigste Wert ist hierbei bei etwa 25 m über NN. Es werden für diese Studie die schon in Abschnitt II.2.2.2 angesprochenen SRTM-Daten verwendet.

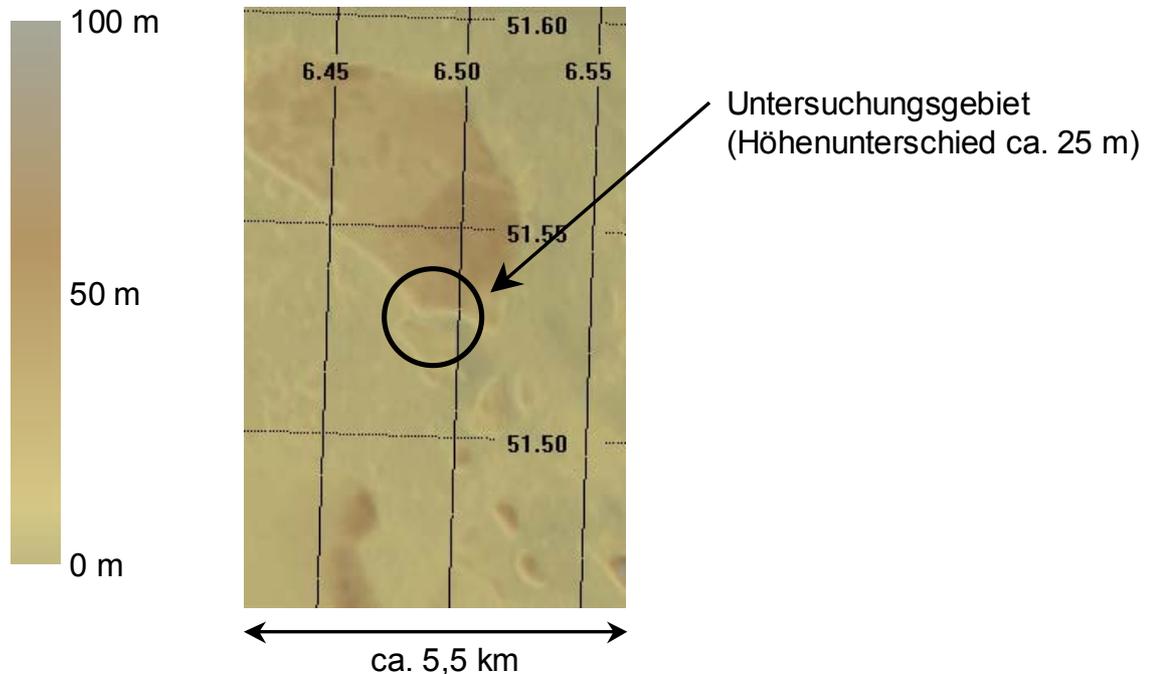


Bild II.3.7: Untersuchungsgebiet für den Einfluss von Geländedaten

Damit ein möglicher Einfluss auf die Immissionssituation durch das Gelände nachgewiesen werden kann, wird im folgenden jeweils eine Simulation mit bzw. ohne Geländeeinfluss mit identischen Parametern durchgeführt und anschließend miteinander verglichen.

In Bild II.3.8 ist das Simulationsergebnis zu sehen, das mit dem Programm EFC-400 berechnet wurde. Zu beachten ist an dieser Stelle der Import der Geländedaten in das Programm. EFC-400 erfordert Geländedaten, die auf UTM oder Gauss-Krüger Koordinaten basieren. Da diese hier im USGS DEM-Format mit Längen- und Breiteninformationen in Grad vorliegen, muss vorher noch eine Konvertierung vorgenommen werden. Hierfür wird das Programm Landserf verwendet. Die auf diese Weise erstellten Geländedaten können ohne Probleme in EFC-400 integriert werden. Zu berücksichtigen ist hierbei allerdings, dass alle anderen Daten (z.B. Standortkoordinaten der Basisstation) mit den entsprechenden geografischen Koordinaten integriert werden, damit eine genaue Übereinstimmung zwischen Gebäude-, Gelände- und Anlagenstandortsinformation vorliegt.

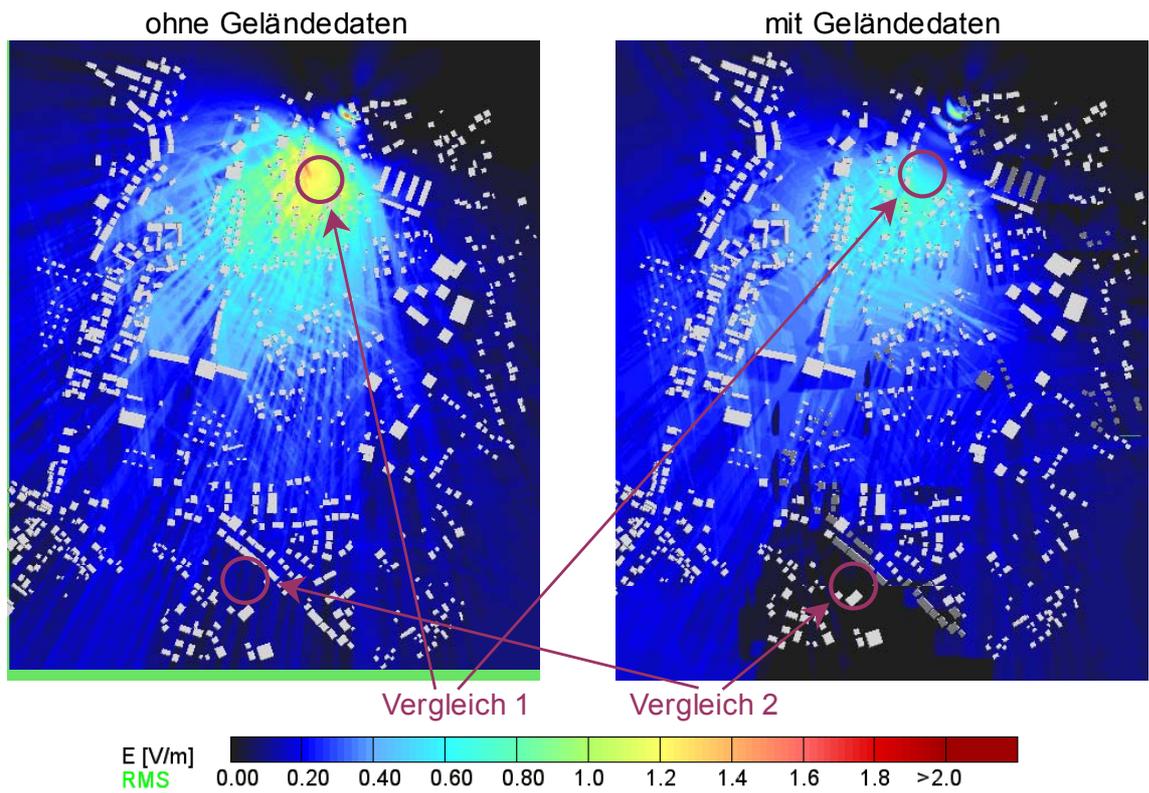


Bild II.3.8: Einfluss des Geländes auf die Immissionsituation, EFC-400

Bereits dieses Szenario zeigt einen deutlichen Unterschied in der Immissionsverteilung. Bedingt durch die Lage im Tal und einer somit größeren Höhendifferenz zur Basisstation hat der maximale Feldstärkewert im Vergleich 1 bereits einen Unterschied von ca. 6 dB zwischen beiden Berechnungen. Noch auffälliger ist die Differenz der Immissionsberechnung im Vergleich 2, die hier bei ungefähr 30 dB liegt. Es zeigt sich demnach bereits hier deutlich, dass für die in vorliegender Studie betrachtete Größe einer Mobilfunkzelle die Geländedaten auf jeden Fall in einer Simulation berücksichtigt werden sollten.

Im folgenden wird ein ähnliches Beispiel mit Winprop simuliert. Nachdem die Gebäude mit dem Programmmodul „Wallman“ auf Basis eines schwarz-weiß Bildes generiert und an die entsprechende geografische Lage mittels x- bzw. y- Verschiebung als UTM-Koordinaten verschoben wurden, können diese in das Ausbreitungsmodul „ProMan“ eingelesen werden. Die Geländedaten im USGS DEM-Format können mit einem von AWE-Communications programmierten Filter importiert werden. In folgendem Bild ist das Resultat des gleichen Szenarios mit und ohne Geländeeinfluss zu sehen.

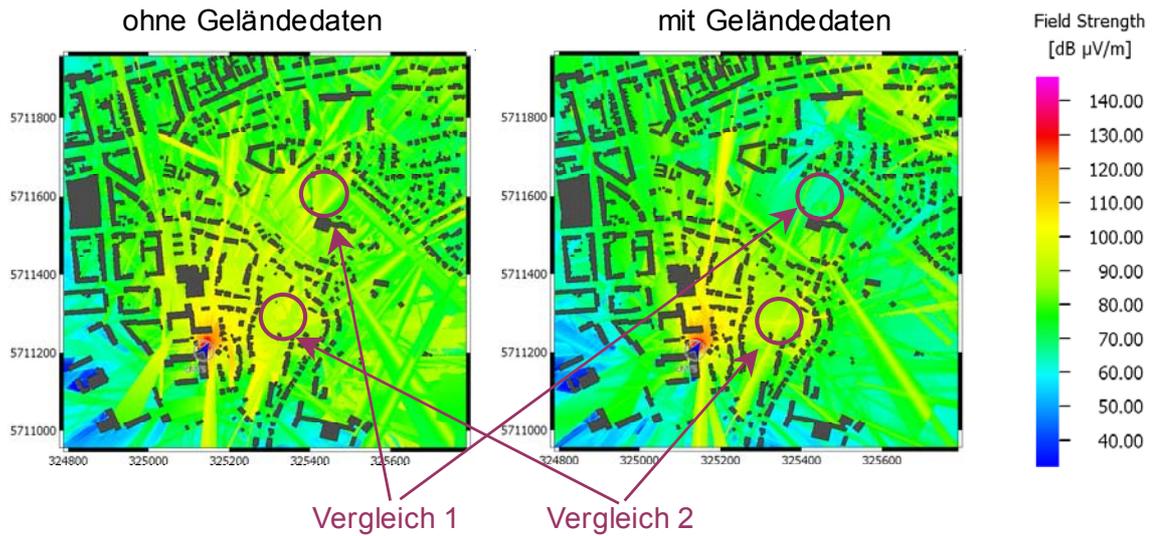


Bild II.3.9: Einfluss des Geländes auf die Immissionsituation, Winprop

Wie auch schon bei der Simulation mit EFC-400 ist auch bei der Berechnung mit Winprop ein deutlicher Einfluss des Gelände Profils auf die Immissionsverteilung zu erkennen. So beträgt der Unterschied im Vergleich 1 ca. 35 dB und in Vergleich 2 ungefähr 7 dB.

Als nächstes werden analog zur vorherigen Vorgehensweise zwei Simulationen mit Wireless Insite durchgeführt. Beim Import der Gebäudedaten ist darauf zu achten, dass sie bereits vorher (z.B. mit Autocad) an die richtige geografische Lage verschoben wurden. Das Simulationsergebnis ist in folgendem Bild dargestellt.

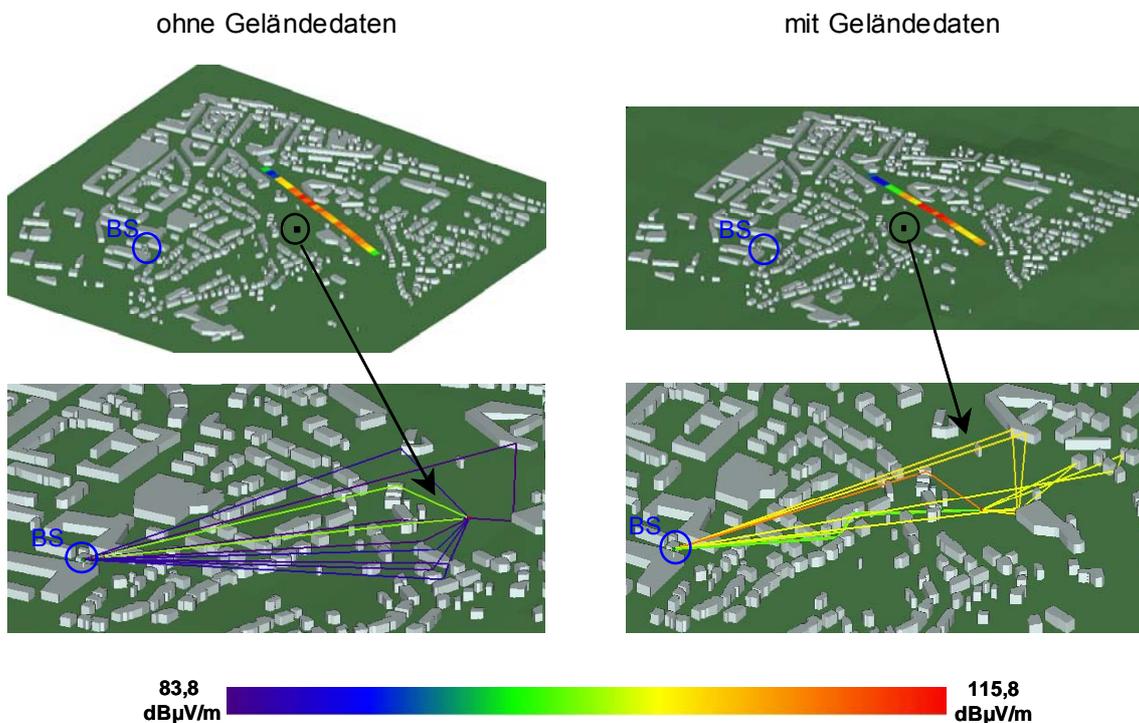


Bild II.3.10: Einfluss des Geländes auf das Simulationsergebnis, Wireless Insite

Vergleicht man Bild II.3.10 mit den zwei vorangegangenen, fällt direkt auf, dass keine flächige Verteilung der Immission berechnet wurde, sondern lediglich die elektrischen Feldstärken entlang einer Route. Dies liegt in der langen Rechenzeit begründet, die eine flächige Simulation erfordern würde (siehe hierzu Abschnitt II.3.4). In der unteren Hälfte des Bildes sind exemplarisch für einen Empfangspunkt die Ausbreitungswege dargestellt. Auch wird deutlich, dass das Gelände einen großen Einfluss auf die Immissionsverteilung hat. Analog zu den Beispielen vorher sind auch hier Unterschiede bis zu 20 dB zwischen beiden Simulationen vorhanden.

In Bild II.3.11 ist ein Simulationsergebnis zu sehen, das mit Quickplan berechnet wurde. Bei Quickplan gibt es wie in [BOR 05] ausführlich beschrieben drei Berechnungsarten, von denen in dieser Studie zwei verwendet werden. Zur Überprüfung des Einflusses des Geländes wurde mit der so genannten „Oberflächenberechnung“ simuliert. Hier wird die Immissionsverteilung programmintern automatisch flächig in einer Höhe von 2 m bestimmt. Darüber hinaus wird hierbei nur der stärkste einfallende Ausbreitungsweg berücksichtigt. Eine genauere Betrachtung kann mit der Testpoint – Methode vorgenommen werden. Hierzu werden vom Benutzer Empfangspunkte in frei wählbarer Höhe im Simulationsraum verteilt und die Feldstärke aller einfallender Strahlen kohärent überlagert. Um den Einfluss des Geländes zu betrachten, wird für die hier durchgeführte Simulation die Oberflächenberechnung verwendet. Die Geländedaten können im USGS DEM-Format eingelesen und die Gebäude aufgrund von schwarz-weiß Grundrissbildern automatisch generiert werden.

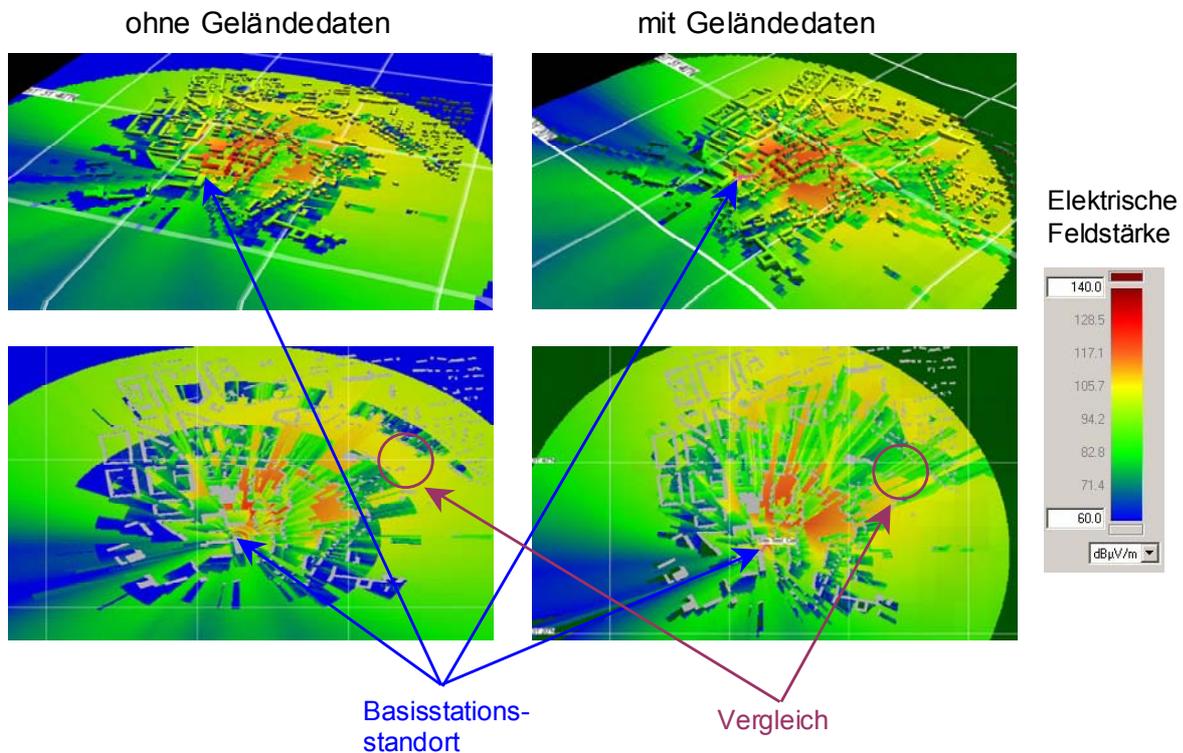


Bild II.3.11: Einfluss des Geländes auf die Immissionssituation, Quickplan

Auch die Simulation mit Quickplan zeigt wie schon die Resultate zuvor, dass das Geländeprofil Einfluss auf die Immissionsverteilung hat. Dies ist in obigen Bild an den beiden Vergleichsgebieten zu erkennen, in denen der Immissionsunterschied bis zu 25 dB beträgt.

Fazit:

Wie die obigen Beispiele deutlich zeigen, sollte bei der flächendeckenden Berechnung der Immissionsverteilung der Feldstärke im gesamten Versorgungsgebiet einer UMTS-Zelle mit Geländedaten gerechnet werden. Insofern sollten in diesem Fall auch nur Softwarepakete herangezogen werden, bei denen auch die Geländedaten mit in die Berechnung einfließen. Wird hingegen die Feldstärkeprognose nur für einzelne ausgewählte Punkte durchgeführt, sind hier vereinfachte Lösungen möglich. Statt flächendeckend kostenmäßig nicht zu vernachlässigende Geodaten einzulesen, kann eine manuelle Berücksichtigung der topografischen Höhenunterschiede für eine nicht zu große Anzahl an Einzelpunkten eine durchaus kostengünstige Alternative sein.

Dennoch sollte wie schon in [BOR 05] gezeigt an dieser Stelle angemerkt werden, dass bei der Immissionsbestimmung in direkter Senderumgebung eventuell auch bei UMTS mit dem einfachen Verfahren der „Freiraumausbreitung mit einem Zuschlag von 3 dB“ gerechnet werden kann. Dies wird in den folgenden Berechnungen von verschiedenen Konfigurationen noch näher untersucht.

II.3.1.3 Multifrequenzielle Anregung

Die Immissionsverteilung weist bei GSM in Innenräumen „kleinskalige Schwankungen“ auf, die im Bereich von einigen Zentimetern auftreten [BOR 04]. Im englischen Sprachgebrauch wird dieses Problem auch als „Fast Fading“ bezeichnet. Fast Fading tritt dann auf, wenn die Funkwellen vom Sender zum Empfängerort aufgrund von Reflexionen, Beugung usw. über mehrere Ausbreitungspfade gelangen (engl. multipath environment) und die einzelnen Teilwellen dabei interferieren. In Abhängigkeit vom Ort treten dabei differierende Gangunterschiede der Teilwellen auf, so dass die Überlagerung konstruktiv oder destruktiv sein kann. Der Wechsel zwischen konstruktiver und destruktiver Interferenz kann, abhängig von den Pfadunterschieden, im Zentimeterbereich stattfinden.

Ein UMTS Signal weist im Gegensatz zu GSM (200 kHz) eine mit 4-5 MHz vergleichsweise große Bandbreite auf. Durch dieses breitbandige Szenario wäre eine Abschwächung der Interferenzerscheinungen zu erwarten, da sich die Feldstärkeanteile aller Frequenzen aufgrund von z.B. frequenzabhängigen Ausbreitungserscheinungen oder Gangunterschieden an einem Punkt nicht phasengleich überlagern werden.

Generell ist die breitbandige Nachbildung der Feldquelle bzw. eine breitbandige Berechnung in keinem der oben dargestellten Programme vorgesehen bzw. integriert. Diese Breitbandigkeit könnte aber insofern modelliert werden, dass eine „breitbandige“ Quelle durch mehrere Quellen mit unterschiedlichen Frequenzen nachgebildet wird und die resultierenden Felder amplituden- und phasengetreu überlagert werden. Da in diesem Fall die Ausbreitungsrechnung für jede Frequenz einzeln durchgeführt werden muss, erhöht sich dementsprechend auch die Rechenzeit mit der Anzahl der betrachteten Frequenzen.

Es wird für die folgenden Untersuchungen das Programm Wireless Insite verwendet. Für die kohärente Überlagerung der einzelnen Beiträge der unterschiedlichen Frequenzen ist die

Information über die Amplitude und Phase an jedem Vergleichspunkt zwingend erforderlich. Diese Randbedingung wird von den in dieser Studie betrachteten Programmen nur von Wireless Insite erbracht.

Das folgende Bild II.3.12 zeigt das Szenario, das der hier zu untersuchenden Fragestellung zu Grunde liegt. In 50 m Entfernung zur Basisstation befindet sich das Untersuchungsgebiet innerhalb eines Gebäudes in einer Höhe von 1,7 m oberhalb des Fußbodens in der zweiten Etage. Durch die Reflexionen an dem außen liegenden Gebäude und innerhalb des Raumes wird ein geeignetes Mehrwegeausbreitungsszenario kreiert.

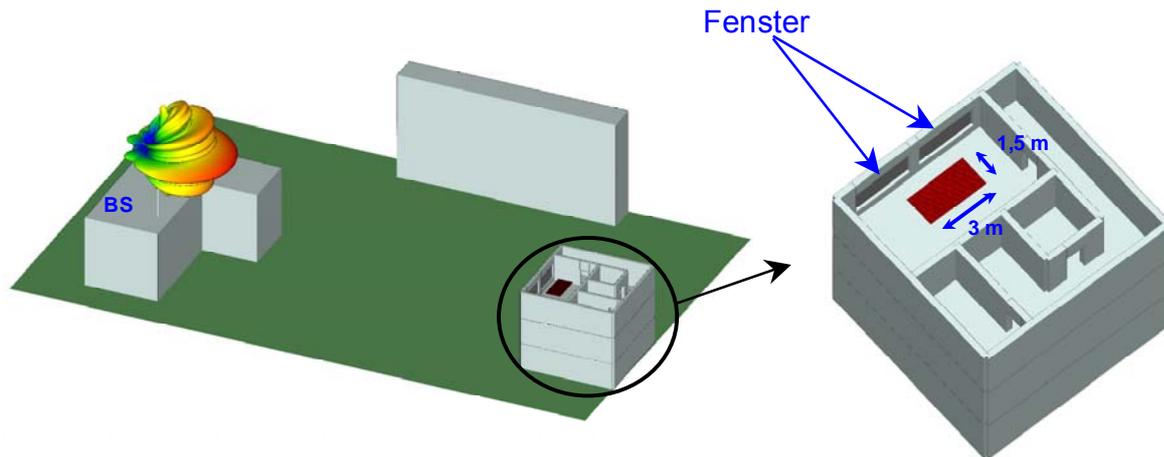


Bild II.3.12: Szenario zur Untersuchung einer multifrequenziellen Nachbildung der Feldquelle

Mit der in Bild II.3.12 dargestellten Konfiguration sollen an dieser Stelle exemplarisch grundsätzliche Veränderungen und Tendenzen zum monofrequenziellen Fall aufgezeigt werden. Die Auflösung der Empfangspunkte im betrachteten Untersuchungsgebiet liegt bei 5 cm. Die folgende Tabelle enthält die Frequenzen, die für die Betrachtung verwendet wurden. Um die Mittenfrequenz von 2140 MHz werden innerhalb eines 5 MHz breiten Kanals insgesamt 21 Frequenzen gleichmäßig verteilt.

Nummer	Frequenz [MHz]	Nummer	Frequenz [MHz]
1	2137,50	12	2140,25
2	2137,75	13	2140,50
3	2138,00	14	2140,75
4	2138,25	15	2141,00
5	2138,50	16	2141,25
6	2138,75	17	2141,50
7	2139,00	18	2141,75
8	2139,25	19	2142,00
9	2139,50	20	2142,25
10	2139,75	21	2142,50
11	2140,00	Mittenfrequenz	2140,00

Tabelle II.3.2: Überblick über die verwendeten Frequenzen

Im ersten Fall werden von diesen Frequenzen 11 Einzelfrequenzen (jeweils die mit ungerader Nummer aus Tabelle II.3.2) betrachtet. Um einen möglichen Unterschied zur monofrequenziellen Nachbildung der Feldquelle zu erhalten, wird zum einen eine Simulation mit der Mittenfrequenz von 2140 MHz und einer Sendeleistung von 10 W und zum anderen 11 weitere Simulationen mit jeweils 1/11 der Sendeleistung durchgeführt.

In Wireless Insite ist es nicht möglich, die Ergebnisse der einzelnen Immissionsberechnungen bei verschiedenen Frequenzen programmintern zu überlagern. Daher wurden die Einzelresultate der 11 Simulationen mit einer eigens programmierten Software eingelesen und die einzelnen Feldstärkewerte nach Betrag und Phase an jedem Simulationspunkt kohärent überlagert. Um von den so erhaltenen zahlenmäßigen Resultaten an dieser Stelle auch einen visuellen Eindruck vermitteln zu können, wurde aus den generierten überlagerten Feldstärkewerten eine Ausgabedatei erzeugt, die mit Wireless Insite eingelesen werden konnte. In Bild II.3.13 ist das Ergebnis dieser Untersuchungen dargestellt.

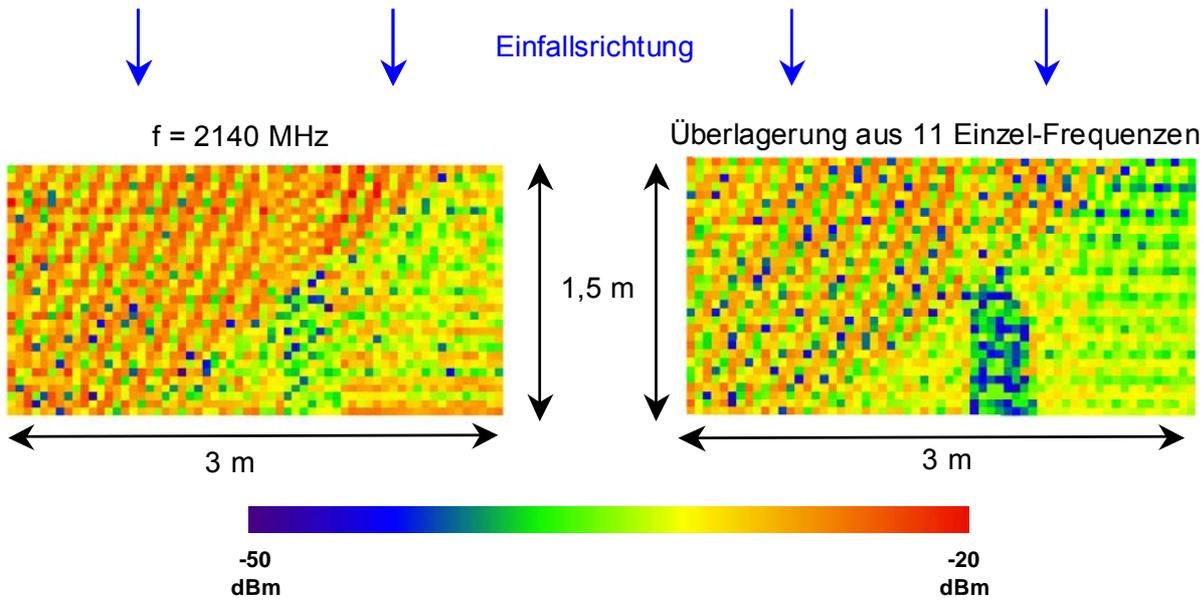


Bild II.3.13: Vergleich der Immissionsverteilung von Einzelfrequenz und Überlagerung von 11 Frequenzen

Wie aus Bild II.3.13 zu erkennen ist, weicht die Immissionsverteilung bei einer Frequenz von der bei 11 Frequenzen ab. Dies ist vor allem im rechten unteren Bereich deutlich zu sehen. Hier ist die Immissionsverteilung bei der Berechnung mit 11 Frequenzen homogener als bei der Berechnung mit einer einzelnen Frequenz. Um hier einen genaueren Eindruck zu erhalten, sind in folgender Tabelle die Maximalwerte beider Betrachtungen und die Differenz aus Maximal- und Minimalwert dargestellt.

	Differenz	Maximaler Wert	
	Maximum-Minimum		
f=2140 MHz	31 dB	-19,4 dBm	124,4 dBµV/m
11 Frequenzen	26 dB	-23,2 dBm	120,6 dBµV/m

Tabelle II.3.3: Vergleich der zwei Betrachtungen von 1 bzw.11 Frequenzen

Die Umrechnung von dBm in die Einheit dBµV/m ist in Wireless Insite mit folgenden Formeln durchzuführen. Es ist zu beachten, dass es sich bei den Empfangsantennen, die zur Ergebnisdarstellung im Rechengebiet platziert werden müssen, um isotrope Kugelstrahler handelt.

$$P_e \text{ (W)} = 10^{(P(\text{dBm})/10)/1000} \tag{II.3.1}$$

$$E \left(\text{dB} \frac{\mu\text{V}}{\text{m}} \right) = 20 * \log \left(\sqrt{P_e * Z_{F0} * 4\pi * f^2 / c_o^2} / 1 \frac{\mu\text{V}}{\text{m}} \right) \tag{II.3.2}$$

Aus Tabelle II.3.3 wird deutlich, dass die Schwankungsbreite zwischen Maximum und Minimum bei der Überlagerung mehrerer Frequenzen verkleinert wird. Hinzukommend liegt der Maximalwert der Feldstärke bei der Berechnung mit 11 Frequenzen in dem gesamten

betrachteten Untersuchungsgebiet 3,8 dB unterhalb des Wertes, der als Ergebnis bei der Berechnung mit einer einzelnen Frequenz erhalten wurde.

Im folgenden wird analog zur vorher beschriebenen Vorgehensweise das Simulationsergebnis von einer Frequenz mit den kohärent überlagerten Ergebnissen von 21 Frequenzen mit einer entsprechenden Sendeleistung von 1/21 durchgeführt.

In Bild II.3.14 ist wiederum das Ergebnis dargestellt und in der anschließenden Tabelle die Zahlenwerte analog zum vorherigen Beispiel.

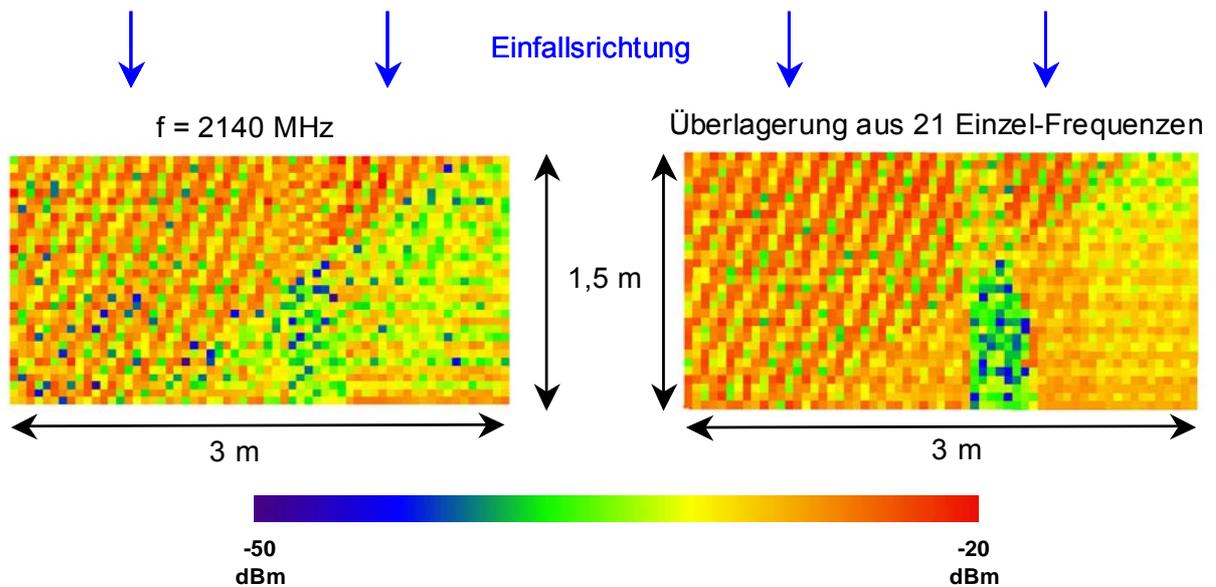


Bild II.3.14: Vergleich bei Überlagerung von 21 Frequenzen

In Bild II.3.14 ist gerade im Bereich unten rechts wie auch auf der linken Seite eine deutliche Homogenisierung der Feldverteilung bei der Berechnung mit 21 Frequenzen zu erkennen.

	Differenz		Maximaler Wert	
	Maximum-Minimum			
f=2140 MHz	31 dB		- 19,4 dBm	124,4 dBµV/m
21 Frequenzen	24,1 dB		- 22,1 dBm	121,7 dBµV/m

Tabelle II.3.4: Vergleich der zwei Betrachtungen von 1 bzw. 21 Frequenzen

Aus Tabelle II.3.4 wird wie schon aus Tabelle II.3.2 deutlich, dass die Differenz zwischen Maximum und Minimum bei der Überlagerung mehrerer Frequenzen verkleinert wird. Darüber hinaus liegt der Maximalwert der Feldstärke bei der Berechnung mit 21 Frequenzen in dem gesamten betrachteten Untersuchungsgebiet 2,7 dB unterhalb des Wertes der Berechnung mit einer einzelnen Frequenz.

Aus beiden obigen Beispielen sind folgenden Schlussfolgerungen zu ziehen:

- Die Bandbreite von 5 MHz des UMTS-Signals hat einen homogenisierenden Einfluss auf die Feldverteilung.
- Die Schwankungsbreite zwischen Maximal- und Minimalwert wird kleiner als bei der Simulation mit nur einer Frequenz.
- Der maximale Feldstärkewert ist bei einer Berechnung mit einer multifrequenziellen Nachbildung der Feldquelle kleiner als bei der Berechnung mit einer einzelnen Frequenz.

Wird nun allerdings der erhebliche Mehraufwand bei der Berechnung und der nachträgliche Aufwand der kohärenten Überlagerung in die Betrachtung mit einbezogen, so ist es für eine Berechnung unter Grenzwertüberprüfungsaspekten (Maximalwertsuche im Volumen) nicht zwingend erforderlich, die Feldquelle multifrequenziell nachzubilden. Denn hier liegt der prognostizierte Feldstärkewert bei einer Frequenz oberhalb des Wertes, der bei Überlagerung mehrerer Frequenzen auftritt.

II.3.2 Konfiguration 1: Pikozone

In Anlehnung an ein Flughafenterminal wird im ersten Vergleichsbeispiel zwischen den Softwarepaketen eine Pikozone näher betrachtet. Der Grundriss des Untersuchungsgebietes mit seinen Abmessungen ist in Bild II.3.15 zu sehen.

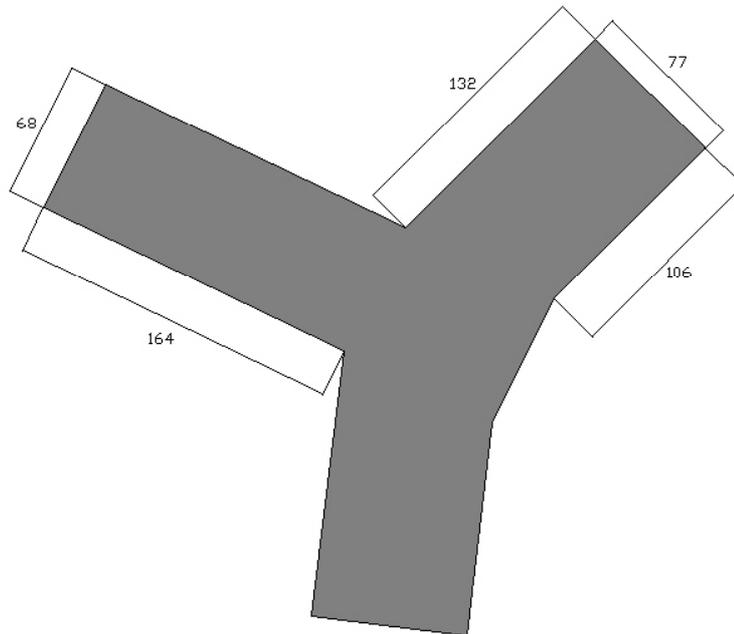


Bild II.3.15: Grundriss der Konfiguration Pikozone; Angaben sind in [m]

Eine dreidimensionale Darstellung der in diesem Abschnitt zu untersuchenden Konfiguration ist in Bild II.3.16 abgebildet.

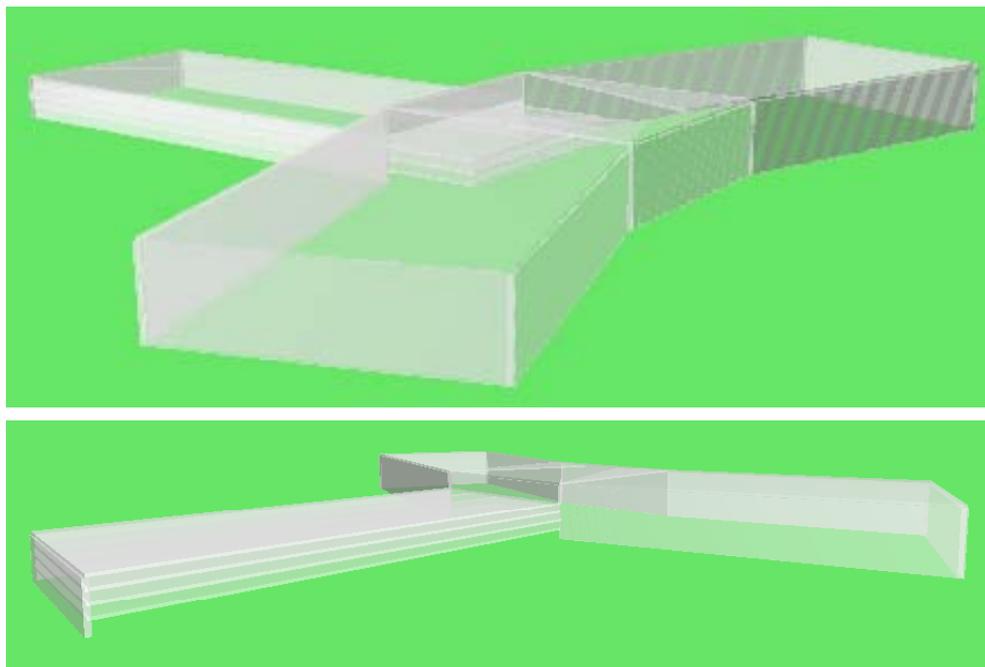


Bild II.3.16: Pikozone 3D

Die Simulationsparameter für die Berechnung sind

- Sendeantenne: Kathrein K741573 (für Indoor-Versorgung ausgelegt)
- Sendeleistung: 5 W
- Sendefrequenz: 2140 MHz
- Azimut: 300° (bezogen auf die 0°-Nordrichtung, Uhrzeigerdrehsinn)
- Antennenhöhe: 21 m

In Bild II.3.17 ist die dreidimensionale Simulationsumgebung und der dazugehörige Standort der Basisstationsantenne zu sehen. Die Simulationen werden mit allen Programmen in der Art durchgeführt, dass eine flächige Immissionsverteilung in einer Höhe von 1,7 m über Grund und mit einer Auflösung von 1 m zwischen den zu berechnenden Punkten berechnet wird.

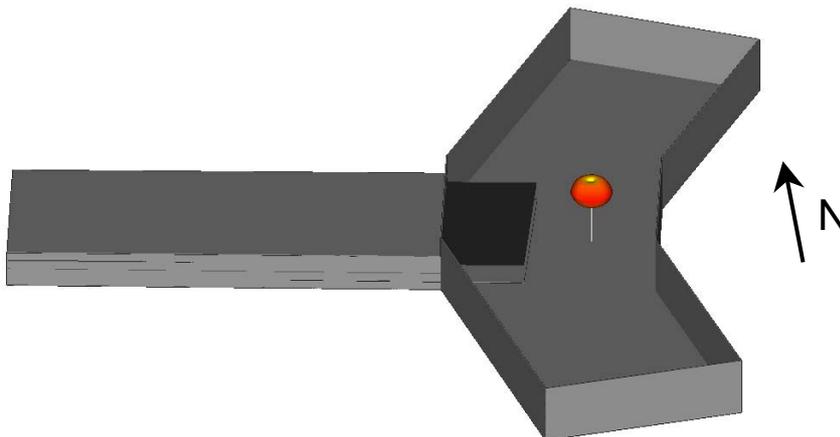


Bild II.3.17: Pikozone mit Basisstation

In folgendem Bild ist das Simulationsergebnis zu sehen, das mit dem Programm EFC-400 berechnet wurde. Der Standort der Basisstation ist mit BS gekennzeichnet. Darüber hinaus sind 4 Vergleichsgebiete dargestellt, in denen der Feldstärkewert mit den Resultaten der anderen Softwarepakete verglichen wird. Sie wurden so gewählt, dass sowohl LOS- als auch NLOS-Situationen betrachtet werden. Die Simulation wurde mit dem so genannten Multireflexionslevel 4 durchgeführt, das gleichbedeutend damit ist, dass insgesamt zwischen Sendepunkt und Empfangspunkt bis zu 4 Reflexionen berücksichtigt werden. Da dieses neue Feature gerade erst integriert wurde, ist hierzu noch anzumerken, dass es noch nicht auf Berechnungsgeschwindigkeit optimiert wurde, so dass sich die Rechenzeit noch verkürzen wird. Darüber hinaus wurde mit einer Wanddämpfung von 4 dB und einem Reflexionsfaktor von 40 % gerechnet, um die Materialwerte aus den anderen Simulationen anzunähern (vgl. Abschnitt II.3.1).

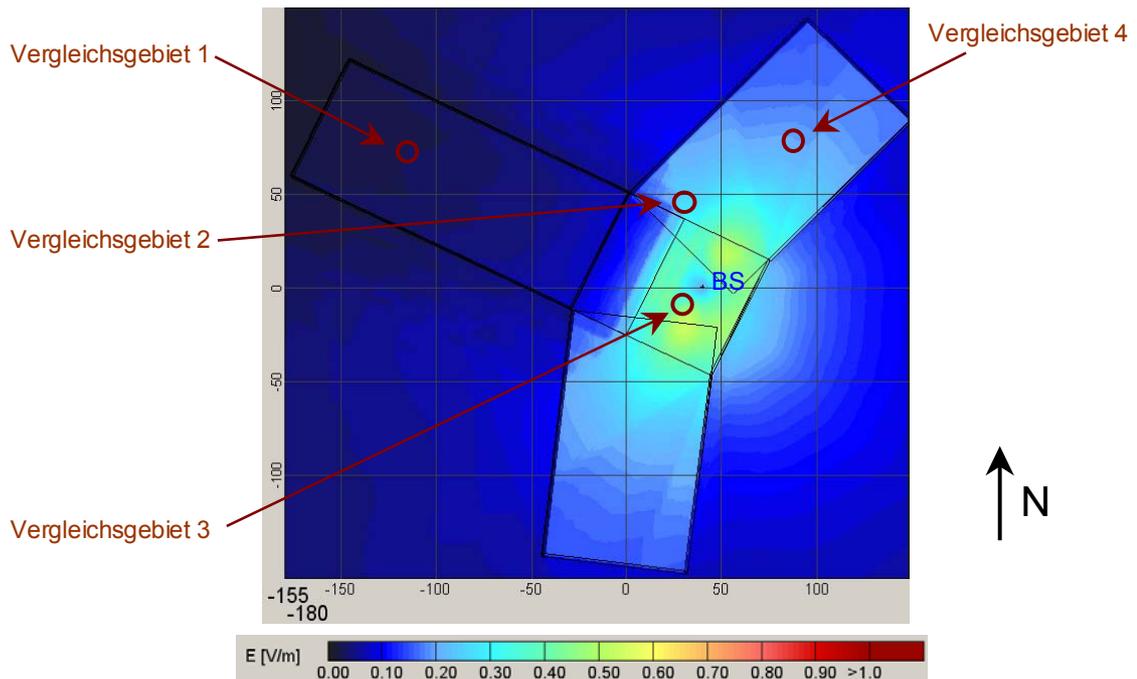


Bild II.3.18: Simulationsergebnis mit EFC-400, Multireflexionslevel 4

Mit dem Softwarepaket Quickplan kann keine Berechnungen innerhalb von Gebäuden durchgeführt werden, so dass hier eine Ergebnisdarstellung entfällt.

In Bild II.3.19 ist das Simulationsergebnis zu sehen, das mit Winprop berechnet wurde. Es sind wiederum die Lage der Basisstation und die 4 Vergleichsgebiete dargestellt. Beim Vergleich der Absolutwerte ist die unterschiedliche Farbskalierung zu berücksichtigen.

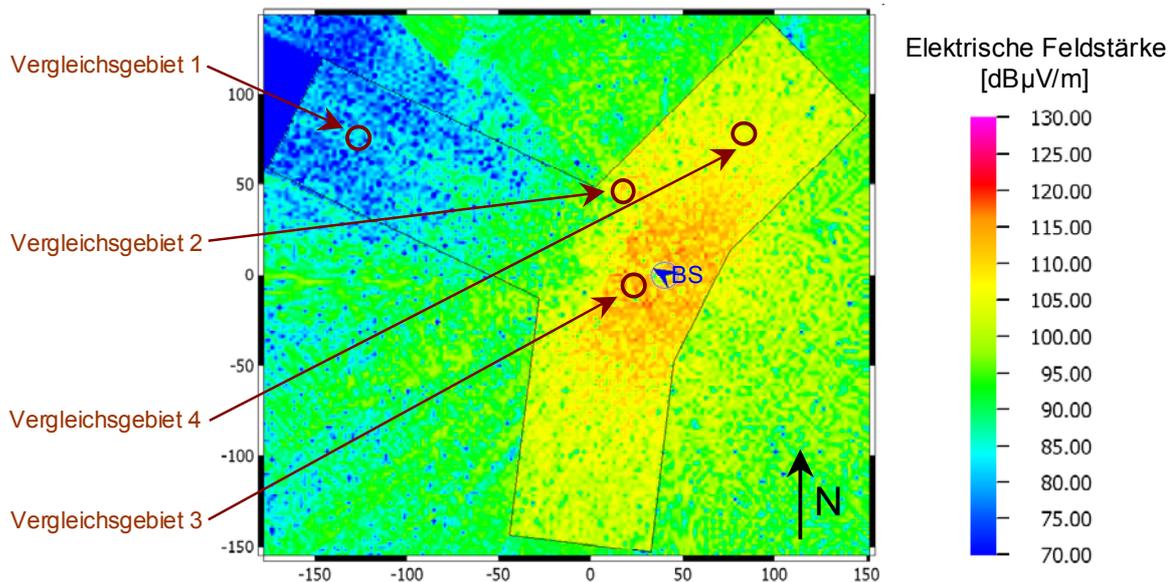


Bild II.3.19: Verteilung der elektrischen Feldstärke, Winprop

In Bild II.3.20 ist das Simulationsergebnis in analoger Weise zu sehen, das mit Wireless Insite berechnet wurde.

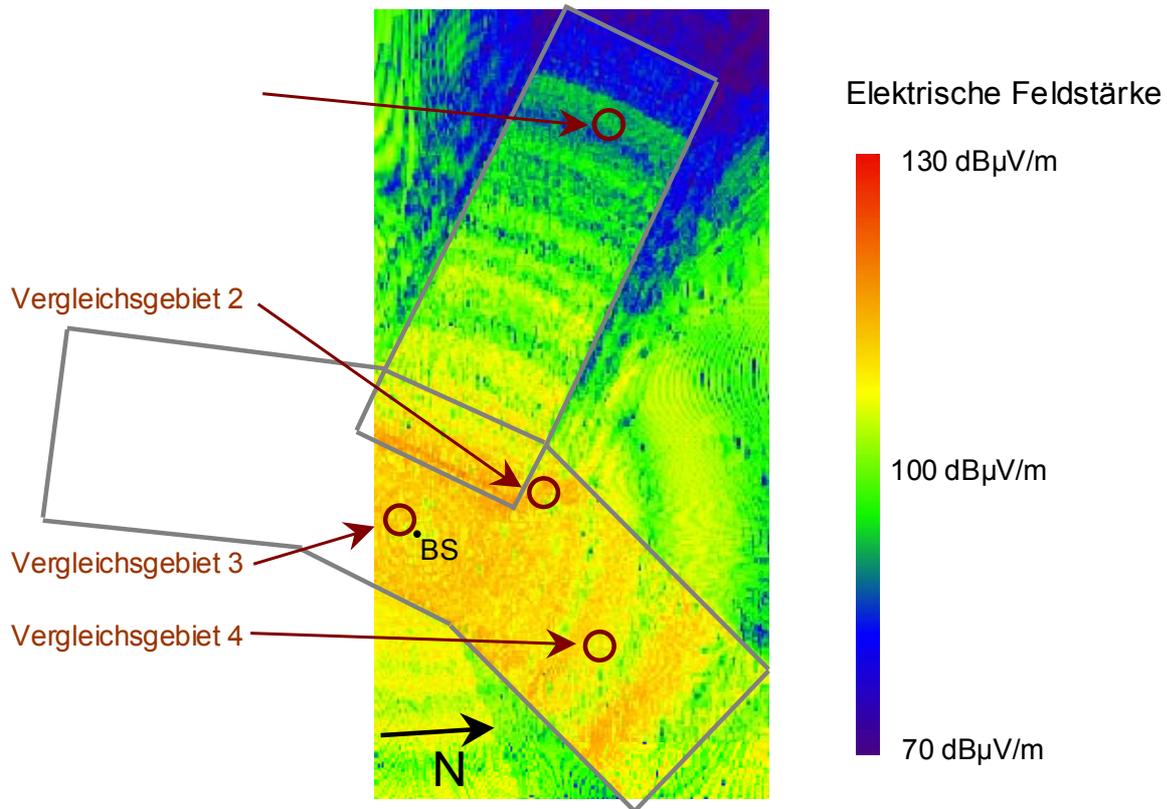


Bild II.3.20: Verteilung der elektrischen Feldstärke, Wireless Insite

Zur Berechnung mit Wireless Insite ist anzumerken, dass nicht die gesamte Fläche mit der hier verwendeten Auflösung berechnet werden konnte, da hierbei die Auslagerungsdatei so groß wurde, dass die Simulation mit einer Fehlermeldung automatisch gestoppt wurde. Dies ist auch bei der Gegenüberstellung der Rechenzeiten zu beachten.

Im folgenden werden die Simulationsergebnisse der einzelnen Programme in den Vergleichsgebieten gegenübergestellt. Durch die unterschiedliche Art und Weise des Einbindens von Gebäuden, der Erdoberfläche usw. und der Tatsache, dass nicht in allen Programmen die Phaseninformation berücksichtigt werden, macht es an dieser Stelle keinen Sinn, den Vergleich der berechneten Immission nur punktuell durchzuführen. In Analogie der bei den Messungen präferierten Schwenkmethode zur Ermittlung des örtlichen Maximums (siehe Kapitel II.4) wird hierzu die Feldstärke nicht an einem einzelnen Punkt verglichen, sondern es wird der maximale Feldstärkewert in einem Bereich von ca. 2 m x 2 m herangezogen. Darüber hinaus werden die Berechnungsergebnisse auch mit den Resultaten der Berechnungsmethode „Freiraumausbreitung inklusive eines Zuschlages von 3 dB“ verglichen. Diese Simulationen wurden mit dem Programm Fieldview durchgeführt. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass diese Art der Berechnung generell natürlich auch mit den anderen betrachteten Programmen ohne weiteres möglich ist. Im folgendem Bild sind nun die berechneten Feldstärken an den insgesamt 4 Vergleichsgebieten zueinander in Beziehung gesetzt.

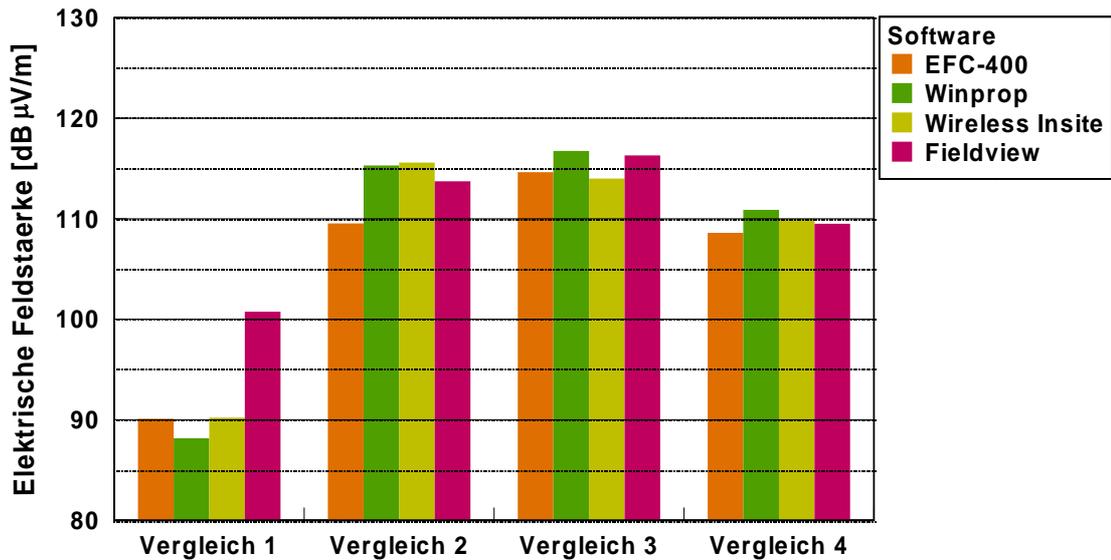


Bild II.3.21: Vergleich der Simulationsergebnisse

Aus Bild II.3.21 ist deutlich zu erkennen, dass in der NLOS-Situation (Vergleich 1) die „reine Freiraumausbreitung + 3dB“ den Feldstärkewert der anderen Programme deutlich überschreitet. Wie auch schon in [BOR 05] liefert diese Methode aber bei LOS-Situationen vergleichbare Werte. Die Schwankungsbreiten der Messergebnisse liegen bei der hier betrachteten Konfiguration bei maximal 13,6 dB und minimal 2,3 dB. Bei Vernachlässigung der Berechnungsergebnisse von Fieldview liegen diese Werte bei maximal 6 dB und minimal 2 dB.

In der folgenden Tabelle sind die Simulationszeiten für das hier betrachtete Szenario dargestellt. Hierbei ist zu beachten, dass mit einer Auflösung von 1 m in den Programmen gerechnet wurde. Darüber hinaus bleibt festzuhalten, dass oftmals der physikalische Arbeitsspeicher von 1 GB überschritten wurde, was auch in einer längeren Berechnungszeit resultierte.

EFC-400	Winprop	Wireless Insite	Fieldview
~ 8 h	~9 h	~ 10 h	~ 1 min

Tabelle II.3.5: Simulationszeit der einzelnen Programme für obiges Szenario

Es ist aus Tabelle II.3.5 kein gravierender Unterschied in den Programmlaufzeiten zu erkennen (Ausnahme: Fieldview). Dennoch ist aber zu beachten, dass durch das Multireflexionslevel 4 (Zeit kursiv, da noch nicht geschwindigkeitsoptimiert) die Berechnungszeit von EFC-400 deutlich ansteigt. Zum Vergleich kann hier eine Berechnungszeit von ca. 1 Stunde für die gleiche Simulation mit Berücksichtigung von nur einer Reflexion angegeben werden. Hinzukommend ist anzumerken, dass mit Wireless Insite die Immissionsverteilung nicht im gesamten Simulationsraum berechnet werden konnte (s.o.).

II.3.3 Konfiguration 2: Basisstation auf einem Haus

Bei der nun folgenden Konfiguration befindet sich eine Basisstation auf einem Haus und es wird die Immissionsverteilung in einer darunter liegenden Wohnung bestimmt. Eine dreidimensionale Darstellung ist in Bild II.3.22 zu sehen.

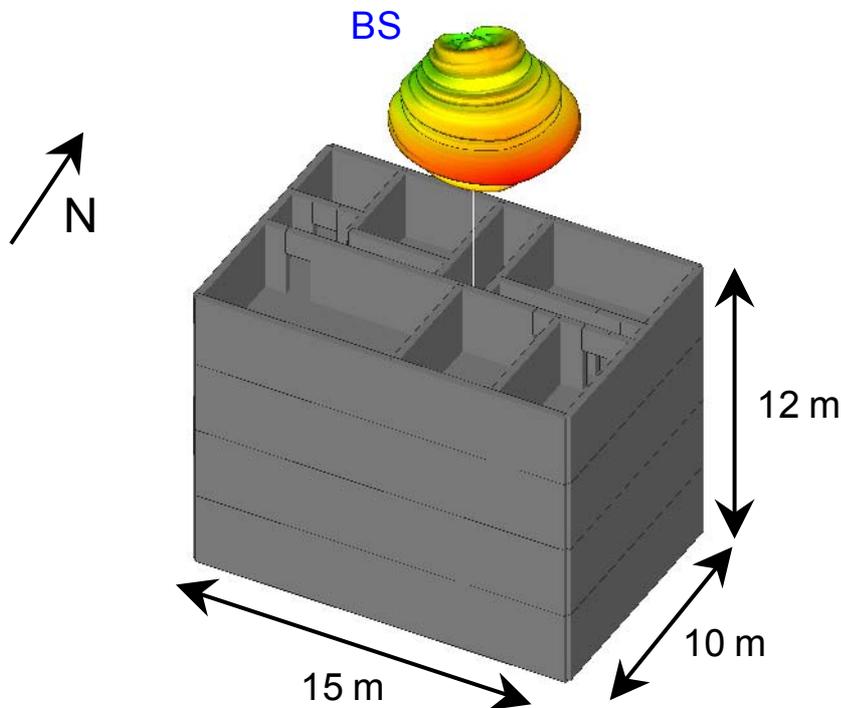


Bild II.3.22: Konfiguration: Basisstation auf einem Haus und Bestimmung der Immissionsverteilung in einer darunter liegenden Wohnung

Die der Simulation zu Grunde liegenden anlagenseitigen Parameter sind folgende:

- Sendeantenne: Kathrein K742264
- Sendeleistung: 8 W
- Sendefrequenz: 2140 MHz
- Antennenhöhe: 20 m
- Azimut: 135° (bezogen auf die 0°-Nordrichtung, Uhrzeigerdrehsinn)
- Downtilt: 3°

Im folgenden Bild ist die vertikale Abstrahlcharakteristik der hier verwendeten Mobilfunkantenne mit der Bezeichnung K742264 zu sehen. Sie wurde speziell zu Studienzwecken für dieses Szenario ausgewählt, da sie einen ausgeprägten Nebenzipfel nach unten aufweist.

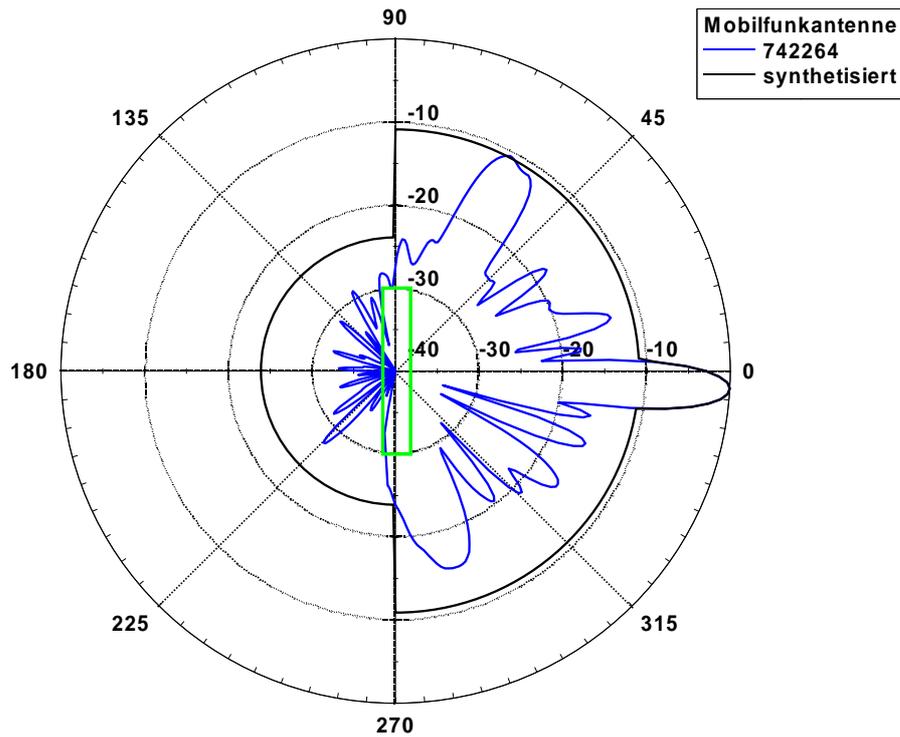


Bild II.3.23: Vertikale Abstrahlcharakteristik der Mobilfunkantenne K742264 bei einem elektrischen Downtilt von 3° und das zugehörige synthetisierte Diagramm

Das Simulationsergebnis von EFC-400 ist in Bild II.3.24 auf der linken Seite in dreidimensionaler und rechts in zweidimensionaler Form dargestellt. Es ist deutlich der Einfluss durch den ausgeprägten Nebenzipfel zu erkennen. Darüber hinaus sind analog zum vorangegangenen Beispiel drei Vergleichsgebiete eingezeichnet, deren Immissionswert mit den weiteren Softwarepaketen in Beziehung gesetzt wird.

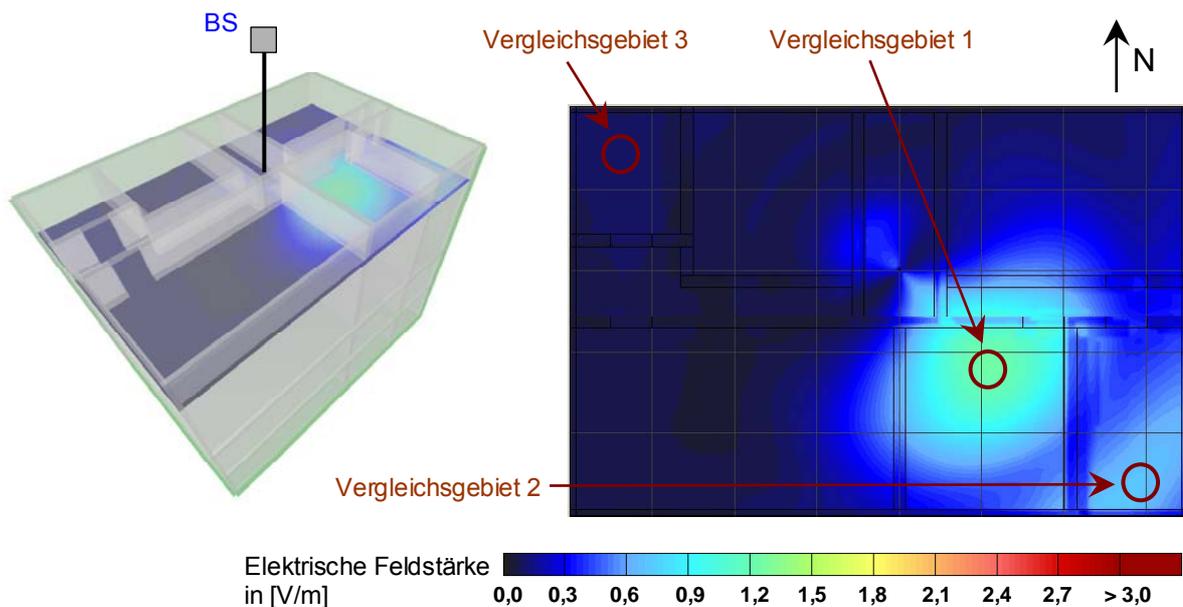


Bild II.3.24: Simulationsergebnis mit EFC-400

Im folgenden Bild ist in zweidimensionaler Darstellung das Simulationsergebnis von Winprop zu sehen.

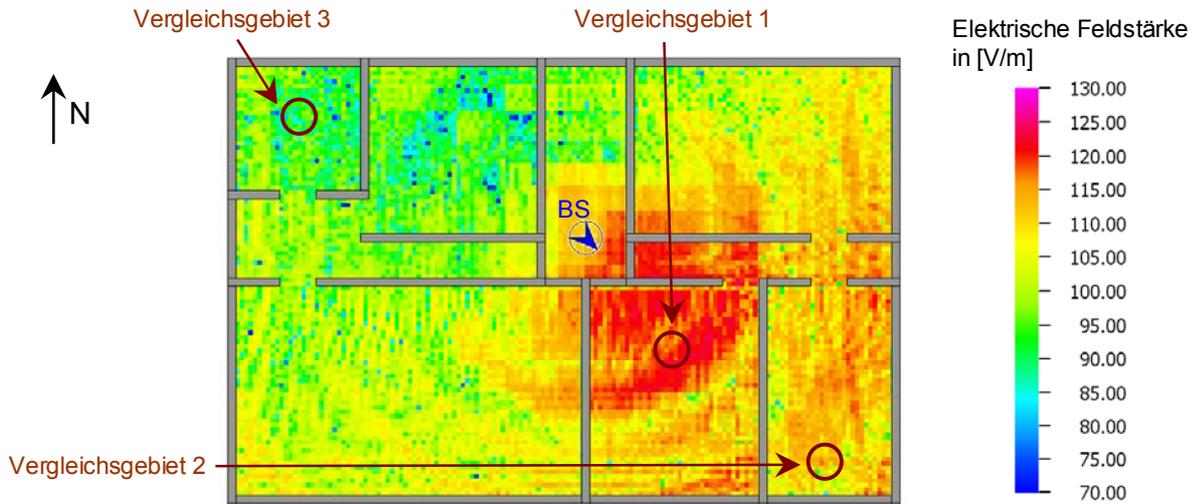


Bild II.3.25: Simulationsergebnis mit Winprop

Analog zu den vorangegangenen Beispielen ist in Bild II.3.26 die flächige Immissionsverteilung zu sehen, die mit Wireless Insite berechnet wurde.

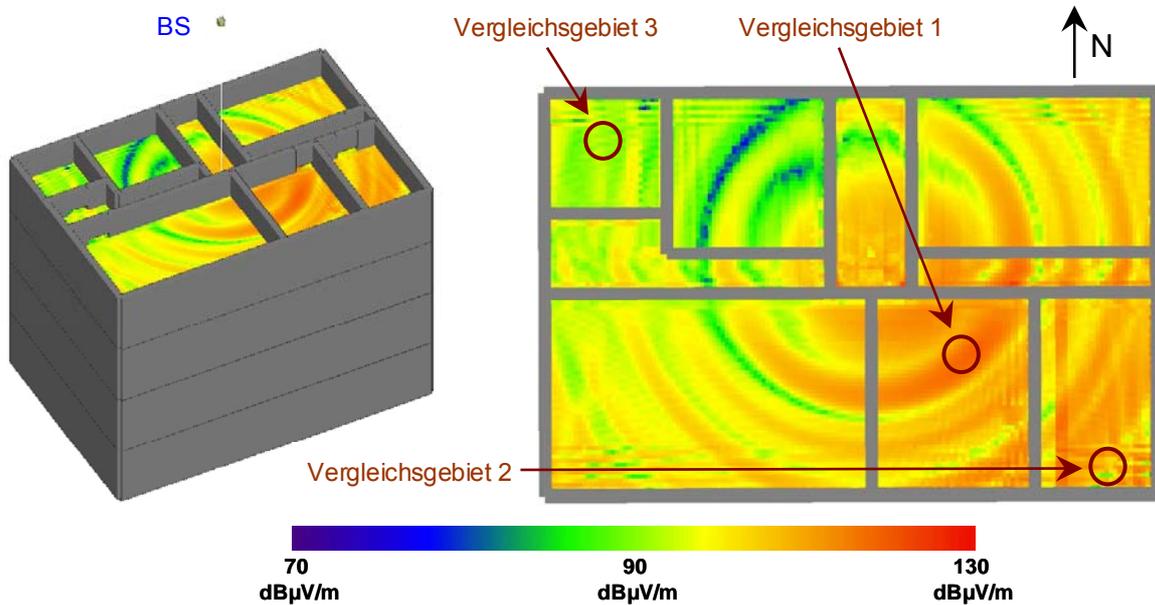


Bild II.3.26: Simulationsergebnis mit Wireless Insite (3D und 2D)

Wie oben bereits angesprochen, wurden in diesem Simulationsbeispiel drei Vergleichsgebiete in unterschiedlichen Räumen gewählt, in denen der Immissionswert der drei hier betrachteten Softwarepakete miteinander verglichen wird. Zusätzlich wurde wie im vorangegangenen Beispiel auch mit Fieldview gerechnet. Die Gesamtübersicht über die einzelnen Berechnungsergebnisse ist im anschließenden Bild zu sehen.

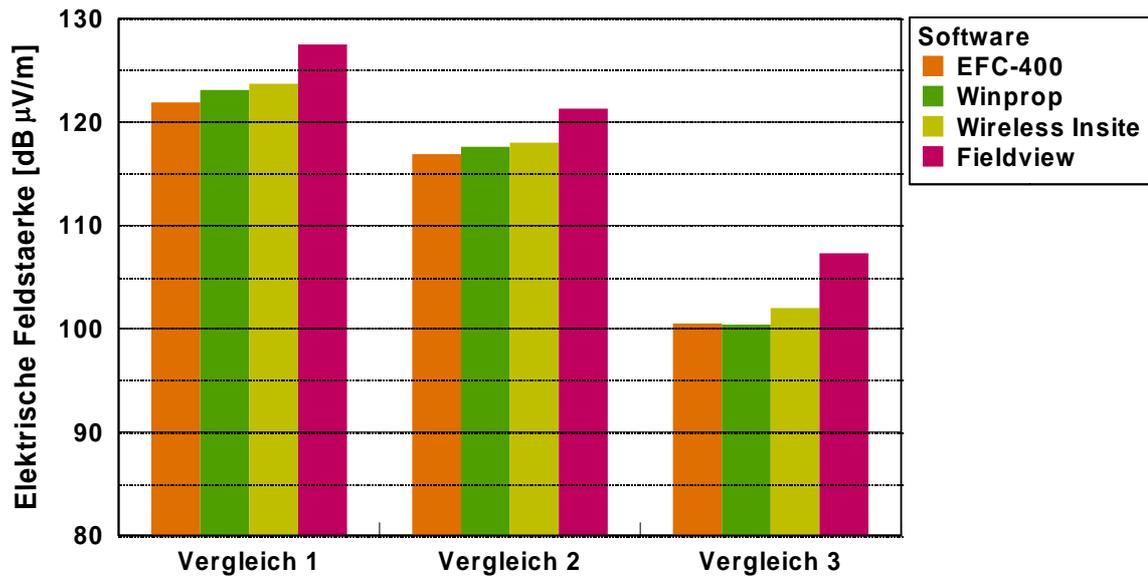


Bild II.3.27: Gesamtübersicht über die Ergebnisse

Aus Bild II.3.27 ist deutlich zu erkennen, dass die Methode „reine Freiraumausbreitung + 3 dB“ die Feldstärkewerte der anderen Programme überschreitet. Dies ist durch die in allen drei Vergleichsgebieten vorliegende NLOS-Situation und der damit verbundenen Dämpfung durch die Wände und Decken zu erklären.

Die Schwankungsbreiten der Messergebnisse liegen bei der hier betrachteten Konfiguration bei maximal 6,9 dB und minimal 4,4 dB. Bei Vernachlässigung der Berechnungsergebnisse von Fieldview liegen diese Werte bei maximal 1,8 dB und minimal 1,1 dB.

Im Anschluss werden nun erneut die Simulationszeiten der einzelnen Programme für diese hier untersuchte Konfiguration betrachtet. Alle Berechnungen wurden zur besseren Vergleichbarkeit mit einer Auflösung von 0,25 m durchgeführt.

EFC-400	Winprop	Wireless Insite	Fieldview
~ 1 h	~ 1 h	~ 1,5 h	~ 1 min

Tabelle II.3.6: Simulationszeit der einzelnen Programme für obiges Szenario

Zu beachten ist bei Winprop wie oben bereits angesprochen, dass sich die Simulationszeit aus der Zeit für das Preprocessing im Programmmodul „Wallman“ und der Immissionssimulation im Programmmodul „ProMan“ zusammensetzt. Die Simulation mit dem Programm EFC-400 wurden mit einem Multireflexionslevel von 3 durchgeführt. Da diese Option zum Zeitpunkt der Simulation noch neu und nicht geschwindigkeitsoptimiert war, wird sich in zukünftigen Versionen die Rechenzeit für dieses Szenario noch reduzieren. Insgesamt weisen aber alle Programme bezüglich der Simulationszeiten keinen gravierenden Unterschiede auf (Ausnahme: Fieldview).

II.3.4 Konfiguration 3: Stadtgebiet

In der nun untersuchten Konfiguration wird ein Stadtgebiet mit einer Abmessung von ca. 1 km x 1 km betrachtet. Hierzu wurde hinsichtlich Gebäudedaten und Geländedaten nach der in Abschnitt II.3.1.1 und Abschnitt II.3.1.2 beschriebenen Vorgehensweise für die verschiedenen Softwarepakete verfahren. Die anlagenseitigen Simulationsparameter sind folgende:

- Sendeantenne: Kathrein K742212
- Sendeleistung: 20 W
- Sendefrequenz: 2140 MHz
- Antennenhöhe: 16 m
- Azimut: 150° (bezogen auf die 0°-Nordrichtung, Uhrzeigerdrehsinn)
- Downtilt: 3°

Darüber hinaus wurden die Simulationen in allen Softwarepaketen auf einer Ebene von 1,7 m über Grund durchgeführt. Die Konfiguration ist in Bild II.3.28 zu sehen.

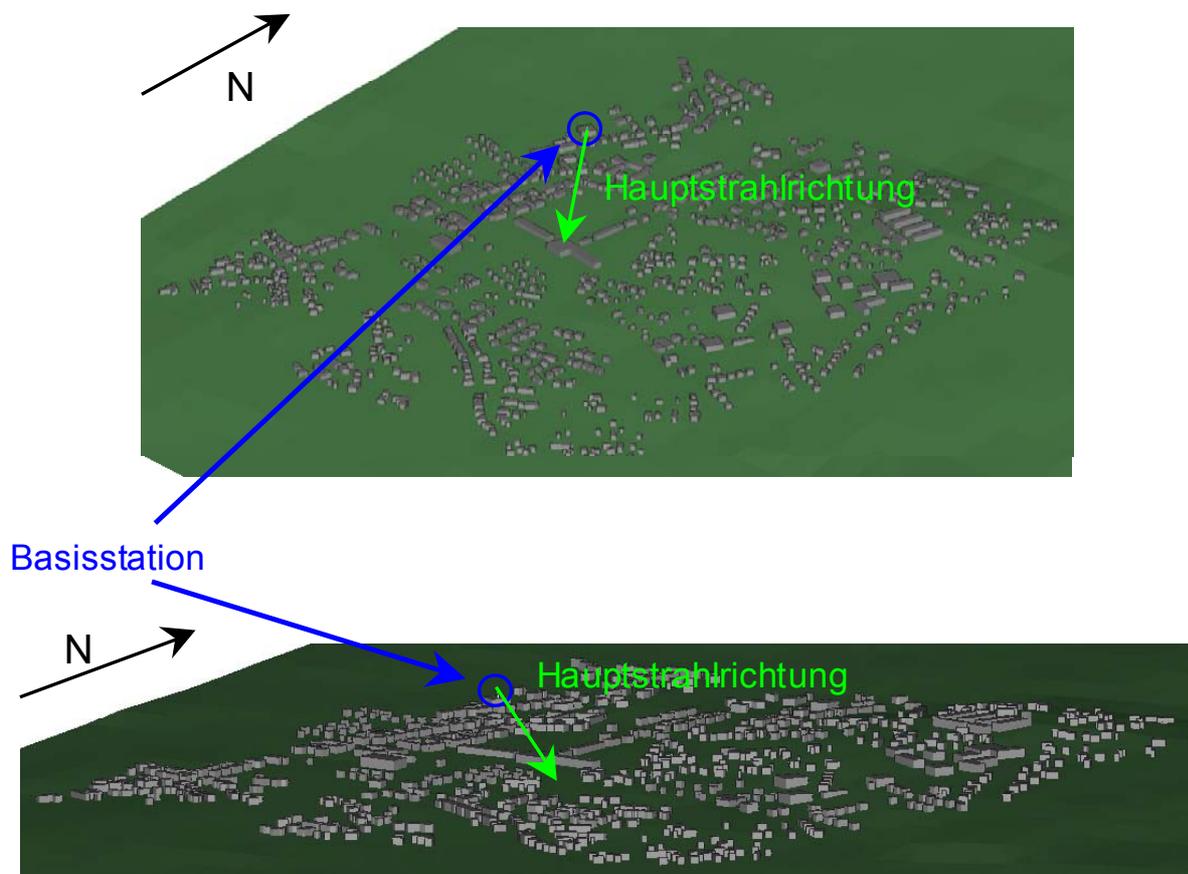


Bild II.3.28: Konfiguration für die Simulationen

Zunächst ist in Bild II.3.29 das Simulationsergebnis von EFC-400 flächig dargestellt. Zur besseren Orientierung ist der Standort der Basisstation mit BS gekennzeichnet. Darüber hinaus sind wiederum zwei Vergleichsgebiete eingezeichnet, deren Immissionswert aus den Simulationen mit den verschiedenen Softwarepaketen im Anschluss miteinander in Beziehung gesetzt wird. Das Vergleichsgebiet 1 liegt hierbei in direkter Sicht zur Anlage und kann durch einen freien Platz mit ringsum angeordneten Häusern charakterisiert werden. Das Vergleichsgebiet 2 liegt deutlich weiter entfernt und hebt sich durch eine NLOS-Situation hervor.

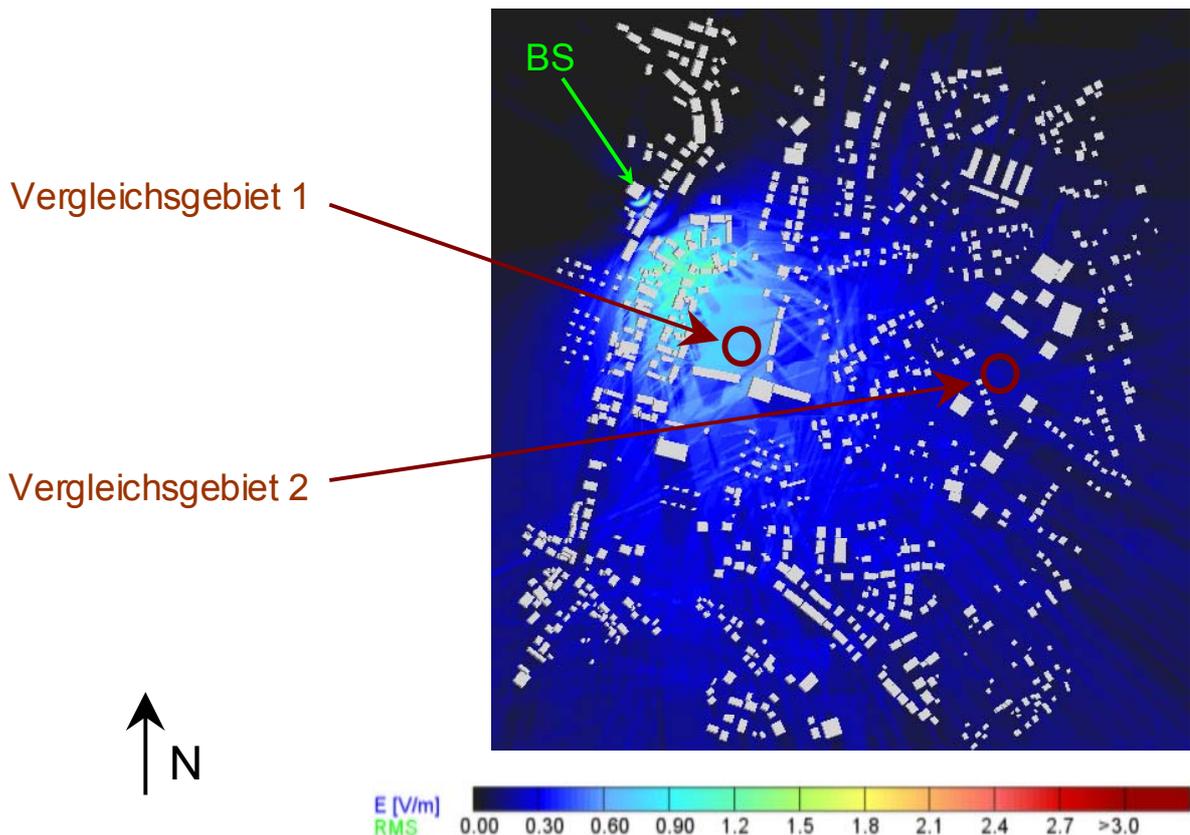


Bild II.3.29: Simulationsergebnis von EFC-400

In analoger Weise ist in Bild II.3.30 das Simulationsergebnis von Quickplan zu sehen. Hierbei sind die zwei bereits in Abschnitt II.3.1.2 beschriebenen Berechnungsmethoden zu unterscheiden. Wohingegen die farbig dargestellte flächige Immissionsverteilung mit der so genannten Oberflächenberechnung durchgeführt wurde, bei der in 2 m Höhe über Grund nur der stärkste einfallende Pfad berücksichtigt wird, sind im Gegensatz dazu in den Vergleichsgebieten eine Vielzahl von Testpunkten in 1,7 m Höhe über Grund verteilt, deren maximaler Immissionswert im folgenden für den Vergleich herangezogen wird. Im linken Bild sind Ausbreitungswege zu einem Empfangspunkt im Vergleichsgebiet 1 und im rechten Bild zu einem Empfangspunkt im Vergleichsgebiet 2 als dünne weiße Linien zu sehen.

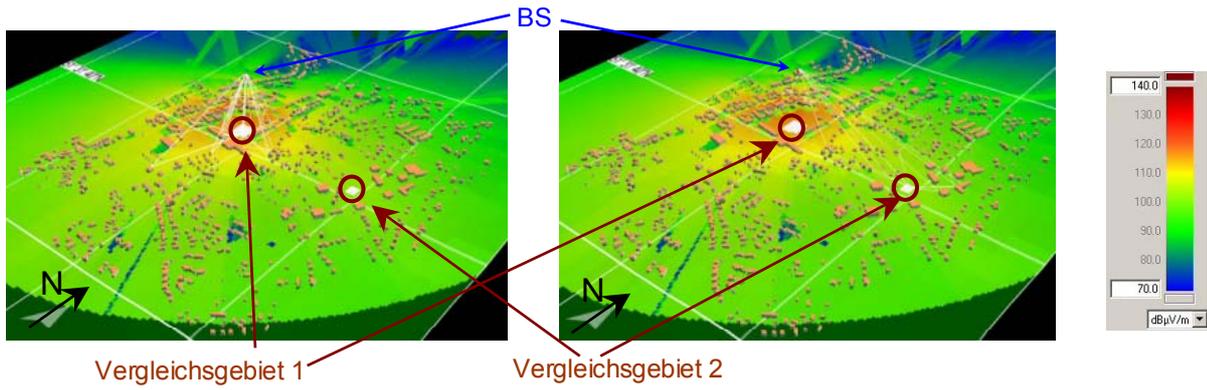


Bild II.3.30: Simulationsergebnis von Quickplan

Analog zu den Darstellungsweisen der vorangegangenen Berechnungsergebnisse sind in den folgenden zwei Bildern die Ergebnisse der Simulationen von Winprop und Wireless Insite dargestellt.

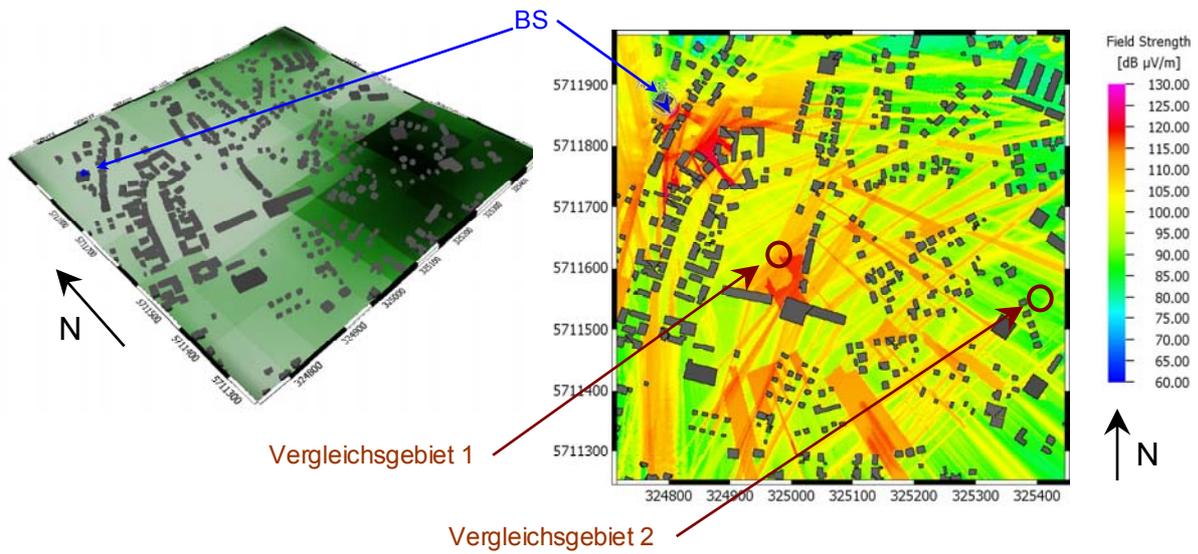


Bild II.3.31: Simulationsergebnis von Winprop

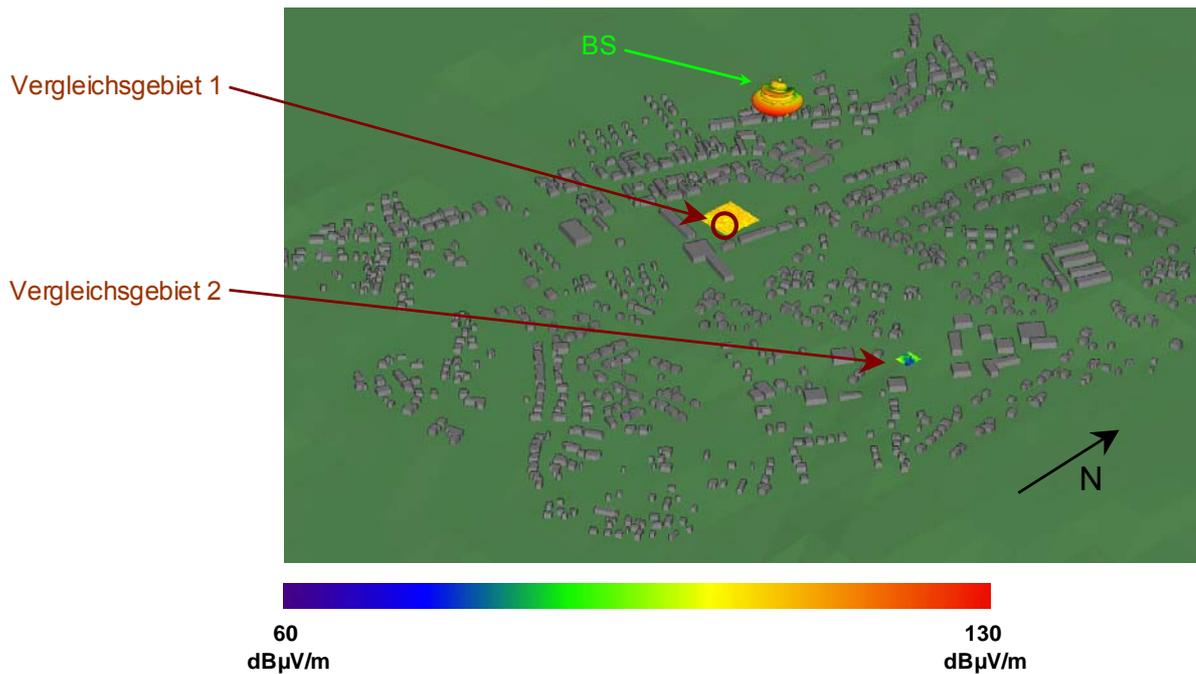


Bild II.3.32: Simulationsergebnis von Wireless Insite

Auffällig ist an dieser Stelle, dass das Simulationsergebnis von Wireless Insite im Gegensatz zu den anderen Programmen keine flächige Verteilung der Immission liefert. Dieses liegt in der Rechenzeit begründet und wird im Anschluss noch näher betrachtet.

In Analogie zu den vorher betrachteten Konfigurationen ist in Bild II.3.33 der Vergleich der berechneten Immissionen in den zwei Vergleichsgebieten getrennt nach dem jeweiligen Softwarepaket zu sehen.

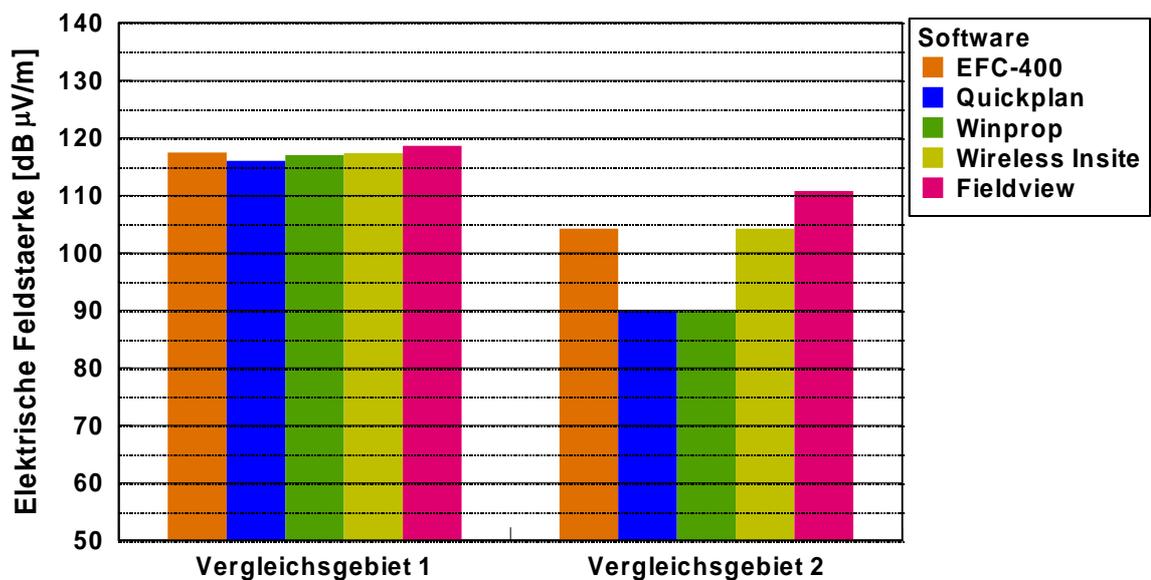


Bild II.3.33: Vergleich der Simulationsergebnisse der verschiedenen Softwarepakete in den betrachteten Vergleichsgebieten

Aus Bild II.3.33 lässt sich zunächst einmal festhalten, dass alle Softwarepakete in Vergleichsgebiet 1 quasi identische Ergebnisse liefern. Dies korrespondiert mit den Ergebnissen aus [BOR 05]. Die Schwankungsbreiten für die Berechnungsergebnisse in diesem Gebiet liegen bei 2,6 dB bzw. 1,4 dB bei Vernachlässigung von Fieldview.

In Vergleichsgebiet 2 liegen die Schwankungsbreiten der Ergebnisse bei der hier betrachteten Konfiguration bei maximal 20,8 dB bzw. 14,2 dB bei Vernachlässigung von Fieldview.

Auffällig ist hingegen der große Unterschied in den Immissionsprognosen zwischen EFC-400 und Wireless Insite einerseits und Quickplan und Winprop andererseits im Vergleichsgebiet 2. An dieser Stelle sei nochmals festgehalten, dass sich dieses Gebiet in einer NLOS-Situation zur Basisstation befindet. Die Erklärung für diese deutliche Differenz lässt sich aus folgendem Bild erkennen.

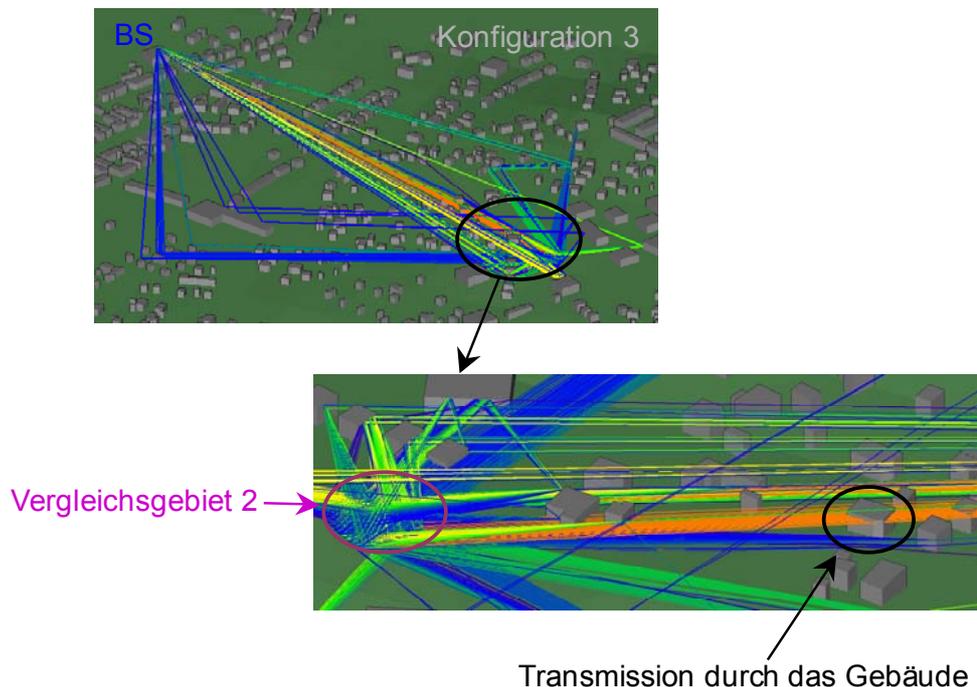


Bild II.3.34: Transmission der elektromagnetischen Strahlung durch ein Gebäude

In Bild II.3.34 ist die in diesem Abschnitt betrachtete Konfiguration zu sehen. Die bunten Linien symbolisieren die berechneten Ausbreitungspfade zu allen Empfangspunkten, die sich in Vergleichsgebiet 2 befinden. Darüber hinaus steht die Farbe dafür, wie groß die empfangene Leistung über den jeweiligen Pfad ist. Es ist im rechten unteren Bild zu erkennen, dass der Pfad, der eine Transmission durch ein Gebäude hindurch nimmt, die im Empfangsgebiet größte Immission verursacht. Da sowohl in Wireless Insite als auch in EFC-400 die Transmission durch die Gebäude in der Berechnung Berücksichtigung findet, ist die gute Übereinstimmung der von beiden Programmen prognostizierten Immissionswerte erklärbar. Im Gegensatz dazu wird die Transmission durch die Gebäude sowohl bei Quickplan als auch bei Winprop nicht berücksichtigt, da dies nach Angabe eines Herstellers einen in der Realität eher untergeordneten Effekt darstellt. Da in obigem Beispiel Dämpfungswerte von nur ca. 4 dB angenommen wurden, ist der deutliche Unterschied zwischen den Simulationsergebnissen zu erklären.

Vor diesem Hintergrund ist auch nochmals das Ergebnis von Fieldview bzw. der Methode „Freiraumausbreitung + 3 dB“ zu diskutieren. In der Realität würde bei Vernachlässigung der Transmission durch die Gebäude bzw. höherer Gebäudedämpfung der prognostizierte Wert erheblich von dem der anderen Softwarepakete abweichen.

Aus den bisherigen Simulationen lassen sich folgende Punkte ableiten. Die Methode „Reine Freiraumausbreitung + 3 dB“ weist auch bei UMTS unter der Bedingung einer LOS-Situation ähnliche Simulationenwerte wie die anderen hier untersuchten Programmen auf. In NLOS-Situationen liegen die Ergebnisse dieser reinen Freiraum-Methode allerdings oberhalb der anderen Softwarepakete. Je weiter weg sich ein Betrachtungsort von der Basisstation befindet, desto mehr wird auch die Überbewertung steigen. Dies wird im Arbeitspaket 3 aber noch mit Messungen an realen Szenarien überprüft.

In Tabelle II.3.7 sind die einzelnen Simulationszeiten der Softwarepakete für die hier betrachtete Konfiguration zu sehen.

EFC-400	Quickplan	Winprop	Wireless Insite	Fieldview
~ 20 h	~ 18 h	~ 20 h	~ 24 h	~ 1 min

Tabelle II.3.7: Simulationszeit der einzelnen Programme für die hier betrachtete Konfiguration

Auf den ersten Blick erscheinen die Zeiten mehr oder weniger einheitlich (ohne Fieldview). Dennoch ist hierbei zu beachten, dass bei Wireless Insite nicht das gesamte Stadtgebiet, sondern lediglich ein kleiner Ausschnitt berechnet wurde. Auch bei Winprop wurde die zu berechnende Fläche reduziert. Bei Quickplan setzt sich die Simulationszeit aus Oberflächenberechnung und Testpunkt-Berechnung zusammen.

II.3.5 Fazit

Es wurden verschiedene Softwarepakete und Eingabeparameter zur Berechnung der Immissionsverteilung von UMTS-Basisstationen nicht nur in der unmittelbaren Umgebung der Sendeanlage, sondern im gesamten Versorgungsbereich einer Zelle untersucht.

Bezüglich der Eingabeparameter kann zusammenfassend festgehalten werden, dass die bereits in [BOR 05] entwickelte Synthese eines Antennendiagramms zur Kompensation der Abhängigkeit von Frequenz, Downtilt und Montageumgebung direkt übernommen werden kann. Darüber hinaus hat sich gezeigt, dass markante Unterschiede in den Abstrahlcharakteristiken von GSM und UMTS in unterschiedlich breiten Hauptkeulen und unterschiedlichem Gewinn liegen. Bezogen auf die generelle Immissionssituation lässt sich an dieser Stelle schlussfolgern, dass die Wahrscheinlichkeit, sich in direkter Nähe einer Basisstation in Hauptstrahlrichtung zu befinden, bei einer GSM 900-Anlage höher ist als bei einer UMTS-Anlage. Für Messpunkte in Hauptstrahlrichtung ist allerdings damit zu rechnen, dass bei gleicher eingespeister Leistung aufgrund des höheren Gewinns die Immission durch UMTS größer sein wird als durch GSM 900.

Die multifrequenzielle Nachbildung der Feldquelle ist aufgrund des enormen Mehraufwandes nicht zu empfehlen. Von den hier verwendeten Softwarepaketen wäre eine Realisierung nur

mit Wireless Insite möglich. Dieses stellt die Informationen über Amplitude und Phase am Empfangsort für jede berechnete Frequenz zur Verfügung. Die Einzelresultate müssen anschließend vom Anwender eigenständig in der Art weiter verarbeitet werden, dass diese zu einer kohärenten Überlagerung zusammengefasst werden können. Insgesamt hat die Bandbreite von 5 MHz einen homogenisierenden Einfluss auf die Feldverteilung, so dass die Schwankungsbreite zwischen Maximal- und Minimalwert innerhalb eines betrachteten Volumens kleiner wird als bei einer Simulation mit nur einer Frequenz. Wird nun allerdings der erhebliche Mehraufwand bei der Berechnung und der nachträgliche Aufwand der kohärenten Überlagerung in die Betrachtung mit einbezogen, so ist es für eine Berechnung unter Grenzwertüberprüfungsaspekten (Maximalwertsuche im Volumen) nicht zwingend erforderlich, die Feldquelle multifrequenziell nachzubilden. Denn hier liegt der prognostizierte Feldstärkewert bei einer Frequenz oberhalb des Wertes, der bei Überlagerung mehrerer Frequenzen auftritt.

Da das Simulationsgebiet nicht nur die direkte Senderumgebung, sondern eine gesamte Versorgungszelle umfasst, muss der Geländeverlauf auf jeden Fall in der Berechnung berücksichtigt werden. Darüber hinaus wurden Methoden vorgestellt, die es ermöglichen, auch die Vielzahl von Gebäuden in den betrachteten Softwarepaketen berücksichtigen zu können. In wie weit hierbei die angenommene einheitliche Höhe der Gebäude Unterschiede zwischen der berechneten und der realen Immissionsverteilung hat, wird beim Vergleich von berechneten und gemessenen Feldstärkewerten im Arbeitspaket 3 noch untersucht.

Darüber hinaus wird dieser Vergleich auch Aufschluss darüber geben, in wie weit es gerechtfertigt ist, die Transmission durch die Gebäude hindurch in der Berechnung zu vernachlässigen. Hier spielt eine geeignete Wahl der Materialparameter für Gebäudematerialien eine große Rolle.

Insgesamt zeigen die Vergleiche der Simulationsergebnisse (Maximalwerte in einer bestimmten Fläche) von den hier betrachteten Softwarepaketen keine gravierenden Unterschiede. Die Methode „Reine Freiraumausbreitung + 3 dB“ liefert gerade in Situationen mit direkter Sicht zur Sendeantenne annähernd die gleichen Ergebnisse wie die anderen hier betrachteten Programme. Es hat sich aber auch gezeigt, dass in Situationen, in denen keine direkte Sicht zur Sendeantenne herrscht, die Berechnungsergebnisse der anderen Programme wesentlich kleiner sind als die mit Freiraumausbreitung berechneten. Diese Punkte stellen jedoch im vorliegenden Fall, bei denen das gesamte Versorgungsgebiet und nicht nur die unmittelbare Umgebung betrachtet werden soll, die Mehrheit dar.

Dennoch scheinen zunächst alle Softwarepakete mit den gerade angesprochenen Einschränkungen der Methode „Reine Freiraumausbreitung + 3 dB“ an dieser Stelle geeignet, die Immissionsverteilung von UMTS-Sendeanlagen zu bestimmen, und werden somit im dritten Teil vorliegenden Projektes für den Vergleich zwischen Berechnung und Messung an ausgewählten Szenarien herangezogen. Zu beachten ist hierbei allerdings, dass Wireless Insite aufgrund des enormen Rechenaufwandes keine flächendeckende Immissionsverteilung im gesamten Versorgungsgebiet liefern kann und Quickplan ausschließlich für Outdoor-Szenarien geeignet ist.

II.4 Messverfahren zur Expositionsbestimmung bei UMTS-Sendeanlagen

II.4.1 Grundsätzliches

An ein Messverfahren zur korrekten Ermittlung der Immissionen durch UMTS-Sendeanlagen sind folgende Anforderungen zu stellen. Manche Anforderungen sind eng miteinander verknüpft, d.h. sie können nicht unabhängig voneinander erfüllt werden; andere sind gegenläufig.

Hohe Empfindlichkeit: Das Verfahren sollte idealerweise über eine solche Empfindlichkeit verfügen, dass Immissionen der Größe, wie sie im Versorgungsbereich von UMTS-Sendeanlagen vorliegen, noch darstellbar sind. Für eine qualitativ gute Verbindung ist eine Versorgungsfeldstärke von etwa 39 dB μ V/m (entsprechend 0,00009 V/m bzw. $2 \cdot 10^{-11}$ W/m²) vor dem Mobilgerät notwendig. Vor allem in der direkten Umgebung der Sender werden allerdings wesentlich höhere Feldstärken vorliegen. Der einschlägige Grenzwert zum Schutz der Allgemeinbevölkerung in dem durch UMTS belegten Downlink-Frequenzbereich beträgt etwa 156 dB μ V/m.

Selektivität: Das Messverfahren muss die von UMTS-Sendeanlagen ausgehenden Immissionen von anderen hoch- und niederfrequenten Immissionen (z.B. von GSM-Mobilfunkanlagen oder Rundfunk- und Fernsehsendern) trennen können, da bei vorliegender Aufgabenstellung nicht die kumulative Immission, sondern separat die der UMTS-Sendeanlagen ermittelt und untersucht werden soll. Hierfür wäre aufgrund der unterschiedlichen genutzten Frequenzbereiche eine Frequenzselektivität hinreichend. Außerdem ist es für eine exakte Hochrechnung auf den maximalen Betriebszustand (Grenzwertaspekt) sinnvoll, die Immissionen einer UMTS-Anlage von denen umliegender UMTS-Anlagen trennen zu können. UMTS-Anlagen unterschiedlicher Betreiber sind durch die Sendefrequenz separierbar; Anlagen ein und desselben Betreibers allerdings nur durch die so genannten Scramblingcodes.

Einbeziehung aller relevanter Anlagen: Die Gesamtimmission durch UMTS-Sendeanlagen an einem Messpunkt wird sich oftmals als Überlagerung aus den Einzelbeiträgen verschiedener, örtlich getrennter Mobilfunkanlagen zusammensetzen. Das Messverfahren muss in der Lage sein, die Immissionen durch alle Anlagen, die am Messpunkt einen relevanten Beitrag liefern, zu ermitteln und diese zu einer Gesamtimmission zusammenzufassen.

Grenzwertüberprüfung: Das Verfahren muss in der Lage sein, verlässliche Messwerte zu liefern, die direkt mit den normativen Grenzwerten verglichen werden können. Hierzu sind die in der jeweiligen Personenschutznorm festgelegten Bedingungen bezüglich Erfassung, Gültigkeit und Interpretation der Grenzwerte zu beachten.

Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung: Das Verfahren muss es ermöglichen, vom gemessenen Momentanwert der Immission auf denjenigen Wert bei maximaler Anlagenauslastung extrapolieren zu können. Laut der für Deutschland gültigen Regelungen [26. BImSchV] sind die Immissionen „bei höchster betrieblicher Anlagenauslastung“ zu ermitteln.

Praktikabilität: Das Messverfahren muss praktikabel und nicht nur für den Einsatz unter Laborbedingungen geeignet sein. Besonders berücksichtigt werden muss der Umstand, dass

die relevanten Messpunkte sich auch innerhalb von Wohnungen und nicht nur im Freien befinden können. Bezüglich der Praktikabilität müssen auch Aufwandsbetrachtungen berücksichtigt werden: Eine Messung, die an einem Messort mehrere Stunden in Anspruch nimmt, kann nicht mehr als praktikabel bezeichnet werden. Die „Bezahlbarkeit“ der Messung seitens des Auftraggebers ist ebenso Voraussetzung wie eine möglichst geringe zeitliche Störung der Anwohner am Messort.

Maximalwertsuche: Aufgrund der kleinstskalig schwankenden Immissionen vor allem in Räumen muss das Messverfahren in der Lage sein, mittels einer besonderen Methodik der Messdurchführung einen definierten Wert, möglichst den Maximalwert der vorliegenden Immission in einem räumlich ausgedehnten Messvolumen (z.B. Zimmer), zu ermitteln und als Ergebnis der Messung zu protokollieren. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Feldstärkevektor beliebig im Raum liegen kann; dieser muss bei der Messung korrekt erfasst werden.

Genauigkeit: Das Messverfahren muss hinreichend genau und die Messunsicherheit begrenzt sein, so dass sich eine verlässliche Aussage bezüglich des Abstandes der Messwerte zu den Grenzwerten machen lässt.

Reproduzierbarkeit: Das Messverfahren muss reproduzierbare Ergebnisse liefern, d.h. die Messergebnisse sollten bei Messungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten bzw. durch unterschiedliche Messinstitutionen nicht zu weit differieren, da sonst das Vertrauen in die Korrektheit der ermittelten Werte nicht mehr gegeben ist.

Dokumentation: Die Dokumentation der Ergebnisse hat so zu erfolgen, dass eine Nachvollziehbarkeit der Messungen gewährleistet ist.

Qualifizierung des Messpersonals: Wünschenswert wäre es ein Messverfahren derart zu finden, das nicht nur durch hoch qualifiziertes Fachpersonal im Bereich Hochfrequenzmesstechnik, sondern auch durch Kontroll- und Überwachungsorgane (z.B. Umweltbehörden, Strahlenschutzbehörden usw.) durchführbar ist. Allerdings ist hierbei aufgrund der sehr komplexen und nicht trivialen Problemstellung der Hochfrequenzmesstechnik unter Umständen mit Einschränkungen zu rechnen.

Zur Bestimmung der Exposition durch hochfrequente Felder von UMTS-Sendeanlagen existieren mehrere Verfahren, die völlig unterschiedliche Messprinzipien verwenden, was dazu führt, dass die dafür geeigneten Messgeräte sich bezüglich Funktionsweise, Leistungsfähigkeit und Preis sehr stark unterscheiden. Im ersten Teilbericht vorliegenden Projektes wurden bereits die grundlegenden Verfahren

- breitbandige,
- frequenzselektive (spektrale) und
- codeselektive Messung

vorgestellt und in ihren wesentlichen Vor- und Nachteilen diskutiert.

Breitbandige Verfahren ermitteln einen Gesamtwert für die Immission innerhalb eines durch das Messgerät festgelegten Frequenzbereiches, wobei nicht zugeordnet werden kann, wie sich die Immissionsanteile frequenzmäßig und damit auch emittentenbezogen aufteilen. Dadurch wird bei Vorhandensein mehrerer Signale in verschiedenen Frequenzbereichen die Bewertung mit den zugehörigen (teilweise frequenzabhängigen) Grenzwerten erschwert oder sogar unmöglich. Beispielsweise ist es in der Umgebung von Sendeanlagen, die mittels „Dualbandantennen“ sowohl GSM- als auch UMTS-Signale abstrahlen, mittels einer Breitbandmessung nicht möglich, zu unterscheiden, welchen prozentualen Anteil an der Gesamtexposition durch die UMTS-Signale generiert werden. Außerdem ist die Empfindlichkeit breitbandiger Messgeräte begrenzt, so dass sie im Regelfall nur in unmittelbarer Antennennähe, beispielsweise bei der Überprüfung zur Einhaltung gesetzlicher Grenzwerte, vernünftig verwendet werden können.

Demgegenüber kann durch den Einsatz frequenzselektiver Verfahren mit wesentlich größerer Empfindlichkeit ermittelt werden, welche Immissionen am Messort bei welcher Frequenz vorliegen. Durch die Frequenzinformation ist in vielen Fällen eine Zuordnung zur Quelle der Immission möglich. Allerdings senden bei UMTS alle Anlagen eines Betreibers auf derselben Frequenz (Gleichwellennetz), so dass hier keine emittentenbezogene Trennung möglich ist. Die zweite, in Deutschland für jeden Betreiber verfügbare Trägerfrequenz wird bei Bedarf zur Steigerung der Anlagenkapazität zusätzlich zur ersten Frequenz in Betrieb genommen.

Um die unterschiedlichen Anlagen eines Betreibers separieren zu können, müssen codeselektive Verfahren eingesetzt werden. Mit diesen ist es möglich, die Immission verschiedener Anlagen bzw. unterschiedlicher Sektoren anhand des verwendeten Scramblingcodes voneinander zu trennen. Ihre Empfindlichkeit liegt mindestens in der gleichen Größenordnung wie die der frequenzselektiven Erfassung. Außerdem ist es nur mit der codeselektiven Messung möglich, bei Anlagen, die sich im regulären Wirknetzbetrieb befinden, aus dem Messwert mittels eines Hochrechnungsfaktors auf die Immission bei höchster betrieblicher Anlagenauslastung zu schließen.

In den folgenden Kapiteln werden die drei oben genannten Messverfahren eingehend untersucht. Die korrekte Einstellung der wesentlichen Messparameter (z.B. Messgeschwindigkeit, Auflösebandbreite, Detektortyp) werden definiert. Zusätzlich wird angegeben, welchen Einfluss falsche oder nicht optimal gewählte Einstellparameter auf die Messergebnisse ausüben. Weiterhin wird untersucht, bei welchen Aufgabenstellungen und unter welchen Bedingungen die einzelnen Messverfahren bevorzugt anzuwenden sind.

Zu bestimmen ist dabei der Effektivwert (RMS-Wert) des Feldes, da die einschlägigen Grenzwertvorgaben grundsätzlich Effektivwerte als Beurteilungsgrößen für die Exposition der Bevölkerung heranziehen [26. BImSchV], [99/519/EG], [ICNIRP 98]. Zu beachten ist auch, dass aufgrund dieser leistungsbezogenen Beurteilung (thermische Wirkungen) zur Bestimmung der Summenimmission am Messpunkt die einzelnen gemessenen Feldstärken mit ihrem individuellen Grenzwert gewichtet und anschließend quadratisch summiert werden.

Auch bezüglich der räumlichen Erfassung wurden ersten Projektteil bereits Unterscheidungen getroffen: Je nach Aufgabenstellung liegt der Fokus derartiger Messungen entweder in der Detektion der größten Feldstärke im Messvolumen oder in der Bestimmung einer mittleren Exposition („Spatial Averaging“). Dabei ist immer die isotrope Messung anzustreben, da

die Lage des Feldvektors im Raum gewöhnlich nicht bekannt ist. Die beiden gebräuchlichsten und prinzipiell für derartige Messungen geeigneten Verfahren („Schwenkmethode“ bzw. „Punktrastermessung“) werden eingehend untersucht, so dass ihre Vor- und Nachteile je nach zu lösender Messaufgabe erkennbar sind.

Auch bezüglich der auslastungsabhängigen Feldstärkeschwankungen werden eingehende Untersuchungen durchgeführt. Ziel ist es, Hochrechnungsfaktoren insbesondere für die frequenz- und die codeselektive Erfassung anzugeben, mit denen eine Extrapolation der Messwerte auf die Immission bei höchster betrieblicher Anlagenauslastung möglich wird.

Ergänzend werden typisch zu erwartenden Messunsicherheiten angegeben.

Bereits vorliegende Messempfehlungen zur Expositionsmesstechnik an UMTS-Sendern werden analysiert und bei der Definition der Messverfahren berücksichtigt.

II.4.2 Wesentliche Fragestellungen

Im folgenden werden für die drei prinzipiellen Messverfahren breitbandige, frequenzselektive und codeselektive Messung offene Fragen identifiziert, die in den nachfolgenden Abschnitten beantwortet werden. Bei den Fragestellungen wird jeweils unterschieden in „Erfassungsmethode“ und „Geräteeinstellungen“.

II.4.2.1 Breitbandmessung

Erfassungsmethode

Die Messung hochfrequenter Felder kann zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen führen, je nachdem welche Erfassungsmethode verwendet wird.

Die verschiedenen Erfassungsmethoden dienen hauptsächlich einer angemessenen Berücksichtigung der im Mikrowellenbereich typisch anzutreffenden kleinräumigen Feldstärkeschwankungen. Bedingt durch diese Schwankungen (Schwankungsbreite typisch bis zu 30 dB) ist es schwer, einen für den Messort repräsentativen Expositionswert anzugeben. Wie später noch eingehend gezeigt wird, führt die Messung der Feldstärke nur an einem Punkt zu wenig reproduzierbaren Ergebnissen mit hoher Schwankungsbreite. Daher werden meist die folgenden beiden Ansätze zur Findung eines repräsentativen Feldstärkewertes für den Messort als mögliche Lösungsansätze vorgeschlagen:

- Messung der Feldstärke im Messvolumen an einer ausreichenden Anzahl von Einzelpunkten mit anschließender Mittelwertbildung im Volumen („Spatial Averaging“) oder Verwendung des gefundenen Maximalwertes.
- Bestimmung der im Messvolumen vorhandenen Maximalfeldstärke durch geeignete Abtastung des Messvolumens.

Beide Methoden besitzen Vor- und Nachteile in Bezug auf Aufwand und Reproduzierbarkeit. Je nach Aufgabenstellung (z.B. Überprüfung der Einhaltung von Grenzwerten, Messungen für epidemiologische Studien etc.) ist eine Methode auszuwählen, die möglichst viele Vorteile auf sich vereint.

Geräteeinstellungen

Die Möglichkeiten für die Wahl unterschiedlicher Geräteeinstellungen sowie damit verbundene potenzielle Fehlerquellen sind bei breitbandigen Messgeräten stark begrenzt. Oftmals beschränken sich Einstellmöglichkeiten auf das Umschalten zwischen aktuellem Wert und Maximierungs- oder Mittelungsfunktion für die Anzeige, letztere z.B. in Zusammenhang mit der Durchführung eines Spatial Averaging.

Eine Fragestellung, der bisher noch wenig Aufmerksamkeit gewidmet wurde, für vorliegende Aufgabenstellung jedoch als sehr wichtig erachtet wird, bezieht sich auf die Modulationsabhängigkeit der Anzeige: Laut Vorgaben der 26. BImSchV sollen die Messwerte mit den Grenzwerten in Form von Effektivwerten verglichen werden. Deswegen ist es wünschenswert, dass die Feldstärkemessgeräte möglichst genau den Effektivwert der Feldstärke anzeigen. In den verfügbaren isotropen Messgeräten werden jedoch oftmals (sofern keine thermischen Sonden Verwendung finden) Diodengleichrichter eingesetzt. Hierbei können theoretisch je nach Feldstärkewert und Modulationsart höhere oder niedrigere Werte als der Effektivwert angezeigt werden; der Diodengleichrichter kann sowohl in Richtung Mittelwert-, als auch in Richtung Spitzenwertgleichrichter tendieren.

Das UMTS-Signal unterscheidet sich bedingt durch seinen hohen Crestfaktor und die relativ große Signalbandbreite grundsätzlich von schmalbandigen CW-Signalen, mit denen die Breitbandsonden üblicherweise kalibriert werden. Inwieweit bei UMTS-Signalen der Anzeigewert vom wahren Effektivwert abweicht, soll durch Untersuchungen geklärt werden.

II.4.2.2 Frequenzselektive Messung

Im folgenden werden zunächst die wesentlichen Parameter bzw. mögliche Erfassungsmethoden vorgestellt, die einen Einfluss auf die Größe des Ergebnisses bei der frequenzselektiven Messung hochfrequenter elektromagnetischer Felder ausüben können.

Erfassungsmethode

Für die frequenzselektive Messung sind die gleichen Erfassungsmethoden denkbar, wie bei der breitbandigen Messung. Im Unterschied zur Breitbandmessung können aufgrund der Frequenzauflösung des Messgerätes die UMTS-Signale bezüglich der einzelnen Betreiber unterschieden werden, eine Trennung der Einzelsignale eines Betreibers ist jedoch nicht möglich, da hierfür codeselektive Messverfahren notwendig sind.

Geräteeinstellungen

Neben der Erfassungsmethode können auch die gewählten Einstellparameter am Messempfänger bzw. Spektrumanalysator einen erheblichen Einfluss auf das Messergebnis ausüben. Würde es sich bei den Aussendungen der UMTS-Anlagen um unmodulierte Signale handeln, wäre das Messergebnis nicht so stark von der Einstellung des Analysators abhängig. Da jedoch zur Informationsübertragung immer modulierte Signale verwendet werden müssen, die je nach gewähltem Verfahren sehr unterschiedliche Eigenschaften (z.B. Bandbreite, Crestfaktor) besitzen, ist es notwendig, die Einstellparameter am Spektrumanalysator passend zu wählen, um auch wirklich als Ergebnis den Effektivwert der Feldstärke zu erhalten. Dies gilt insbesondere bei modernen digitalen Übertragungsverfahren wie UMTS, WLAN, DAB oder DVB-T. Bezüglich der korrekten Geräteeinstellung sind also ebenfalls eingehende Untersuchungen notwendig.

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

Auflösebandbreite („Resolution Bandwidth“ RBW)

Dieser Parameter legt die 3-dB-Bandbreite des Zwischenfrequenzfilters fest, mit der die Signale im Analysator gemessen werden. Die RBW muss immer mindestens so groß sein, wie die Bandbreite des zu messenden Signals. Ansonsten kommt es zu einem Pegelverlust in der Anzeige, also zu einer Unterbewertung der Immission, da nicht die gesamte Signalenergie das Filter passiert. Wird mit einer zu großen RBW gemessen, kann es vorkommen, dass eventuell vorhandene Nachbarkanäle mit in das Messergebnis einbezogen werden, so dass ein zu großer Wert angezeigt wird. Grundsätzlich sollte also die RBW mindestens so groß wie die Signalbandbreite, aber auch nicht wesentlich größer gewählt werden. Bei einigen Spektrumanalysatoren steht kein ausreichend breites ZF-Filter zur Verfügung, um ein UMTS-Signal korrekt zu erfassen. Hier besteht gegebenenfalls die Möglichkeit, einen geeigneten Korrekturfaktor zu definieren, der den Pegelverlust aufgrund der zu geringen Bandbreite kompensiert.

Videobandbreite („Video Bandwidth“ VBW)

Das Videofilter befindet sich hinter dem Gleichrichter und hat den Zweck, aus dem gleichgerichteten Zwischenfrequenzsignal des Analysators die „Signaleinhüllende“ zu extrahieren. Auch die Bandbreite des Videofilters (VBW) sollte nicht kleiner als die RBW gewählt werden, da es sonst ebenfalls zu einem Pegelverlust in der Anzeige kommt. Bei Verwendung des RMS-Detektors muss die VBW sogar deutlich größer als die RBW gewählt werden, damit keine zusätzliche Mittelwertbildung durch das Videofilter entsteht, was die Bestimmung des RMS-Wertes verfälschen würde. Bei vielen modernen Analysatoren kann die VBW an die

gewählte RBW bzw. den gewählten Detektor gekoppelt werden, so dass eine diesbezügliche Fehlbedienung von vorne herein vermieden wird.

Sweeptime (SWT) und dargestellter Frequenzbereich (Span)

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

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

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

Eingangsdämpfung (Input Attenuation), Referenzpegel (Ref Lvl)

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

ersten Mischers bestimmt. Dessen Eingangsimpedanz schwankt relativ stark über der Frequenz, dadurch wird die Fehlanpassung über der Frequenz ebenfalls ungünstig beeinflusst. Der Effekt eines schwankenden Messergebnisses aufgrund frequenzabhängiger Fehlanpassung wird als ein Beitrag zur Gesamtmessunsicherheit (ΔL : Pegelfehler in dB) des Verfahrens berücksichtigt. Der Pegelfehler ΔL berechnet sich näherungsweise zu [RAU 00]:

$$\Delta L = 20 \cdot \log (1 - r_a r_s) \quad (\text{II.4.1})$$

r_a : Reflexionsfaktor der Antenne

r_s : Reflexionsfaktor des Spektrumanalysatoreingangs

ΔL : Pegelfehler in dB

Der Pegelfehler wird dann besonders groß, wenn man Antennen verwendet, die im Messfrequenzbereich nicht optimal gepasst sind ($r_a > 0,1$). Dies ist bei den teilweise verwendeten kleinen bikonischen Antennen der Fall (Log-Per-Dipolantennen zeigen meist ein günstigeres Verhalten). Verringert werden kann der Pegelfehler, wenn man sicherstellt, dass der Reflexionsfaktor des Spektrumanalysatoreingangs r_s möglichst gering bleibt. Eine dem ersten Mischer vorgeschaltete Dämpfung von mindestens 10 dB (Input Attenuation) verringert die Fehlanpassung am Eingang des Analysators ($r < 0,1$), so dass geringere Pegelfehler erwartet werden können als ohne Vordämpfung. Der Preis, den man allerdings dafür zahlt, ist ein entsprechender Empfindlichkeitsverlust.

Zusätzlich sei an dieser Stelle noch angemerkt, dass eine Messung besonders schwacher Signale in Gegenwart von starken Signalen mit einem Spektrumanalysator unter Umständen problematisch ist, da ein Spektrumanalysator üblicherweise kein mitlaufendes Vorselektionsfilter besitzt. Ein starkes Signal kann bei geringer Eingangsdämpfung zu einer Übersteuerung des Eingangsmischers führen, auch wenn der Frequenzbereich des starken Signals am Bildschirm gar nicht dargestellt wird (z.B. ein starkes GSM-Signal während im UMTS-Frequenzbereich gemessen wird). Vermeidbar sind solche Beeinflussungen durch die Verwendung eines Messempfängers mit mitlaufender Vorselektion.

In der Praxis sind derartige Messfehler allerdings relativ unwahrscheinlich, da bei Vorhandensein eines sehr starken Signals die zusätzlich noch messbaren schwachen Signale (z.B. mehr als 30 dB unter dem dominierenden Signal) keinen nennenswerten Anteil zur Gesamtimmersion am Messort beitragen, so dass auf ihre Messung in der Regel verzichtet werden kann.

Detektortyp

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

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

Mit dem Peak-Detektor, der in allen gängigen Analysatormodellen realisiert ist, ist es möglich bei Signalen mit zeitlich schwankender Hüllkurve den größten Wert der Momentanleistung eines Signals festzustellen. Der RMS-Detektor hingegen ist in der Lage, bei einem zeitlich schwankenden Signal die mittlere Leistung (bzw. den Effektivwert) zu ermitteln. Immer mehr moderne Analysatoren bieten inzwischen auch diesen RMS-Detektor an. Ist die Zuverlässigkeit des Peak-Detektors im Regelfall kein Problem, so sind bei einer Aktivierung des RMS-Detektors einige Randbedingungen zu beachten, um wirklich den Effektivwert eines Signals zu ermitteln. Dazu muss man zunächst verstehen, wie ein RMS-Detektor arbeitet. Im folgenden ist nur eine relativ kurze Funktionsbeschreibung wiedergegeben, erschöpfende Detailinformationen finden sich in [RAU 00]:

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

Ist der Peak-Detektor eingestellt, wird aus diesen 6.400 Abtastwerten der größte ausgewählt und für die Vertikaldarstellung am Bildschirm herangezogen. Ist jedoch der RMS-Detektor aktiviert, so wird in einem schnellen Signalprozessor der quadratische Mittelwert aus allen 6.400 Samples gebildet und dieses Resultat zur Anzeige gebracht.

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

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

Betriebsart „Kanalleistungsmessung“

Moderne Spektrumanalysatoren bieten neben der üblichen frequenzselektiven Messung von Signalleistungen auch die Möglichkeit an, die gesamte in einem definierten Frequenzbereich vorhandene Leistung durch Integration der Messergebnisse eines durchlaufenden schmalbandigen ZF-Filters zu ermitteln. Dieses Verfahren wird „Kanalleistungsmessung“ (engl. „Channel Power Measurement“) genannt und ermöglicht beispielsweise die Bestimmung der

Leistung breitbandiger Signale (wie beispielsweise UMTS) auch mit Analysatoren, die kein ausreichend breites ZF-Filter besitzen. Dadurch wird im spektralen Mode eine Leistungsmessung ohne Verwendung von Bandbreiten-Korrekturfaktoren ermöglicht. Es ist zu prüfen, ob dieses Verfahren der gewöhnlichen spektralen Messung vorzuziehen ist.

II.4.2.3 Codeselektive Messung

Auch bei der codeselektiven Messung existieren einige Parameter, die einen Einfluss auf die Größe des Ergebnisses ausüben können, allerdings sind es deutlich weniger als bei der frequenzselektiven Messung:

Erfassungsmethode

Hier gibt es prinzipiell keine Unterschiede zur frequenzselektiven Messung. Für die Findung des repräsentativen Beurteilungswertes existieren grundsätzlich die gleichen Verfahren. Allerdings sollte man im Auge behalten, dass die codeselektive Messung nicht die aktuelle Immission liefert, sondern nur den Pegel des P-CPICH, der von der Sendeanlage mit konstantem Pegel abgegeben wird. Bei einer codeselektiven Messung sind also nur die räumlichen und nicht die zeitlichen Feldstärkeschwankungen wirksam.

Geräteeinstellungen

Messgeschwindigkeit

Insbesondere bei der „Schwenkmethode“ ist die Häufigkeit der Messungen im Vergleich zur Bewegungsgeschwindigkeit der Messantenne von Bedeutung. Um eine möglichst vollständige Abtastung des Messvolumens sicherzustellen, muss entweder die Antenne sehr langsam bewegt werden oder das Messgerät sollte möglichst viele Messungen pro Sekunden durchführen. Bei einigen Gerätetypen lässt sich zwischen langsamer und schneller Messgeschwindigkeit umschalten.

Erfassung mehrerer P-CPICH-Signale

Manche Geräte bieten die Möglichkeit, alle vorhandenen P-CPICH-Signale gleichzeitig zu erfassen, auch wenn sie sich auf unterschiedlichen Trägerfrequenzen befinden, was natürlich eine sehr zeiteffiziente Variante darstellt. Andere Geräte ermöglichen nur die gleichzeitige Messung aller P-CPICH-Signale eines Trägers. Bei manchen Geräten muss sogar jedes P-CPICH-Signal separat gemessen werden (dazu muss die Scramblingcodenummer des Kanals bekannt sein und in das Messgerät eingegeben werden). Da eine typische UMTS-Sendeanlage aus drei Sektorantennen besteht und damit drei Funkzellen generiert werden, (d.h. von diesem Standort werden drei P-CPICH-Signale abgegeben), sind Geräte, die nicht mehr als einen P-CPICH gleichzeitig messen können, sehr unpraktisch und daher für Expositionsmessungen auch kaum gebräuchlich.

II.4.3 Auswertung vorhandener Messempfehlungen

Wie bereits im ersten Projektteil dargestellt, existieren derzeit nur wenige nationale bzw. internationale Messempfehlungen für UMTS-Sendeanlagen, deren Inhalt über allgemeine Hinweise zu Messgeräten und zur Durchführung hinausgeht. Nur die folgenden drei Dokumente liefern tiefer gehende Informationen zur konkreten Messtechnik, allerdings teilweise auch sehr unterschiedlichen Inhalts, so dass zunächst eine vergleichende Gegenüberstellung sinnvoll erscheint. Es handelt sich dabei um folgende Dokumente:

BNetzA-Messvorschrift

Für die messtechnische Erfassung der vor Ort vorhandenen elektromagnetischen Felder und die Bewertung in Bezug zu den Grenzwerten zum Schutz von Personen in elektromagnetischen Feldern hat die Bundesnetzagentur (BNetzA, vormals Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post, RegTP) eine Messvorschrift entwickelt. Die Ergebnisse der Messungen, die nach dieser „Messvorschrift für bundesweite EMVU-Messreihen der vorhandenen Umgebungsfeldstärken“ Reg TP MV 09/EMF/3 [RegTP 03] von der BNetzA durchgeführt werden, sind in der EMF-Datenbank der BNetzA (emf.bundesnetzagentur.de) dokumentiert.

Die Reg TP MV 09/EMF/3 ist, obwohl nicht explizit erwähnt, primär für die Messung im Freien entwickelt. Für die Messungen ist ein Spektrumanalysator mit einer passenden Breitbandantenne einzusetzen. Es muss berücksichtigt werden, dass die BNetzA MV nicht den Anspruch stellt, *eine* spezielle Funkanlage detailliert zu untersuchen (anlagenbezogene Untersuchung). Zweck ist vielmehr ein Monitoring sämtlicher vorhandener Immissionen im Frequenzbereich 9 kHz bis 3 GHz („Umweltmonitoring“). Das kommt auch darin zum Ausdruck, dass die Ergebnisse der Messungen in der EMF-Datenbank nicht frequenzselektiv bzw. anlagenbezogen, sondern als kumulative Grenzwertausschöpfung aller gemessenen Einzelimmissionen (Gesamtimmission) angegeben werden.

CEPT ECC Recommendation (02)04

Mit der CEPT ECC Recommendation „Measuring non-ionising radiation (9 kHz – 300 GHz)“ [CEPT 03] existiert eine Empfehlung, welche die verschiedenen Messverfahren der CEPT-Länder für elektromagnetische Immissionen im Frequenzbereich 9 kHz bis 300 GHz vereinheitlichen soll. Obwohl UMTS in dieser Empfehlung nicht explizit erwähnt wird, enthält sie im Anhang spezielle Anweisungen für die Messung von breitbandigen Signalen (DVB-T und DAB werden explizit als Beispiele für derartige Signale genannt). Unter anderem wird hier für den Fall, dass der Spektrumanalysator eine zu geringe Bandbreite zur vollständigen Erfassung der Signale aufweist, die Kanalleistungsmessung („Channel Power Measurement“) empfohlen.

EN-Vornormen prEN 50400 von CENELEC

Die Vornorm prEN 50400 „Basic standard to demonstrate the compliance of fixed equipment for radio transmission (110 MHz - 40 GHz) intended for use in wireless telecommunication networks with the basic restrictions or the reference levels related to general public exposure to radio frequency electromagnetic fields, when put into service“ [prEN 50400] definiert Mess- und Berechnungsverfahren bei der Inbetriebnahme einer Anlage. Hierbei wird verifiziert, ob die Basisstation die Grenzwerte für die Allgemeinbevölkerung in allgemein zugänglichen Bereichen auch im operativen Betrieb einhält. Bei Messungen mit frequenzselektiven Geräten sind einige definierte Angaben zu internen Geräteeinstellungen enthalten. Auch breitbandige Messungen werden in dieser Norm spezifiziert.

Vollzugsempfehlung des Schweizer BUWAL

Schließlich liegt seit September 2003 der Entwurf für eine Vollzugsempfehlung des Schweizer Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) vor, in der sehr detailliert auf die messtechnische Bestimmung von Immissionen durch UMTS-Mobilfunksendeanlagen eingegangen wird [BUWAL 03]. Grund für diese sehr ausführlichen Erläuterungen und Handlungsanweisungen ist hauptsächlich die sehr strenge Schweizer Umweltgesetzgebung, die für bestimmte Bereiche („Orte mit empfindlicher Nutzung“) bezüglich der elektrischen Feldstärke um etwa den Faktor zehn niedrigere Grenzwerte vorgibt, als sie beispielsweise in Deutschland verbindlich sind. Aus diesem Grund sind natürlich auch sehr detaillierte Anweisungen für die Messung der Immission notwendig, da es wegen dieser verschärften Grenzwertlage häufiger zu möglichen Überschreitungen, Streitfällen oder behördlichen Auflagen kommen kann, als es beispielsweise in Deutschland der Fall ist. Die Vollzugsempfehlung dient also hauptsächlich der Verbesserung der Rechts- und Planungssicherheit.

Für die Messung der Signale von UMTS-Basisstationen im FDD-Mode werden in der Vollzugsempfehlung sehr ausführlich geeignete Messausrüstung, Messverfahren und Geräteeinstellungen vorgestellt und diskutiert.

Die Messempfehlung diskutiert, neben frequenzselektiven Messverfahren, auch die Möglichkeit der Immissionsbestimmung an UMTS-Sendeanlagen mittels Breitbandsonden und codeselektiver Messtechnik.

Insgesamt gesehen handelt es sich bei dieser Empfehlung um die derzeit umfangreichste Quelle über die korrekte Immissionsmesstechnik von UMTS-Signalen im FDD-Mode.

Die Empfehlungen von CEPT und CENELEC (prEN 50400) unterscheiden nicht zwischen FDD und TDD-Mode, während die BNetzA- und die BUWAL-Empfehlung explizit nur auf die Messung von Signalen des FDD-Mode eingehen.

Im folgenden werden die wesentlichen Vorgaben dieser vier Messempfehlungen (BNetzA, CEPT, CENELEC, BUWAL) vergleichend gegenübergestellt:

Allgemeines

	BNetzA	CEPT	prEN 50400	BUWAL
Zweck der Messung	„Umweltmonitoring“, d.h. Ermittlung von Feldstärkewerten, die für den Messort und seine nähere Umgebung charakteristisch sind.	Sowohl „Umweltmonitoring“ als auch Überprüfung der Einhaltung von Grenzwerten.	Hauptsächlich für „Abnahmemessungen“ (Überprüfung der Einhaltung von Grenzwerten).	Hauptsächlich für „Abnahmemessungen“ (Überprüfung der Einhaltung von Grenzwerten), allerdings auch hilfreich für Messungen im Rahmen von „Umweltmonitoring“.
Bevorzugte Lage der Messorte	Outdoor	Out- und Indoor	Out- und Indoor	Out- und Indoor
Erfassungsmethode	Messung an einem Punkt (1,5 m über Grund); Berücksichtigung der Richtwirkung der Messantenne durch 360° Drehung der Antenne („Drehmethode“); Messung von horizontaler und vertikaler Polarisierung mit „Max Hold“.	Messung an einem Punkt (1,5 m über dem Boden) oder Mittelwertbildung der Messung von drei übereinander liegenden Punkten (1,1 m, 1,5 m, 1,7 m); Messung von horizontaler und vertikaler Polarisierung mit „Max Hold“.	Isotrope Messung von drei übereinander liegenden Punkten (1,1 m, 1,5 m, 1,7 m); Beurteilungswert ist der größte der drei Messwerte; Weitere Punkte im Raster von max. 1 m.	„Schwenkmethode“, d.h. Maximalwertsuche im Messvolumen (0,5 bis 1,75 m über dem Boden) durch geeignetes Bewegen der Antenne und Variation der Polarisierung mit „Max Hold“.
Art der Signalerfassung	Frequenzselektiv	Frequenzselektiv Kanalleistungsmessung	Breitbandmessung Frequenzselektiv Kanalleistungsmessung	Breitbandmessung Frequenzselektiv Kanalleistungsmessung Codeselektive Messung
Antennen	Breitbanddipolantennen (Bikonische Antennen); ab 1 GHz auch Log-Per-Dipolantennen	Breitbanddipolantennen, Bikonische Antennen, Log-Per-Dipolantennen, Isotrope Antennen („3-Axis Probes“)	Keine Angabe	Dipolantennen, Bikonische Antennen, Log-Per-Dipolantennen
Messdauer	Keine Angabe	Bei Detailuntersuchungen angepasst an verwendete Grenzwertnorm (d.h. im Regelfall 6 Minuten)	Keine Angabe	Nicht im Detail spezifiziert.

Tabelle II.4.1: Vergleich der Messempfehlungen von BNetzA, CEPT, CENELEC (prEN 50400) und BUWAL (Allgemeines)

Breitbandige Messung

Parameter	BNetzA	CEPT	prEN 50400	BUWAL
Messgerät	Nicht behandelt	Nicht behandelt	Muss für den Frequenzbereich und den gemessenen Pegelbereich spezifiziert sein.	Muss für den Frequenzbereich und den gemessenen Pegelbereich spezifiziert sein.
Hochrechnung auf Maximalimmission	Nicht behandelt	Nicht behandelt	Messung bei maximaler Anlagenauslastung oder geeignete Hochrechnung (Details nicht spezifiziert)	Ausführlich dargestellt; Im Vergleich zu den anderen Messverfahren ergibt sich hierbei die größte Überbewertung der Exposition
Sonstige Hinweise	Nicht behandelt	Nicht behandelt	Max. Isotropieabweichung: 2 dB; Methode anwendbar, wenn Felder anderer Funksendeanlagen in der Summe mindestens 13 dB unter dem Messwert der betrachteten Anlage liegen.	Maximal zulässige erweiterte Messunsicherheit: ±45%

Tabelle II.4.2: Vergleich der Messempfehlungen von BNetzA, CEPT, CENELEC (prEN 50400) und BUWAL (breitbandige Messung)

Frequenzselektive Messung

Parameter	BNetzA	CEPT	prEN 50400	BUWAL
Auflösebandbreite (RBW)	5 MHz	Nicht spezifiziert, da Kanalleistungsmessung empfohlen	5 MHz	5 MHz
Falls keine ausreichend große RBW verfügbar	Addition eines Korrekturfaktors K (in dB) $K = 10 \cdot \log (B_{\text{Signal}} / B_N)^*$	Kein Korrekturfaktor empfohlen, stattdessen Kanalleistungsmessung	Kein Korrekturfaktor empfohlen, stattdessen Kanalleistungsmessung	Kleinere Bandbreiten nur zulässig, wenn Korrekturfaktor mit einem echten UMTS-Signal ermittelt wurde
Detektor	Peak	Peak	RMS	RMS (zwingend)
Hochrechnung auf Maximalimmission	Nicht erwähnt	Nicht erwähnt	Messung bei maximaler Anlagenauslastung oder geeignete Hochrechnung (Details nicht spezifiziert)	Ausführlich dargestellt; Typisch ergibt sich eine geringere Überbewertung als bei der breitbandigen Messung.

Parameter	BNetzA	CEPT	prEN 50400	BUWAL
Sonstige Hinweise	VBW \geq 10 MHz Sweep-time = 1 s	Kanalleistungsmessung, wenn kein geeignetes ZF-Filter verfügbar ist.	Keine	Maximal zulässige erweiterte Messunsicher- heit: $\pm 45\%$

Tabelle II.4.3: Vergleich der Messempfehlungen von BNetzA, CEPT, CENELEC (prEN 50400) und BUWAL (frequenzselektive Messung)

*: Bei gaussförmigen ZF-Filtern entspricht die Rauschbandbreite B_N des ZF-Filters in etwa der Auflösungsbreite RBW (3-dB-Bandbreite). Diese Umrechnungsformel ist streng genommen nur dann korrekt, wenn ein RMS-Detektor verwendet wird [RAU 00].

Kanalleistungsmessung

Parameter	BNetzA	CEPT	prEN 50400	BUWAL
Detektor	Nicht behandelt	Peak	RMS	RMS (zwingend)
Hochrechnung auf Maximalimmission	Nicht behandelt	Nicht erwähnt	Messung bei maximaler Anlagenauslastung oder geeignete Hochrechnung (Details nicht spezifiziert)	Ausführlich dargestellt; Typisch ergibt sich eine geringere Überbewertung als bei der breitbandigen Messung.
Sonstige Hinweise	Nicht behandelt	Keine	Keine	Maximal zulässige erweiterte Messunsicherheit: $\pm 45\%$

Tabelle II.4.4: Vergleich der Messempfehlungen von BNetzA, CEPT, CENELEC (prEN 50400) und BUWAL (Kanalleistungsmessung)

Codeselektive Messung

Parameter	BNetzA	CEPT	prEN 50400	BUWAL
Detektor	Nicht behandelt	Nicht behandelt	Nicht behandelt	RMS (zwingend)
Hochrechnung auf Maximalimmission	Nicht behandelt	Nicht behandelt	Nicht behandelt	Ausführlich dargestellt; Überbewertungen treten nicht auf.
Sonstige Hinweise	Nicht behandelt	Nicht behandelt	Nicht behandelt	Referenzmethode, die bevorzugt anzuwenden ist; Messgerät muss eine „Max Hold“-Funktion besitzen; Maximal zulässige erweiterte Messunsicherheit: $\pm 45\%$

Tabelle II.4.5: Vergleich der Messempfehlungen von BNetzA, CEPT, CENELEC (prEN 50400) und BUWAL (Codeselektive Messung)

Die BNetzA-Empfehlung sieht also nur die frequenzselektive Messung als Verfahren zur Expositionsbestimmung bei UMTS-Signalen vor, während CEPT auch noch die Kanalleistungsmessung betrachtet. CENELEC erwähnt zusätzlich noch die breitbandige Messung. Nur die Empfehlung von BUWAL berücksichtigt alle möglichen Messverfahren, insbesondere auch die codeselektive Messung.

Vergleicht man die verschiedenen Hinweise und Einstellparameter der vier betrachteten Empfehlungen, so ergeben sich nur sehr wenige Übereinstimmungen. Konsens herrscht nur bei den Antennen: Alle Empfehlungen, die konkrete Antennentypen benennen, sehen bikonische oder kleine Log-Per-Antennen als geeignet für derartige Messungen an. Bei der frequenzselektiven Messung sind erhebliche Differenzen festzustellen, so dass je nach angewandeter Empfehlung deutlich unterschiedliche Messergebnisse zu erwarten sind (Beispielsweise empfehlen BNetzA und CEPT eine Messung mit dem Peak-Detektor, während BUWAL und im Prinzip auch die prEN 50400 den RMS-Detektor zwingend vorschreiben. Dies allein dürfte zu Unterschieden von etwa 10 dB bei der Pegelmessung führen).

Der Grund für diese Unterschiede liegt zu einem nicht unerheblichen Teil im Anwendungsbereich der Empfehlungen: Während insbesondere die BNetzA-Empfehlung hauptsächlich für die effektive und kostengünstige Messung der Umgebungsfeldstärke im Rahmen eines „Umweltmonitoring“ geeignet ist, hat beispielsweise die BUWAL-Vorschrift den Zweck, eine einheitliche Vorgehensweise zur möglichst exakten Feldstärkebestimmung im Rahmen von Abnahmemessungen und Überprüfungen zur Einhaltung geltender Grenzwerte sicherzustellen.

Folgende wesentliche Unterschiede können bei Analyse der obigen Tabellen herausgearbeitet werden. Die sich daraus ergebenden Fragestellungen sollen durch eigene Untersuchungen beantwortet werden.

Erfassungsmethode

Hier gehen die Hinweise der Empfehlungen sehr weit auseinander. Sie reichen von einer Messung an nur einem Punkt bzw. der Mittelwertbildung über drei Punkte (CEPT) über die Maximalwertsuche mittels der „Drehmethode“ in einer definierten Höhe (BNetzA) bzw. der Auswertung von drei übereinander liegenden Punkten (prEN 50400) bis hin zur Maximalwertsuche im Messvolumen mittels der „Schwenkmethode“ (BUWAL). Bezüglich Zeitaufwand und Reproduzierbarkeit unterscheiden sich die Verfahren also erheblich. Hier gilt es, die für die jeweils vorgesehene Messaufgabe am besten geeignete(n) Vorgehensweise(n) aus diesen auszuwählen bzw. eigene Strategien durch Modifikation dieser Verfahren zu generieren.

Messdauer

Während BNetzA, CENELEC und BUWAL keine besonderen Hinweise zu den Messdauern geben, ist in der CEPT-Empfehlung eine Messzeit im Minutenbereich vorgegeben. Hier ist zu klären, ob derart lange Messzeiten bei der Erfassung von UMTS-Signalen wirklich notwendig sind, da dies eine erhebliche Vergrößerung des Zeitaufwandes für derartige Messungen bedeuten würde.

Detektortyp, Auflösebandbreite

Hier ist zunächst festzustellen, welche Unterschiede die Verwendung von RMS- bzw. Peak-Detektor erzeugen. Für eine frequenzselektive Messung müssen geeignete Auflösebandbreiten definiert werden. Zusätzlich ist zu prüfen, ob bei Nichtvorhandensein geeigneter Auflösebandbreiten die Verwendung des in der BNetzA-Empfehlung vorgeschlagenen Korrekturfaktors zuverlässige Resultate liefert. Außerdem ist die Eignung der Kanalleistungsmessung zur Erfassung breitbandiger Signale zu klären.

Codeselektive Messung

Selbst die Empfehlung des BUWAL beinhaltet nur wenige Hinweise zur codeselektiven Messung von UMTS-Signalen. Offene Fragen bestehen insbesondere noch bei der Messdauer, der Messgeschwindigkeit und der Zuverlässigkeit der größtenteils vollautomatisch arbeitenden Messgeräte mit codeselektiver Erfassung. Daher werden mehrere verschiedene Messsysteme im praktischen Einsatz verglichen.

II.4.4 Erfassungsmethoden

II.4.4.1 Örtliche Feldstärkevariationen

Um den Einfluss der durch Interferenzen verursachten örtlichen Feldstärkeschwankungen und deren Einfluss auf die Eignung verschiedener Erfassungsmethoden näher zu studieren, wurde eine umfangreiche Analyse der Feldverteilung in einem Wohnraum durchgeführt. Dieser befindet sich im ersten Stock eines Mehrfamilienhauses. Ein Grundriss des untersuchten Raums ist in Bild II.4.1 dargestellt.

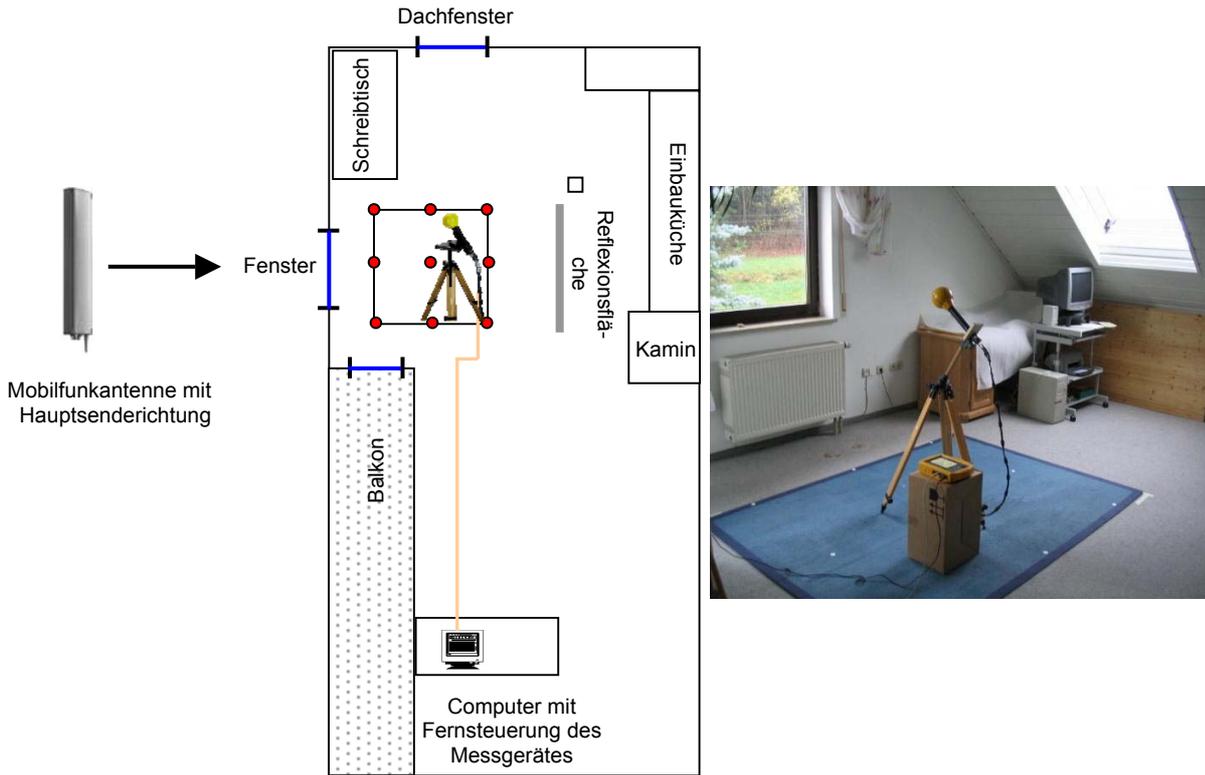


Bild II.4.1: Grundriss des untersuchten Wohnraums (LOS-Szenario)

Im Raum wurde ein quaderförmiges Messvolumen definiert, das aus drei übereinander liegenden Ebenen von jeweils 9 Messpunkten besteht. Die drei Messebenen befinden sich in 0,75, 1,25 und 1,75 Meter Höhe über dem Boden. Das Messvolumen wurde so im Raum positioniert, dass zu Möbeln und den Wänden ein Abstand von mindestens 50 cm sichergestellt ist. Das Punkteraster im Messvolumen ist im folgenden Bild dargestellt. Damit wird eine Analyse der Feldverteilung im Volumen durch Auswertung von bis zu 27 Punkten möglich.

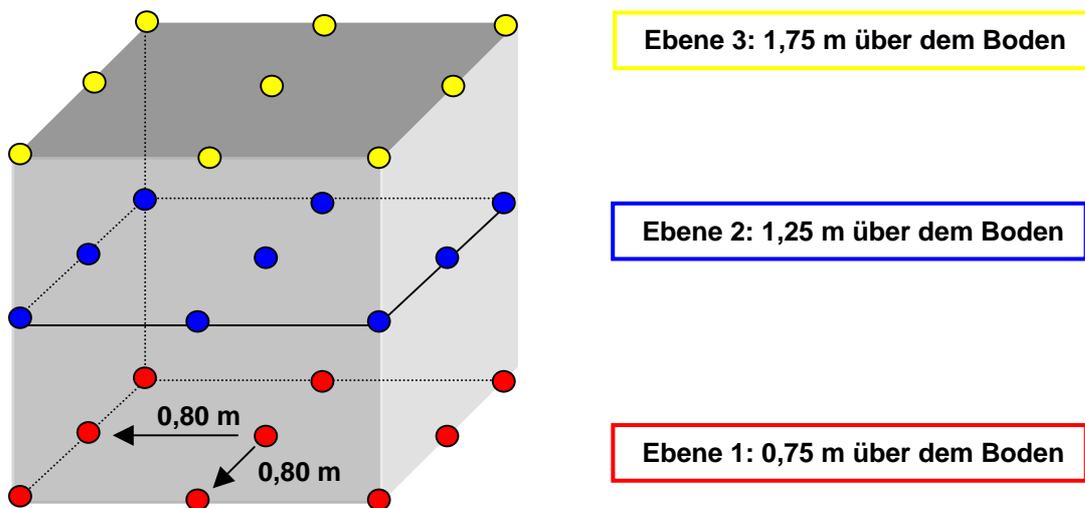


Bild II.4.2: Schematische Darstellung des Messvolumens

Das Messvolumen ist auf dem Foto in Bild II.4.2 zu sehen.

Um definierte Verhältnisse während der Analyse der Feldverteilung zu gewährleisten wurde ein künstliches UMTS-Signal mit konstanter Leistung verwendet. Generiert wurde dieses von einem Vektor-Signalgenerator (SMIQ-3 von Rohde & Schwarz) und zwar wurde ein in den UMTS-Spezifikationen definiertes Testsignal erzeugt, das sowohl alle notwendigen Signalerzeugungssignale, als auch 16 simulierte Kommunikationsverbindungen zu Endgeräten enthält („Testmodell 3“ gemäß Messvorschrift 3GPP TS 25.141). Das Ausgangssignal des Generators wurde über eine 1-Watt-Endstufe in eine handelsübliche 65°-Mobilfunksektorantenne (Kathrein, Typ 742 211) eingespeist (siehe Bild II.4.3). Die Mobilfunkantenne wurde in etwa 70 Meter Entfernung vom betrachteten Wohnraum aufgestellt, so dass sie sich etwa in der gleichen Höhe wie der Raum befindet. Es wurden hierbei zwei unterschiedliche Standorte für die Sendeantenne gewählt und zwar derart, dass ein Mal vom Fenster des Raumes aus gesehen eine direkte Sichtverbindung zu einem der beiden Standorte der Antenne herrscht (siehe Bild II.4.4). Diese Konfiguration wird im weiteren Text als „LOS-Szenario“ bezeichnet. Der zweite Standort wurde so gewählt, dass bei etwa gleicher Entfernung keine direkte Sichtverbindung zur Antenne besteht („NLOS-Szenario“).



Bild II.4.3: Simulierter „Mobilfunkstandort“: Aufbau (links) bzw. Signalgenerator mit Endstufe (rechts)



Bild II.4.4: Blick vom Antennenstandort zum Messort; Links: LOS-Szenario, rechts: NLOS-Szenario

Da es sich bei der verwendeten Mobilfunksektorantenne um eine „Dualbandantenne“ handelt, mit der auch GSM1800-Signale abgestrahlt werden können, wurde auch ein simuliertes GSM1800-Signal generiert, um mögliche Unterschiede bezüglich der Feldverteilung zwischen GSM und UMTS erkennen zu können. Das GSM-Signal wurde wiederum vom Vektor-signalgenerator SMIQ-3 erzeugt, wobei ein leistungskonstantes Signal (Trägerfrequenz: 1.860 MHz) erzeugt wurde, bei dem alle acht Zeitschlitzte mit gleicher Leistung senden, so wie es typisch für den Träger des „Broadcast-Kanals“ bei GSM ist.

Die Feldstärkemessungen wurden mit einem frequenzselektiven Messsystem (SRM-3000 von Narda) mit isotroper Antenne durchgeführt, die auf einem Stativ geeignet positioniert wurde (siehe Bild II.4.1). Die Messwerte wurden nicht direkt vom Display des Messgerätes abgelesen, sondern über die USB-Schnittstelle an einen etwa vier Meter entfernten Steuer-rechner übertragen, der sich im Seitenflügel des Raumes befand (siehe Bild II.4.1). Damit sollte sichergestellt werden, dass die ablesende Person keinen Einfluss auf die Größe des Messergebnisses ausübt.

Zunächst wurden folgende Messungen durchgeführt (Erfassung an jeweils 27 Messpunkten im Volumen):

- UMTS-Signal (LOS-Szenario)
- UMTS-Signal (NLOS-Szenario)
- GSM-Signal (LOS-Szenario)
- GSM-Signal (NLOS-Szenario)

Außerdem wurde noch der Einfluss stark reflektierender Objekte auf die UMTS-Feldverteilung näher studiert. Dazu wurde eine reflektierende Wand aus Aluminiumfolie derart im Raum angeordnet, dass sie sich hinter dem Messvolumen etwa senkrecht zur radialen Verbindungslinie zwischen Messvolumen und Sendeantenne befindet (siehe beispielhaft Bild II.4.5 für das NLOS-Szenario). Die UMTS-Messungen wurden also sowohl für das LOS- als auch das NLOS-Szenario zweimal durchgeführt (jeweils einmal mit und einmal ohne Reflektorfläche).

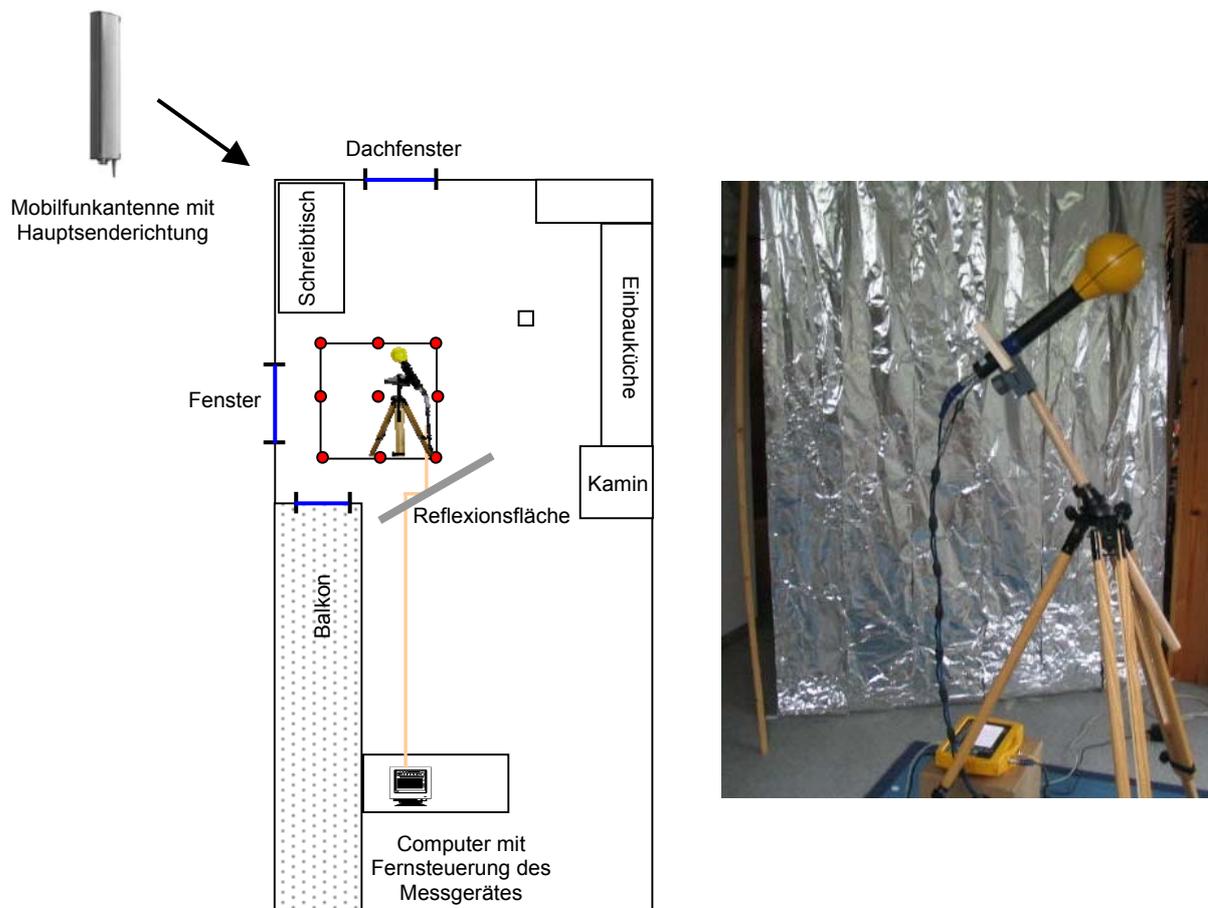


Bild II.4.5: Situationsbild für das NLOS-Szenario (inklusive Reflektorwand)

Zur Bestimmung der im Messvolumen vorhandenen Feldstärke existieren, wie bereits mehrfach erwähnt, sehr unterschiedliche Verfahren, je nachdem welchen Aufwand bei der Erfassung man betreibt:

- Die einfachste Methode ist die isotrope Messung des Feldes an einem definierten Punkt, wobei hierbei mit einer großen Unsicherheit zu rechnen ist, da in diesem Fall die kleinräumigen Feldstärkeschwankungen voll wirksam werden und dabei sicherlich nicht der Größtwert oder der Raummittelwert gefunden wird. Eine Auswertung der Messwerte an den 27 Punkten liefert einen Eindruck über die Größenordnung der möglichen Unsicherheit.
- Besser geeignet zur Findung des Maximalwertes bzw. zur Berechnung des Raummittelwertes ist natürlich die Auswertung aller 27 Punkte. In der Praxis (z.B. bei der Messung innerhalb von Wohnungen für epidemiologische Studien) ist es aus Zeit- und Kostengründen kaum möglich, im Messvolumen 27 Punkte zu erfassen (Bei den hier durchgeführten Messungen dauerte ein Durchgang, d.h. die Messung eines Signals an 27 Punkten, ohne Auf- und Abbauzeiten etwa 60 Minuten). Meist werden daher einfachere Geometrien mit weniger als zehn Punkten genutzt. Interessant ist allerdings hierbei die Frage, wie stark der Messwert von der gewählten Mittelungsgeometrie abhängt. Die Mittelwerte aus drei Szenarien mit deutlich weniger Punkten wurden dazu mit dem „Referenzmittelwert“ (Auswertung aller 27 Punkte) verglichen.
- In den meisten Fällen interessiert jedoch nicht der räumliche Mittelwert, sondern der absolute Maximalwert im Messvolumen. Für dessen Bestimmung wird meist die „Schwenkmethode“ empfohlen, da sie innerhalb von ein bis zwei Minuten den Maximalwert im Messvolumen liefert und dadurch natürlich im Vergleich zur Punktrastermethode absolut zeiteffizient ist. Daher wurde für jedes oben definierte Szenario die Feldstärke im betrachteten Volumen zusätzlich mit der Schwenkmethode bestimmt, so dass Vergleiche mit den Maximalwerten aus der Rastermethode möglich sind. Bei der Durchführung der Schwenkmethode wurde darauf geachtet, dass die Schwenkbewegung im Raum extrem langsam durchgeführt wird, da die Isotropantenne an jedem Punkt die drei orthogonalen Messwerte nacheinander aufnimmt und daraus mittels geometrischer Addition die vorhandene Feldstärke errechnet und ausgibt. Bei zu schneller Schwenkbewegung im Vergleich zur Messgeschwindigkeit ist nicht mehr sichergestellt, dass die drei Messwerte jeweils nahezu am gleichen Ort aufgenommen werden (Die Ortsveränderung während der drei Messungen sollte deutlich kleiner als die Wellenlänge sein).

Folgende Tabelle gibt die wesentlichen Ergebnisse der Volumenmessungen wieder:

Szenario	Maximaler Messwert [dBm]	Minimaler Messwert [dBm]	Spannweite (Max. - Min.) [dB]	Mittelwert über alle Punkte [dBm]	Standardabweichung [dB]
GSM1800 (LOS)	-47,4	-62,9	15,5	-54,2	3,4
GSM1800 (NLOS)	-54,9	-62,4	7,5	-59,0	1,9
UMTS (LOS)	-49,7	-60,9	11,2	-55,4	3,0
UMTS (NLOS)	-57,0	-62,2	5,2	-59,6	1,2
UMTS (LOS) mit Reflektor	-48,3	-60,0	11,7	-53,4	2,5
UMTS (NLOS) mit Reflektor	-56,8	-61,9	5,1	-59,5	1,2

Tabelle II.4.6: Ergebnisse der Volumenmessungen im Innenraum (jeweils 27 Messpunkte)

Folgende Erkenntnisse können aus den Zahlenwerten der obigen Tabelle gewonnen werden:

- Die Mittelwerte der GSM1800- und UMTS-Messungen über alle 27 Messpunkte stimmen für die beiden Szenarien LOS und NLOS recht gut überein: Bei LOS liefern die beiden UMTS-Messungen (mit bzw. ohne Reflektor) Mittelwerte, die um 2 dB differieren. Für NLOS ergibt sich eine Differenz zwischen den beiden UMTS-Messreihen von 0,1 dB. Offensichtlich hat der Reflektor keinen starken Einfluss auf die mittlere Feldstärke im Volumen.
- Die Mittelwerte der beiden GSM-Messungen liegen in vergleichbarer Größenordnung wie die UMTS-Mittelwerte. Da GSM mit der gleichen Leistung abgestrahlt wurden wie die UMTS-Signale und auch die verwendete Sendeanenne bei GSM1800 und UMTS nahezu gleiches Abstrahlverhalten (Antennengewinn, Öffnungswinkel) aufweist, deutet dies darauf hin, dass beide Signale etwa gleicher Ausbreitungsdämpfung unterliegen.
- Ein Vergleich zwischen LOS und NLOS liefert das zunächst etwas verwunderliche Ergebnis, dass sowohl die absolute Schwankungsbreite als auch die Standardabweichung der Messwerte bei LOS für alle Szenarien deutlich höher ist als für NLOS. Man würde eigentlich eher das Gegenteil erwarten, da bei NLOS aufgrund des fehlenden dominierenden Signalpfads typischerweise eine stärker ausgeprägte Welligkeit in der Feldstärkeverteilung nachweisbar ist. Als Grund für dieses etwas überraschende Ergebnis stellte sich bei genauerer Datenanalyse heraus, dass bei den LOS-Szenarien nur die Punkte in der mittleren und obersten Messebene direkte Sicht zum Antennenstandort hatten, während von den Punkten in der untersten Ebene (75 cm über dem Boden) keine direkte Sicht herrschte. Dieser Zustand ist nicht ungewöhnlich, sondern er wird häufig in Räumen auftreten, bei denen die Fenster nicht bis zum Raumboden reichen. Dadurch ergaben sich bei allen LOS-Messungen im Mittel niedrigere Messwerte in der untersten Ebene, was entsprechend die Spannweite bzw. die Standardabweichung vergrößerte. Bei NLOS

war keine der drei Messebenen bevorzugt, so dass eine geringere Streuung der Messwerte entstand.

- Deutliche Unterschiede in der Streuung der Messwerte zwischen UMTS und GSM1800 konnten nicht beobachtet werden.

Da für jedes Szenario auch eine Maximalwertsuche im Messvolumen mittels der „Schwenkmethode“ durchgeführt wurde, kann festgestellt werden, wie zuverlässig man mit einer Messung an 27 Punkten den im Volumen vorhandenen Maximalwert findet. Der Vergleich zwischen Maximalwert mittels „Punktrastermethode“ und „Schwenkmethode“ ist in folgender Tabelle ausgeführt:

Szenario	Maximaler Messwert aus „Schwenkmethode“ [dBm]	Maximaler Messwert aus 27 Punkten [dBm]	Differenz [dB] (Schwenk - Raster)
GSM1800 (LOS)	-45,7	-47,4	1,7
GSM1800 (NLOS)	-51,4	-54,9	3,5
UMTS (LOS)	-46,7	-49,7	3,0
UMTS (NLOS)	-55,2	-57,0	1,8
UMTS (LOS) mit Reflektor	-43,7	-48,3	4,6
UMTS (NLOS) mit Reflektor	-54,8	-56,8	2,0

Tabelle II.4.7: Maximalwertsuche mittels „Punktrastermethode“ bzw. „Schwenkmethode“ im Vergleich

Es zeigt sich also, dass selbst bei der zeitraubenden Messung an 27 Punkten nicht zuverlässig der vorhandene Maximalwert der Feldstärke gefunden wird, sondern typischerweise eine Unterbewertung von bis zu einigen dB im Vergleich zur Schwenkmethode auftritt.

Da beispielsweise für epidemiologische Studien die mittlere Exposition im Raum als Beurteilungsgröße von Bedeutung ist, machen Punktrastermessungen in diesen Fällen durchaus Sinn. Allerdings wird man aus Zeit- und Kostengründen im Regelfall mit deutlich kleineren Messpunktzahlen im Raum arbeiten, um den Messaufwand in erträglichen Grenzen zu halten. Aus diesem Grund wurden die Ergebnisse der Rastermessungen in anderer Form nochmals ausgewertet. Statt über alle 27 Messwerte zu mitteln, wurden die in folgender Abbildung dargestellten Geometrien verwendet, bei denen nur sieben bzw. neun Punkte für die Mittelwertbildung herangezogen werden.

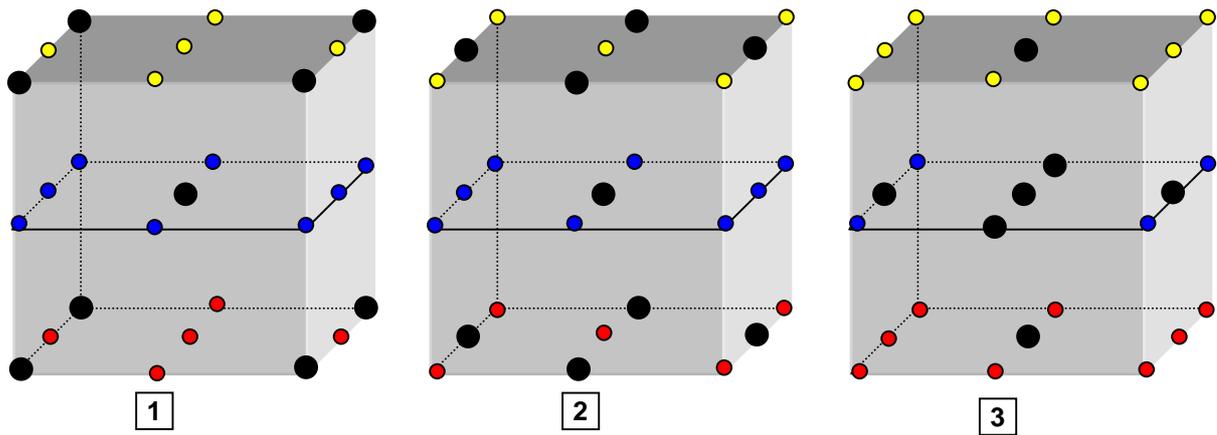


Bild II.4.6: Messraster mit verminderter Punktezahl (Schwarz: Für die Mittelwertbildung verwendete Punkte)

In folgender Tabelle sind die Mittelwerte aus diesen drei reduzierten Geometrien dem Mittelwert aus allen 27 Punkten gegenübergestellt.

Szenario	„Referenzwert“ bei Verwendung aller 27 Punkte [dBm]	Mittelwert bei Verwendung von Geometrie 1 [dBm]	Mittelwert bei Verwendung von Geometrie 2 [dBm]	Mittelwert bei Verwendung von Geometrie 3 [dBm]	Spannweite [dB]
GSM1800 (LOS)	-54,2	-57,8	-52,9	-52,9	4,9
GSM1800 (NLOS)	-59,0	-58,2	-59,6	-60,0	1,8
UMTS (LOS)	-55,4	-56,4	-54,4	-53,1	3,3
UMTS (NLOS)	-59,6	-59,9	-58,9	-60,0	1,1
UMTS (LOS) mit Reflektor	-53,4	-55,7	-51,9	-52,9	3,8
UMTS (NLOS) mit Reflektor	-59,5	-59,4	-59,4	-60,1	0,7

Tabelle II.4.8: Punktrastermethode bei Verwendung unterschiedlicher Rastergeometrien (Die Rastergeometrie mit jeweils der geringsten Abweichung zum „Referenzwert“ ist rot markiert)

Folgendes lässt sich feststellen:

- Bei Verwendung aller 27 Punkte resultiert ein Mittelwert, der sich hier immer zwischen den Mittelwerten aus den vereinfachten Geometrien befindet.
- Bei NLOS ergibt sich kein sehr großer Unterschied zwischen den einzelnen Mittelungsgeometrien, die Auswertung von weniger Messpunkten erscheint durchaus verlässliche Mittelwerte zu liefern.
- Bei LOS wirkt wieder der Effekt, dass die Messpunkte der untersten Ebene im Mittel niedrigere Messwerte liefern, so dass sich abhängig von der verwendeten Geometrie eine größere Spannweite der Mittelwerte ergibt. Abschattungseffekte können also zu einer deutlichen Zunahme der Messunsicherheit bei Rastermessungen mit verhältnismäßig geringer Punktezahl führen.
- Keine der drei verwendeten reduzierten Mittelungsgeometrien kann bevorzugt werden, d.h., je nach Szenario liefert eine andere Geometrie einen Mittelwert, der am wenigsten vom Referenzwert (Mittelwert über alle 27 Punkte) entfernt ist.

Nochmals zurück zur Maximalwertbestimmung: Gelegentlich wird statt der Schwenkmethode auch folgende Vorgehensweise zur Bestimmung der Maximalfeldstärke im Messvolumen vorgeschlagen: Im Rahmen einer Vormessung wird zunächst mit einer handgeführten Antenne der Ort größter Feldstärke im Volumen gesucht (mittels Bewegen der Antenne und gleichzeitiger Beobachtung der Anzeige des Messgerätes). Nachdem der Ort maximaler Feldstärke gefunden ist, wird dort eine „Präzisionsmessung“ (Messung der drei orthogonalen Komponenten und geometrische Summation) mittels einer Isotropantenne oder eines Präzisionsdipols durchgeführt. Dieser Wert wird dann als die maximale im Raum befindliche Feldstärke betrachtet.

Ob dieses Verfahren zuverlässige Ergebnisse liefert, wurde mit einer weiteren Messreihe im gleichen Wohnraum näher untersucht: Die Felder an zehn Messpunkten im Abstand von jeweils 10 cm entlang einer geraden Linie (Messhöhe immer 1,25 m) wurden zwei mal mit dem isotropen Messsystem Narda SRM-3000 gemessen. Bei der ersten Messung war niemand in der Nähe anwesend, bei zweiten Mal stand eine Person in der Nähe der Antenne, jedoch immer noch mindestens 50 cm davon entfernt. Die Position der Person wurde variiert, so dass sie bezüglich der Einfallsrichtung der elektromagnetischen Welle einen unterschiedlich starken Einfluss auf das Messergebnis ausüben konnte. Zusätzlich wurden wieder auch Szenarien unter Verwendung der Reflektorwand untersucht. Die Sendeantenne war bei allen Messungen so aufgebaut, dass zu ihr Sichtverbindung von der Messlinie aus herrschte. Die untersuchten Szenarien sind in folgendem Bild schematisch dargestellt:

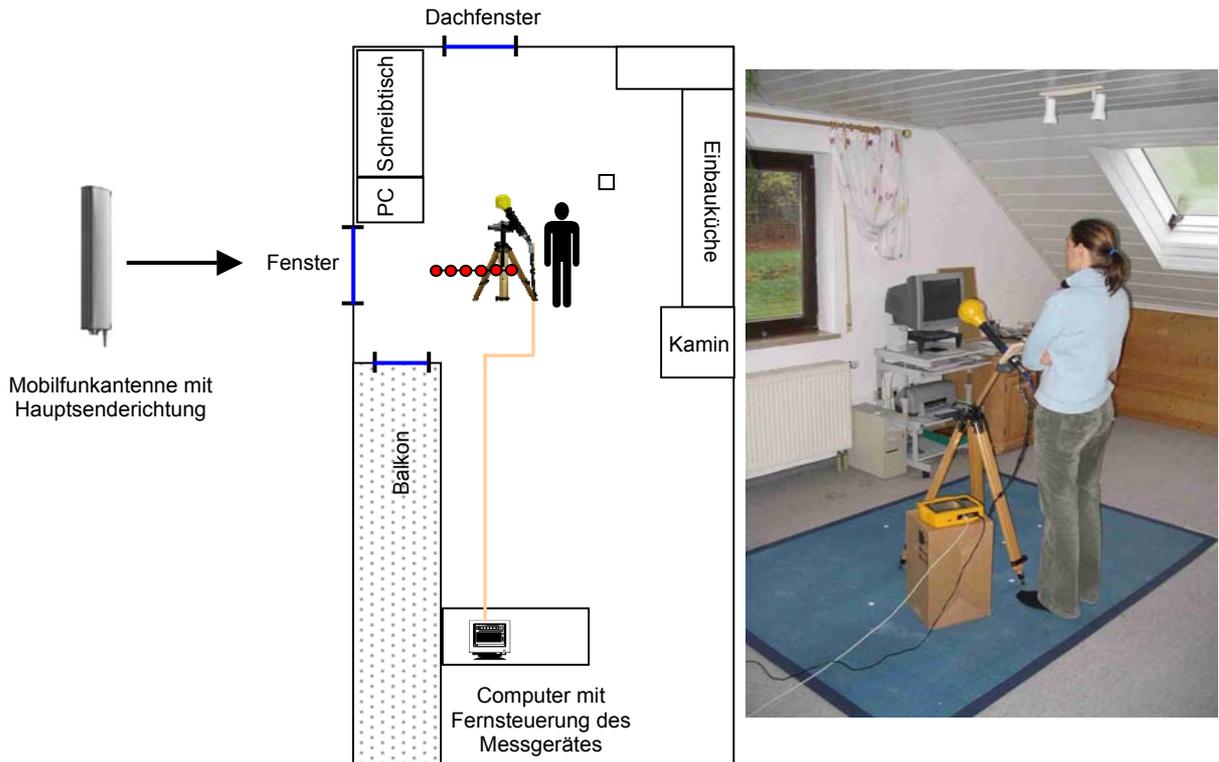


Bild II.4.7: Linienmessung zur Untersuchung des Personeneinflusses

Zwei typische Ergebnisse der Messreihen sind im folgenden dargestellt:

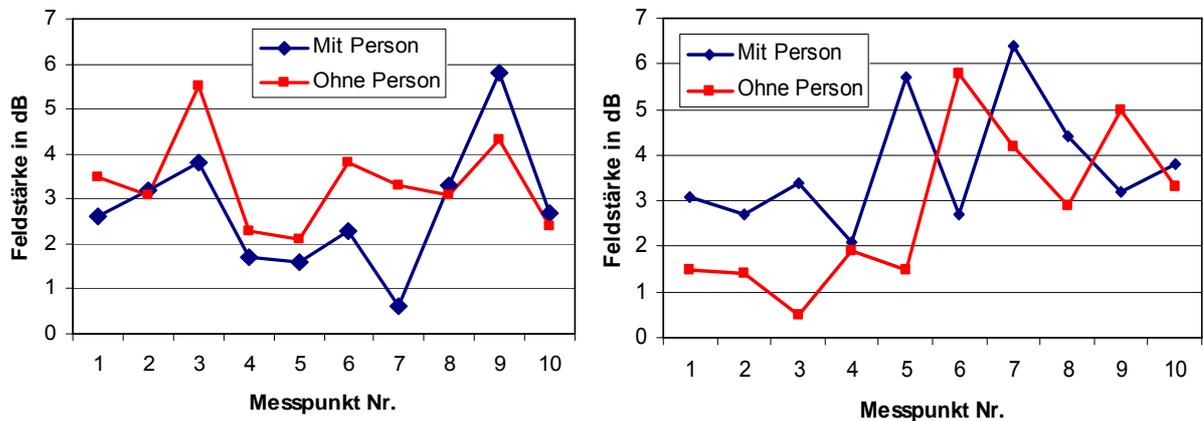


Bild II.4.8: Personeneinfluss bei Feldstärkemessungen (Feldstärkeschwankungen entlang einer Linie mit zehn Messpunkten im Abstand von jeweils 10 cm mit und ohne Anwesenheit einer Person). Gemessen wurde an den Markerpositionen, nur der Übersicht halber sind die Markierungen durch Linien verbunden. Die beiden Diagramme stellen die Ergebnisse zweier unterschiedlicher Messungen dar, bei denen sich die Person jeweils an eine andere Position in der Nähe der Antenne gestellt hat.

Die Messungen liefern folgende Erkenntnisse:

- Die Anwesenheit einer Person verändert den Absolutwert des Maximums nur wenig, jedoch verschiebt sich seine Lage unter Umständen deutlich.
- Ein im Rahmen einer „Vormessung“ unter Anwesenheit einer Person gefundener Maximalwert kann sich bei der „Feinmessung“ durch das Fehlen der Person derart „weg bewegen“, dass nun am betrachteten Punkt weniger gemessen wird. Im rechten Diagramm von Bild II.4.8 verringert sich beispielsweise der zunächst angenommene Maximalwert (Punkt 7) um 2,2 dB, nachdem sich die Person entfernt hat. Das nahezu genau so große zweite Maximum (Punkt 5) verringert sich sogar um 4,2 dB.
- Bei bewusstem „Suchen“ von Punkten mit starker Abhängigkeit des Messwertes von der Anwesenheit einer Person zeigte sich, dass Schwankungen von typisch 4 dB jederzeit zu reproduzieren sind.

Aufgrund der hier gewonnenen Erkenntnisse zum Personeneinfluss wird der Einfluss des Messenden auf das Ergebnis in Abschnitt II.4.6 noch genauer untersucht.

Fazit:

Die in diesem Kapitel dokumentierten Messungen in einem Wohnraum führen zu folgenden Erkenntnissen für die Wahl geeigneter Erfassungsmethoden:

- Zur Bestimmung räumlicher Mittelwerte sind Punktrastermessungen geeignet. Stabile Mittelwerte sind jedoch nur bei ausreichend großen Messpunktanzahlen sicherzustellen. In der Praxis ergeben sich bei Mittelungsgeometrien, die aus einer relativ geringen Zahl an Punkten (< 10) bestehen, zunehmende Schwankungsbreiten des Mittelwertes in Abhängigkeit von der verwendeten Geometrie, insbesondere dann, wenn nicht alle Punkte der Geometrie Sichtverbindung zur felderzeugenden Quelle besitzen.
- Die Bestimmung der maximalen Feldstärke im Volumen ist am einfachsten mit der „Schwenkmethode“ möglich, allerdings geht dabei die Information, an welcher Stelle sich der Maximalwert befindet, verloren. Eine Maximalwertsuche mit der Punktrastermethode führt im Regelfall zu einer Unterbewertung. Auch die zweistufige Maximalwertsuche (Vormessung plus Präzisionsmessung) kann wegen des Einflusses der messenden Person zu einer Unterbewertung führen.

II.4.4.2 Zeitliche Feldstärkevariationen

Wie im vorherigen Kapitel bereits dargestellt, verändert sich das „Feldstärkegebirge“ im Raum aufgrund sich verändernder Randbedingungen (Bewegung von Personen, Öffnen von Türen, windbedingte Bewegungen von Bäumen und Ästen etc.) permanent. An einem definierten Messpunkt muss also immer mit einem zeitlich instabilen Feldstärkewert gerech-

net werden. Um zu klären, nach welcher Zeit man bei einer isotropen Messung an einem Punkt (Betriebsart „Max-Hold“) einen stabilen Messwert erhält, wurde im betrachteten Raum an drei senkrecht über einander liegenden Punkten (0,75, 1,25 und 1,75 Meter über dem Boden) die zeitliche Veränderung des Max Hold Wertes während eines Zeitraums von 60 Sekunden beobachtet. Das Ergebnis ist in folgender Tabelle wiedergegeben.

Zeit	Messhöhe: 0,75 m	Messhöhe: 1,25 m	Messhöhe: 1,75 m
10 sec	90,4	95,0	92,6
20 sec	90,4	95,4	93,8
30 sec	90,4	95,6	93,8
40 sec	90,4	95,6	93,8
50 sec	90,4	95,6	93,8
60 sec	90,4	95,6	93,8

Tabelle II.4.9: Zeitliche Entwicklung des „Max-Hold“-Messwertes in dB μ V/m an drei übereinander liegenden Punkten

Bei diesen drei Punkten hat es also bis zu 30 Sekunden gedauert, bevor sich ein stabiler Maximalwert eingestellt hat. Diese Tatsache sollte bei der Durchführung von Punktrastermessungen beachtet werden, um systematische Unterbewertungen zu vermeiden: Die Messzeit an einzelnen Punkten sollte nicht zu kurz gewählt werden, was natürlich einen Einfluss auf den Zeitbedarf und damit die Kosten von Punktrastermessungen ausübt.

II.4.5 Geräteeinstellungen

II.4.5.1 Breitbandmessung

Wie schon in Abschnitt II.4.2.1 erwähnt, ist die Möglichkeit unterschiedlicher bzw. potenziell fehlerbehafteter Geräteeinstellungen bei Breitbandsonden stark eingegrenzt. Weitgehend ungeklärt ist hingegen die Frage nach der Modulationsabhängigkeit der Anzeige, d.h. der Abweichung der Messgeräteanzeige bei Beaufschlagung mit einem UMTS-Signal im Vergleich zu einem CW-Signal gleicher Leistung.

Hierzu wurden Untersuchungen an einem Breitbandmessgerät EMR-300 der Firma Narda Safety Test Solutions durchgeführt. Dieses mit einem Diodengleichrichter ausgestattete Gerät wird, wie eigene Erfahrungen sowie ein Ringvergleich der Bundes- und Ländermessstellen zum Thema „Arbeits- und Immissionsschutz bei elektromagnetischen Feldern“ im September 2005 gezeigt haben, in Deutschland für Immissionsmessungen sehr verbreitet eingesetzt.

Zur Überprüfung der Modulationsabhängigkeit wurde die Sonde in der EMV-Absorberkammer der IMST GmbH mit einem definierten Feld beaufschlagt, siehe Bild II.4.9.

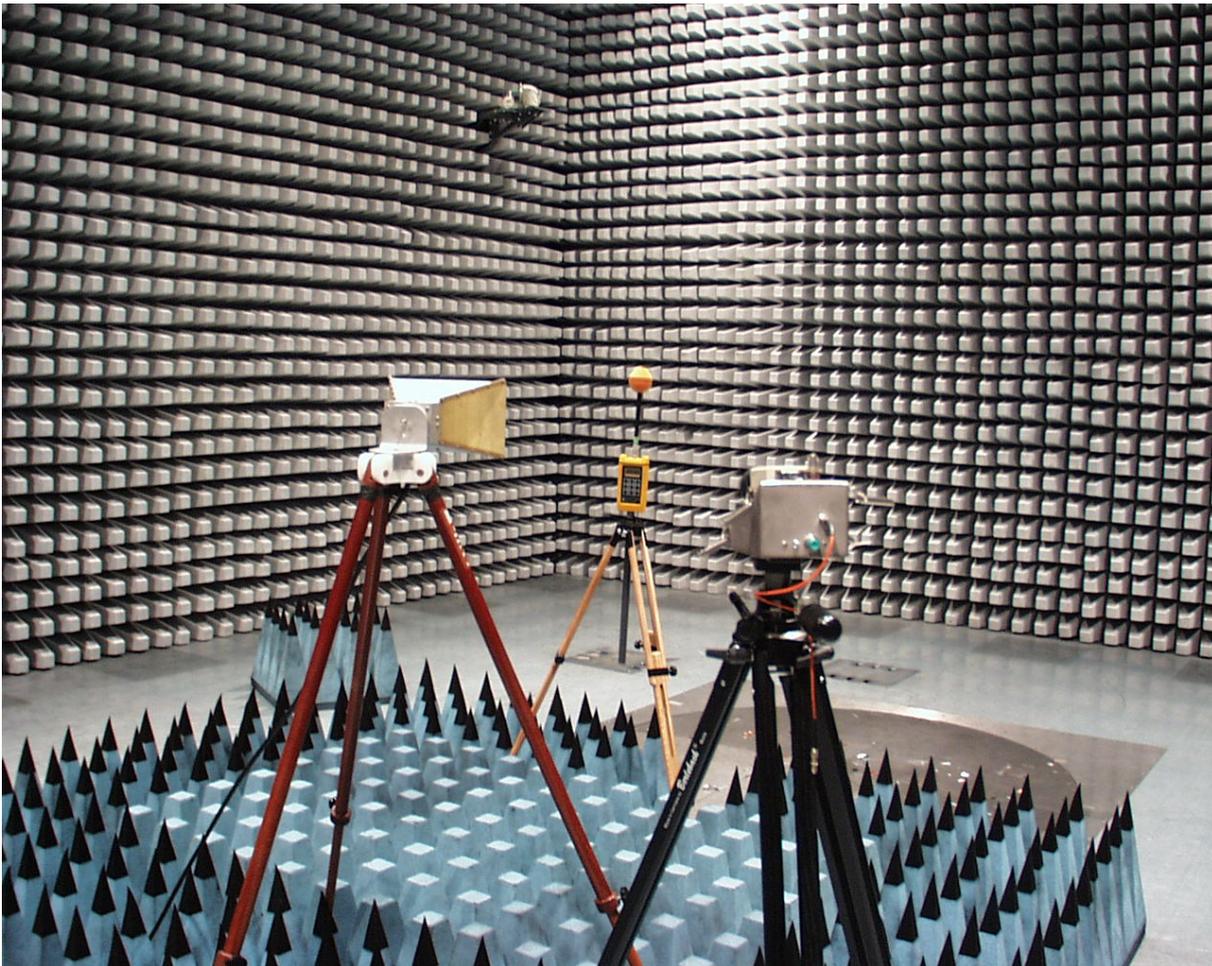


Bild II.4.9: Messaufbau zur Überprüfung der Modulationsabhängigkeit

Der Boden zwischen Sendeantenne (Hornantenne EMCO 3115) und dem Breitbandmessgerät war mit Absorbern ausgelegt. Der Abstand zwischen Sendeantenne und Messgerät betrug 1,8 m. Mit einer Kamera (rechts im Bild) wurde die Anzeige des Breitbandmessgerätes kontrolliert.

An die Sendeantenne wurde zuerst ein CW-Signal bei 2140 MHz unterschiedlicher Leistung eingespeist. Das CW-Signal wurde mit einem Signalgenerator (Agilent 8648D) erzeugt und über einen HF-Verstärker 0,8 - 4,2 GHz, 25 W (Amplifier Research 25S1G4) auf die Antenne gegeben. Hinter dem Verstärkerausgang wurde mit einem Richtkoppler (Amplifier Research DC 7140) ein definierter Teil der an die Antenne geleiteten Vorwärtsleistung ausgekoppelt und mit einem thermischen Leistungsmesskopf (Agilent 8482A) bzw. einem Leistungsmesser (Agilent 438A) angezeigt. Die Ausgangsleistung des Signalgenerators wurde so eingestellt, dass das Breitbandmessgerät Feldstärken im Bereich zwischen 1 V/m und 15 V/m anzeigte. Für die jeweiligen Feldstärkeabstufungen wurde der Teil der ausgekoppelten Vorwärtsleistung notiert.

In einem zweiten Schritt wurde der Signalgenerator durch einen Basisstationssimulator (Rohde & Schwarz CMU 200) ersetzt, der ein UMTS-Signal bei 2140 MHz erzeugte. Die Ausgangsleistung des Basisstationssimulators wurde so eingestellt, dass exakt dieselben Vorwärtsleistungen am Antenneneingang erzeugt wurden wie beim CW-Signal. Die Anzeige der Breitbandsonde wurde abgelesen und mit den CW-Ergebnissen verglichen.

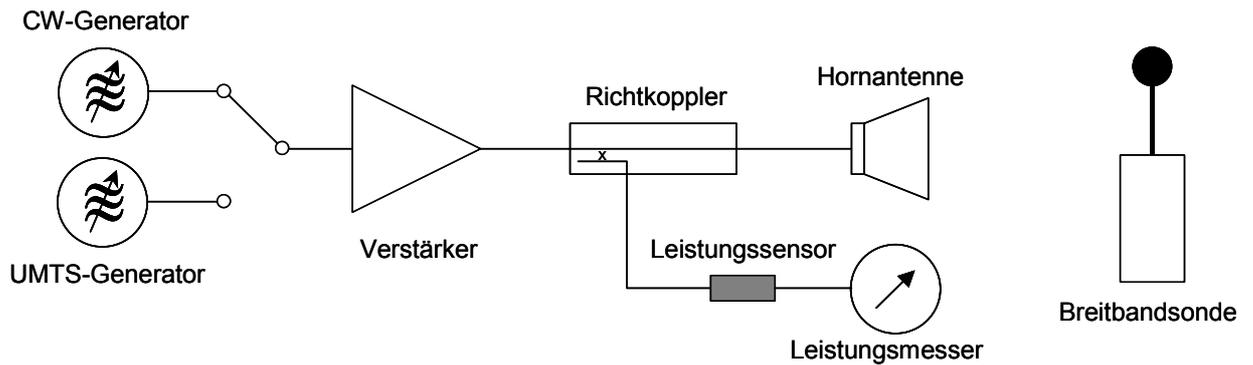


Bild II.4.10: Schematischer Aufbau zur Überprüfung der Modulationsabhängigkeit

Bild II.4.10 zeigt schematisch den Versuchsaufbau. Hierbei ist vor allem die Tatsache wichtig, dass ein thermischer Leistungsmesskopf verwendet wird, da nur dieser (im Gegensatz zu einem Diodenmesskopf) unabhängig von der Signalform den Effektivwert (als thermisches Äquivalent) des Signals anzeigt.

Anzeige bei CW-Signal [V/m]	Anzeige bei UMTS-Signal [V/m]
1,0	1,0
3,0	3,0
5,0	5,0
10,0	10,2
15,0	15,2

Tabelle II.4.10: Ergebnisse der Überprüfung der Modulationsabhängigkeit, Breitbandsonde EMR-300

Tabelle II.4.10 zeigt das Ergebnis des messtechnischen Vergleichs. Es kann festgehalten werden, dass die untersuchte Breitbandsonde EMR-300 in dem für Vorortmessungen üblichen Amplitudenbereich breitbandige UMTS-Signale amplitudenrichtig anzeigt.

Fazit:

Das in Deutschland sehr verbreitete im Arbeitsschutzbereich sowie u.a. zur orientierenden Messung an Basisstationen eingesetzte Breitbandmessgerät Narda EMR-300 zeigt trotz des im Messkopf verwendeten Diodengleichrichters UMTS-Basisstationssignale in einem für Vorortmessungen üblichen Amplitudenbereich (1 bis 15 V/m) amplitudenrichtig an. Offensichtlich wird vom Gerät sowohl die Breitbandigkeit des Signals, als auch der UMTS-typische Crestfaktor richtig verarbeitet. Der untersuchte Amplitudenbereich umfasst allerdings nicht diejenigen Feldstärken im Bereich von einigen 10 V/m, die z.B. bei Wartungsarbeiten vor laufender Antenne erreicht werden und für Arbeitsschutzmessungen relevant sind. Hierzu sind ergänzende Untersuchungen notwendig. Wegen der fehlenden Frequenzselektivität sowie Unsicherheiten bei der Extrapolation auf höchste betriebliche Anlagenauslastung (siehe auch Abschnitt II.4.12) sind Breitbandmessgeräte jedoch für detaillierte Messungen im Rahmen der Überprüfung der Einhaltung der Grenzwerte nur sehr bedingt geeignet.

II.4.5.2 Frequenzselektive Messung

II.4.5.2.1 Messzeit

Das thermische Wirkungsmodell, das den Grenzwertempfehlungen von ICNIRP zu Grunde liegt, fordert bei zeitlich schwankender Exposition eine zeitliche Mittelung, angepasst an die thermische Zeitkonstante des menschlichen Körpers. Es wird meist eine Mittelungszeit von sechs Minuten angegeben. Hierbei ist jedoch zwischen einer zeitlichen Schwankung der Signalleistung aufgrund der durch das Modulationsverfahren generierten Zeitstruktur des Signals und eventuell vorhandenen Leistungsschwankungen, verursacht z.B. durch unterschiedliche Auslastungen der Sendeanlagen, zu unterscheiden.

Zeitliche Schwankungen, verursacht durch das Modulationsverfahren, werden durch den Crestfaktor C beschrieben, der meist in dB angegeben wird und sich nach folgender Formel errechnet:

$$C = 20 \cdot \log (U_{\text{Peak}}/U_{\text{RMS}}) \quad (\text{II.4.2})$$

U_{Peak} : Maximal auftretende Signalamplitude

U_{RMS} : Effektivwert des Signals

Typische Crestfaktoren liegen etwa zwischen 5 dB (analoges TV) und 30 dB (Pulsradar). Signale von UMTS-Sendeanlagen besitzen einen Crestfaktor von typisch etwa 10 dB.

Aufgabe der Messtechnik ist es, bei derartigen Signalen den RMS-Wert zu liefern, also eine Größe, die einen Bezug zur mittleren thermischen Absorption herstellt. Erreicht werden kann dies durch spezielle Detektoren in den Spektrumanalysatoren („RMS-Detektor“), auf die später noch detailliert eingegangen wird, oder - wie bei Radarsignalen üblich - durch die Betrachtung des Zeitverlaufes: Mit Hilfe des Tastverhältnisses (Puls-Pausenverhältnis von Radarimpulsen) kann aus der gemessenen Pulsleistung auf die mittlere Leistung geschlossen werden.

Allerdings ist es bei beiden Verfahren nicht notwendig, eine Messzeit von sechs Minuten einzuhalten, da die mittlere Sendeleistung bereits nach wesentlich kürzeren Messzeiten (weniger als eine Sekunde) von den Geräten geliefert wird.

Zusätzlich vorhandene auslastungsabhängige Schwankungen müssen allerdings berücksichtigt werden, da die einschlägigen gesetzlichen Regelungen meist eine Bewertung der Exposition bei maximaler Leistungsabgabe der Quellen vorschreiben („Höchste betriebliche Anlagenauslastung“). Daher ist es notwendig, durch geeignete Verfahren aus dem aktuellen Messwert auf die größtmöglich auftretende Exposition hochzurechnen. Näheres dazu folgt später. Eine Beobachtung der Exposition über sechs Minuten vergrößert zwar die Wahrscheinlichkeit, dass nicht nur die minimale Immission bestimmt wurde, trotzdem bietet sie keine Gewähr, dass damit der „worst case“ erfasst wurde, da dieser möglicherweise nur relativ selten auftritt.

Denkbar wäre allenfalls, mittels Messungen über sechs Minuten und Mittelwertbildung über die zeitliche Folge der Messergebnisse eine gewisse zeitliche Glättung der schwankenden Exposition zu erhalten, was beispielsweise bei Langzeitexpositionsmessungen gelegentlich als Verfahren zur Datenreduktion angewendet wird.

Fazit:

Die Messzeit wird also im wesentlichen nur vom Analysator bestimmt. Sie muss nicht größer sein als die Zeit, die das Messgerät für die Bestimmung des RMS-Wertes benötigt.

Davon unabhängig ist natürlich die Zeit, die benötigt wird, um das räumliche Maximum im Messvolumen, beispielsweise mit der „Schwenkmethode“ zu finden. Auch sei hier nochmals auf den Zeitbedarf zur zuverlässigen „Max-Hold“-Erfassung bei Punktrastermessungen hingewiesen (siehe Abschnitt II.4.4.2).

II.4.5.2.2 Detektortyp

Zur Messung der mittleren Leistung bei rauschähnlichen Signalen, wie sie bei UMTS vorkommen, ist im Spektrumanalysator der RMS-Detektor unverzichtbar. Folgende beiden Bilder zeigen den Unterschied zwischen Average-, Peak- und RMS-Detektor an Hand einer spektralen Messung eines UMTS-Signals (thermische Leistung : -20 dBm), das von einem Vektor-Signalgenerator (SMIQ-3 von Rohde & Schwarz) generiert wurde (Mittenfrequenz: 2.112,8 MHz, Messbandbreite: 5 MHz).

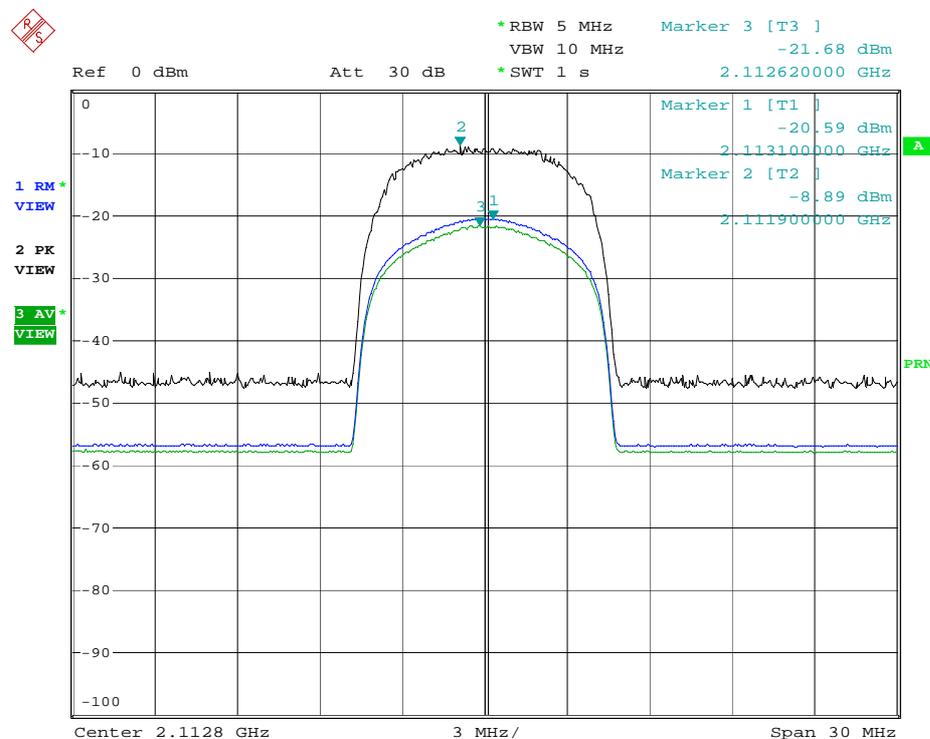


Bild II.4.11: Spektren eines UMTS-Signals, gemessen mit RMS-Detektor (blau), Peak-Detektor (schwarz) bzw. Average-Detektor (grün). Messgerät: ESPI-3 von Rohde & Schwarz.

In diesem Beispiel liefert der Peak-Detektor einen 11,7 dB höheren Messwert als der RMS-Detektor. Der Unterschied zwischen beiden Messungen entspricht in etwa dem Crestfaktor des Signals. Auch eine Messung mit dem in manchen Spektrumanalysatoren vorhandenen Average-Detektor führt nicht zum richtigen Ergebnis, sondern zu einer Unterbewertung von hier etwa 1,2 dB.

II.4.5.2.3 Sweep-time

Wie bereits erwähnt, zeigt der RMS-Detektor nur dann die mittlere Leistung an, wenn er den Mittelwert aus einer genügend großen Anzahl an Abtastwerten errechnen kann. Dies bedeutet, dass es bei sehr kurzen Sweepzeiten zu Messfehlern kommen kann. Dieser Sachverhalt wurde ebenfalls mit dem vom Generator simulierten UMTS-Signal untersucht. Bei eingeschaltetem RMS-Detektor und einer Messbandbreite von 5 MHz wurde die Sweepzeit variiert und die sich ergebenden Messergebnisse gleichzeitig am Schirm des Analysators dargestellt. Als Referenzwert wurde die mittlere Leistung des Signals vorher wieder mit einem thermischen Leistungsmesser zu -20 dBm bestimmt.

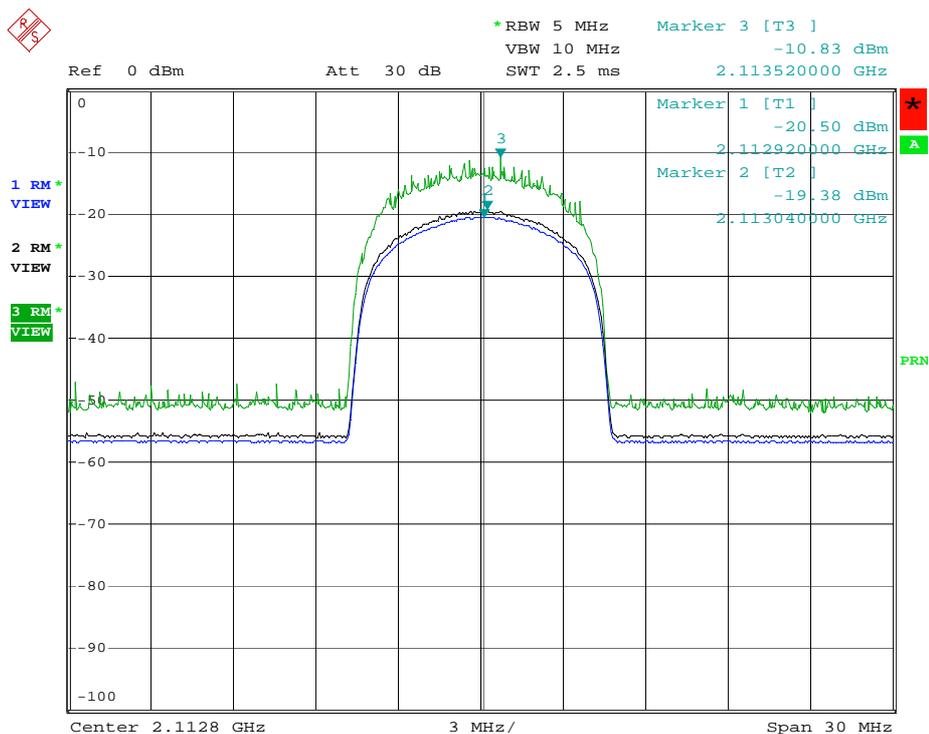


Tabelle II.4.12: Messung eines UMTS-Signals mit einer Sweepzeit von 2,5 ms (grün), 100 ms (schwarz) und 1 s (blau); Sonstige Einstellungen am Analysator (ESPI-3 von Rohde & Schwarz): RBW = 5 MHz, RMS-Detektor; Referenzwert: -20 dBm

Es zeigt sich also, dass zu kurze Sweepzeiten zu einer signifikanten Überbewertung der Immission führen. Die Ursache dafür liegt in der nicht ausreichend guten Mittelung aufgrund zu geringer Verweilzeit pro Pixel, so dass sich ein „Signalplateau“ ergibt, das nicht ausreichend geglättet ist, sondern noch eine signifikante Welligkeit mit kleineren „Spitzen“ besitzt. Die größte dieser „Spitzen“ wird dann durch den Marker (Max Peak) ausgelesen und als

Beurteilungswert herangezogen, was zur beobachteten Überbewertung führt (siehe grüne Kurve).

Am hier verwendeten Analysator sollten keine Sweepzeiten kleiner 100 ms bei der Messung mit dem RMS-Detektor gewählt werden. Bei anderen Modellen können sich auch andere Mindestsweepzeiten ergeben, da diese stark von den Geräteparametern (insbesondere Pixelanzahl und Abtastrate) abhängen. Der verwendete Analysator besitzt eine Abtastrate von 32 MHz. Es existieren auf dem Markt jedoch auch Modelle mit weniger als 1 MHz Abtastrate, so dass sich bei diesen Typen um mehr als den Faktor 30 geringere Samples pro Pixel einstellen, was gleichzeitig bedeutet, dass an derartigen Modellen (falls die Pixelanzahl bei beiden Geräten gleich ist) eine um den Faktor 30 größere Sweepzeit eingestellt werden müsste.

II.4.5.2.4 Auflösungsbreite (RBW)

Eine weitere zu klärende Fragestellung ergibt sich aus der Bandbreite des zu messenden Signals. Bei der spektralen Messung darf die RBW nicht kleiner sein als die Signalbandbreite, ansonsten ergibt sich eine Unterbewertung der Immission, da niemals die komplette Signalleistung das Zwischenfrequenzfilter passiert. Folgendes Bild zeigt das Spektrum des bereits vorher verwendeten UMTS-Testsignals, gemessen mit drei verschiedenen großen Auflösungsbreiten:

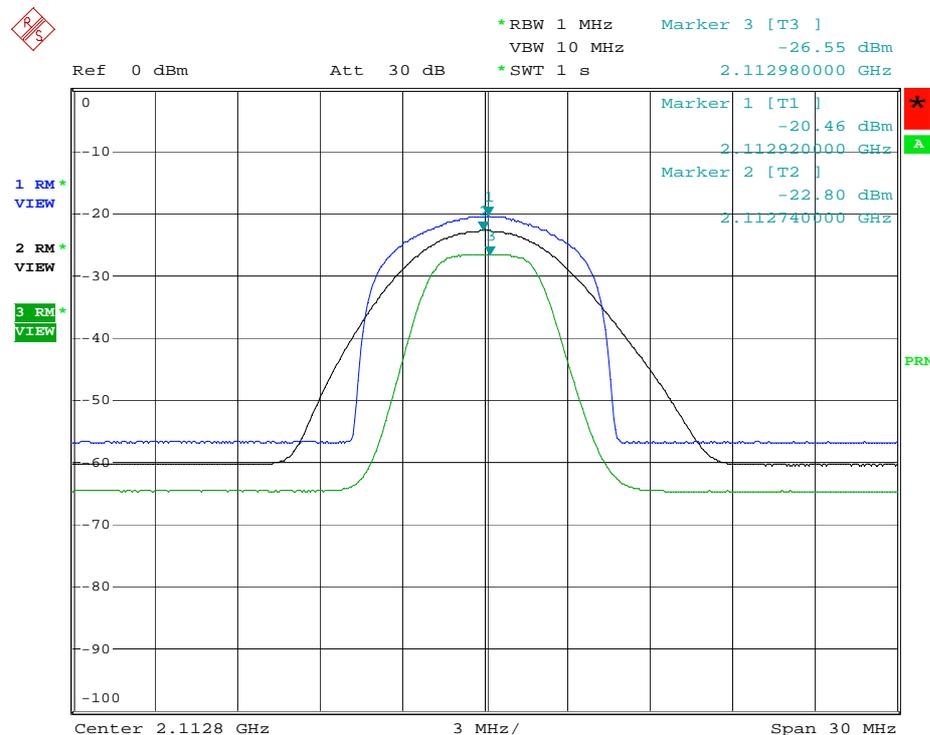


Bild II.4.13: Spektren eines UMTS-Signals, gemessen mit RBW = 1 MHz (grün), 3 MHz (schwarz) und 5 MHz (blau); RMS-Detektor, Sweepzeit: 1s; Referenzwert: -20 dBm

Bei der Messung breitbandiger Signale ist also eine ausreichend große RBW sicherzustellen. Allerdings sind bei vielen Analysatoren (insbesondere kleine, tragbare Modelle, die ansons-

ten sehr gut für Feldstärkemessungen im Freien geeignet sind) häufig keine so großen Auflösebandbreiten im Gerät realisiert (Notwendig wären etwa 4,5 bis 5 MHz). Es stellt sich daher die Frage, ob der Amplitudenverlust aufgrund der zu geringen RBW durch einen geeigneten Korrekturfaktor kompensiert werden kann. Der Korrekturfaktor K errechnet sich für den hier interessierenden Fall ($B_{\text{Signal}} \gg B_N$) mittels folgender Formel [RAU 00]:

$$K = 10 \cdot \log (B_{\text{Signal}} / B_N). \tag{II.4.3}$$

B_{Signal} ist dabei die Bandbreite des zu messenden Signals, während B_N die Rauschbandbreite des Zwischenfrequenzfilters darstellt. Bei den meisten Spektrumanalysatoren werden Gaussfilter verwendet, bei denen die Rauschbandbreite in erster Näherung der 3-dB-Bandbreite (RBW) des Filters entspricht. Obige Formel wird auch in der Messempfehlung der BNetzA zur Berechnung des Bandbreitenkorrekturfaktors vorgeschlagen.

Zur Überprüfung, ob obige Formel zuverlässige Korrekturfaktoren liefert, wurde eine Messreihe mit drei verschiedenen Spektrumanalysatoren (ESPI-3 bzw. FSH-3 von Rohde & Schwarz sowie dem SRM-3000 von Narda) durchgeführt. Beim ESPI-3 handelt es sich um ein typisches Mittelklasse-Laborgerät (Preis zirka 22.000,- €), während der FSH-3 zur Gruppe der preisgünstigen, batteriebetriebenen Portabelgeräte zählt (Preis zirka 6.000,- €). Das SRM-3000 ist ein speziell auf die Anforderungen der EMF-Messtechnik optimiertes Feldanalysatorsystem (Preis: je nach Ausstattung zirka 12.000,- bis 24.000,- €) Als Signalquelle diente wieder der SMIQ-3.

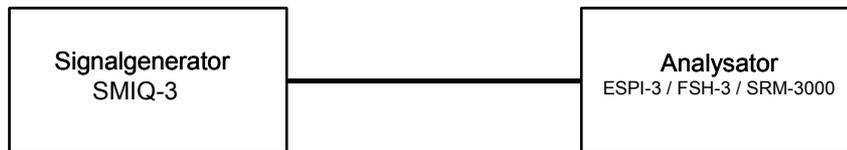


Bild II.4.14: Spektrale Messung eines künstlich erzeugten UMTS-Signals

Eingestellt wurde ein UMTS-Signal (Mittenfrequenz 2.112,8 MHz) mit einer Ausgangsleistung von -20 dBm (überprüft mit einem thermischen Leistungsmesser). Die digitale Modulation wurde so eingestellt, dass neben den Signalisierungssignalen auch 16 Verkehrskanäle vorhanden sind („Testmodell 3“). Gemessen wurde anschließend mit RMS-Detektor, Max-Hold und verschiedenen Auflösebandbreiten (Sweepzeit: 200 ms). Für die Berechnung des Korrekturfaktors wurde eine Signalbandbreite von 4 MHz angenommen. Die Ergebnisse der Messreihe sind in folgender Tabelle wiedergegeben:

RBW	Messwert ESPI-3	Messwert FSH-3	Messwert SRM-3000	Korrekturfaktor K	Korrigierter Messwert ESPI-3	Korrigierter Messwert FSH-3
300 kHz	-29,4 dBm	-30,5 dBm	-19,6 dBm	11,2 dB	-18,2 dBm	-19,3 dBm
1 MHz	-24,5 dBm	-25,4 dBm	-14,1 dBm	6,0 dB	-18,5 dBm	-19,4 dBm
2 MHz	-22,1 dBm	-	-13,8 dBm	3,0 dB	-19,1 dBm	-
3 MHz	-19,9 dBm	-	-12,8 dBm	1,2 dB	-18,7 dBm	-
5 MHz	-19,0 dBm	-	-12,2 dBm	0 dB	-19,6 dBm	-

Tabelle II.4.11: Messung eines UMTS-Signals mit unterschiedlicher Auflösungsbreite (RBW)

Die Verwendung des Korrekturfaktors ist also offensichtlich eine geeignete Methode zur Kompensation des Messfehlers bei zu geringer Bandbreite des verwendeten ZF-Filters, allerdings nur dann, wenn die RBW nicht zu klein ist. Daher sollte immer die größte im Gerät vorhandene RBW gewählt werden, so dass sich ein möglichst kleiner Korrekturwert ergibt. Wie im folgenden gezeigt wird, unterliegt der Korrekturfaktor bei realen Feldstärkemessungen allerdings einer nicht zu vernachlässigenden Unsicherheit.

Eine weitere Erkenntnis kann aus obiger Tabelle gewonnen werden: Die Messergebnisse des SRM-3000 fallen durchwegs um 7 bis 10 dB zu hoch aus (daher wurde auch auf die korrigierte Darstellung in obiger Tabelle verzichtet). Versucht man also, mit diesem Gerät im spektralen Mode mittels Geräteeinstellungen, wie sie für die „Schwenkmethode“ notwendig sind („Max-Hold“) ein UMTS-Signal zu messen, ergibt sich ein Ergebnis, das nicht dem RMS-Wert entspricht.

Später wird allerdings noch gezeigt, dass beim SRM eine andere Betriebsart eingestellt werden muss, um brauchbare Ergebnisse bei einer frequenzselektiven Erfassung von UMTS-Signalen zu erhalten.

Zusätzlich zur leitungsgebundenen Analyse wurde noch eine Vorortmessung im Gelände durchgeführt. Es wurden wieder der Spektrumanalysator ESPI-3 von Rohde & Schwarz eingesetzt. Das UMTS-Signal wurde mit einer Log-Per-Antenne gemessen (Schwenkmethode), das nicht von einer realen Station abgegeben wurde, sondern von einer simulierten Sendeanlage (Vektorsignalgenerator plus Endstufe plus Sendeantenne) generiert wurde, damit nicht auslastungsabhängige Schwankungen der Sendeleistung der realen Station die Messergebnisse verfälschen. Verwendet wurde der gleiche Aufbau wie bereits in Abschnitt II.4.4 beschrieben. Gewählt wurde zwei verschiedene Messpunkte, so dass wiederum ein LOS- und ein NLOS-Szenario verglichen werden kann.



Bild II.4.15: Livemessung von UMTS-Signalen

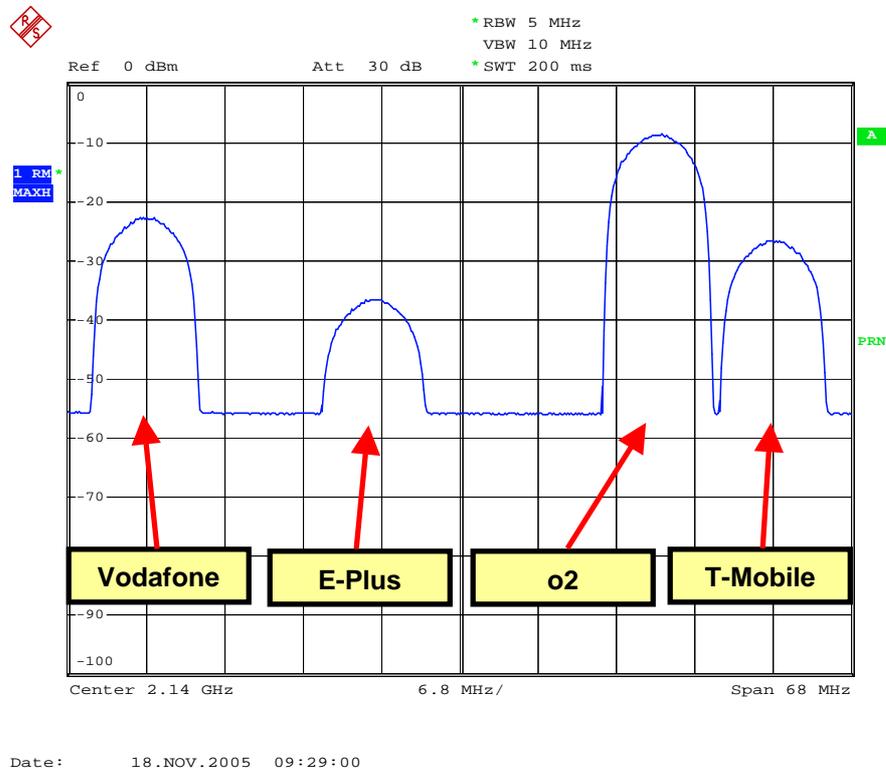
Die Abstände zwischen Messpunkt und Sendeantenne betragen 63 (LOS) bzw. 80 Meter (NLOS). Zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit wurde jede Messung drei mal wiederholt. Es ergaben sich dabei die folgenden Resultate:

Szenario	RBW	Messung 1 [dBm]	Messung 2 [dBm]	Messung 3 [dBm]	Mittelwert [dBm]	Differenz zum Referenzwert (5 MHz)	Spannweite [dB]
LOS	5 MHz	-42,3	-42,4	-42,2	-42,3	0 (Referenz)	0,2
LOS	3 MHz	-42,3	-41,6	-41,7	-41,8	0,5	0,7
LOS	1 MHz	-41,9	-41,5	-42,5	-41,9	0,4	1,0
LOS	0,3 MHz	-41,7	-42,1	-42,0	-41,9	0,4	0,4
NLOS	5 MHz	-51,8	-52,8	-52,3	-52,3	0 (Referenz)	1,0
NLOS	3 MHz	-52,3	-51,6	-51,6	-51,8	0,5	0,7
NLOS	1 MHz	-51,4	-51,1	-51,8	-51,4	0,9	0,7
NLOS	0,3 MHz	-50,8	-48,8	-49,7	-49,7	2,6	2,0

Tabelle II.4.12: Live-Messung eines UMTS-Signals an zwei unterschiedlichen Messpunkten mit unterschiedlicher Auflösungsbreite (RBW); RMS-Detektor. Der Bandbreitenkorrekturfaktor (Signalbandbreite: 4 MHz) wurde bereits berücksichtigt.

Die Reproduzierbarkeit verschlechtert sich bei nicht vorhandener Sichtverbindung offensichtlich etwas im Vergleich zum Punkt mit Sicht (etwas größere Spannweite der Messergebnisse). Zu kleine Auflösungsbreiten sollten vermieden werden, da dies zumindest bei nicht vorhandener Sichtverbindung zu größeren Messunsicherheiten führt. Der Grund für diese Verschlechterung liegt hauptsächlich in der Tatsache begründet, dass es durch die schmalbandige Erfassung eines breitbandigen Signals zu frequenzselektiven Überhöhungen im Spektrum kommt (konstruktive Interferenz der vorhandenen Mehrwegesignale), die aufgrund der „Max-Hold“-Auswertung des Spektrums zu einer Überbewertung der vorhandenen Immission führen.

Ein weiteres Problem bei der spektralen Messung von UMTS-Signalen kann in der Zukunft noch verstärkt auftreten: Derzeit nutzen die Betreiber meist nur einen ihrer beiden zugeteilten Frequenzkanäle, so dass sich bei Messungen an Punkten in der unmittelbaren Nähe von Standorten aller vier Betreiber beispielsweise das in Bild II.4.16 dargestellte spektrale Bild ergeben kann. Zu sehen sind vier Signale mit unterschiedlicher Amplitude und unterschiedlichem Abstand zu einander. Werden zukünftig auch die zweiten Frequenzen genutzt, so werden vier weitere Signale auf diesem Bild erscheinen, die unmittelbar an die bereits vorhandenen angrenzen. Mit einer Messbandbreite von 5 MHz, die ja für die leistungsrichtige Erfassung sehr günstig ist, ergeben sich dann Signalüberlappungen, die zum einen zu einer schwierigeren Auswertung des Spektralbildes und andererseits zu Überbewertungen aufgrund von Übersprechen führen können. Beispielsweise würde die Aktivierung der zweiten Frequenz von T-Mobile (Mittenfrequenz: 2.162,3 MHz) zu einem zusätzlichen Signal genau zwischen den derzeit vorhandenen Signalen von T-Mobile (Mittenfrequenz: 2.167,2 MHz) und o2 (Mittenfrequenz: 2.157,2 MHz) führen.



Date: 18.NOV.2005 09:29:00

Bild II.4.16: Livemessung von UMTS-Signalen (spektral)

II.4.5.2.5 Kanalleistungsmessung

Schließlich muss noch untersucht werden, ob das alternative Messverfahren „Kanalleistungsmessung“ („Channel-Power Measurement“) Resultate liefert, die der mittleren Signalleistung entsprechen.

Kanalleistungsmessungen sind in vielen modernen Geräten als spezielle Messverfahren vordefiniert. Die Anzeige des Analysators bei einer derartigen Messung hat etwa das folgende Aussehen:



Bild II.4.17: Kanalleistungsmessung mit einem Spektrumanalysator

Für korrekte Messergebnisse ist auch hier der RMS-Detektor notwendig. Die Bandbreite, über welche die Kanalleistungsmessung (Integration) durchgeführt wird, kann typischerweise mit Markern am Gerät eingestellt werden (siehe senkrechte rote Linien in Bild II.4.11). Für eine korrekte Kanalleistungsmessung ist eine Messbandbreite notwendig, die der Bandbreite des Signals entspricht, also etwa 4 bis 4,5 MHz.

Auch die Kanalleistungsmessung wurde mit einer kleinen Messreihe näher untersucht. Es wurden wiederum drei verschiedene Geräte (ESPI-3, FSH-3, SRM-3000) verglichen. Gemessen wurde wiederum das oben bereits beschriebene Ausgangssignal eines Signalgenerators mit einer mittleren Leistung von -20 dBm. Untersucht werden sollte, ob eine Auflösungsbandbreite (RBW) von 300 kHz (d.h. etwas weniger als 10 Prozent der Signalbandbreite, was beispielsweise in [SCH 06] für die Kanalleistungsmessung von rauschähnlichen DVB-T- und DAB-Signalen empfohlen wird), für die Kanalleistungsmessung geeignet ist.

Die Messergebnisse sind in folgender Tabelle dargestellt:

Messwert ESPI-3 [dBm]	Messwert FSH-3 [dBm]	Messwert SRM-3000 [dBm]	Messwert SRM-3000, Betriebsart „Safety-Evaluation“ [dBm]
-19,0	-20,2	-10,4	-20,6

Tabelle II.4.13: Messung eines UMTS-Signals mit der Betriebsart „Kanalleistungsmessung“ (RBW = 300 kHz; Sweeptime: 200 ms; RMS-Detektor)

Die Auswertung von Tabelle II.4.13 bringt folgende Erkenntnisse:

- Das Verfahren der „Kanalleistungsmessung“ ist grundsätzlich für die Bestimmung der mittleren Leistung geeignet.
- Eine RBW von etwa zehn Prozent der Signalbandbreite ist ein guter Kompromiss aus Auflösung und Messgeschwindigkeit. Mit dieser Bandbreite sind auch noch ausreichend kurze Sweepzeiten (um 100 ms) möglich, ohne dass es zu Ungenauigkeiten bei der Errechnung des RMS-Wertes kommt.
- Das SRM-3000 liefert auch in der Betriebsart „Kanalleistungsmessung“ bei Geräteeinstellungen, wie sie für die Durchführung der „Schwenkmethode“ üblich sind („Max-Hold“) einen Messwert, der nicht der RMS-Leistung entspricht.

Die Kanalleistungsmessung stellt also eine durchaus brauchbare Alternative zur spektralen Messung breitbandiger Signale dar. Das Problem der nicht verfügbaren ausreichend breiten ZF-Filter, wie sie bei der spektralen Messung bei manchen Geräten auftritt, ist in der Betriebsart „Kanalleistungsmessung“ nicht gegeben.

Allerdings hat dieses Messverfahren einen erheblichen praktischen Nachteil: Es kann immer nur ein Signal gemessen werden, während bei einer spektralen Messung durch Darstellung eines entsprechend großen Frequenzbereichs (natürlich innerhalb der gerätebedingten Auflösungsgrenzen) gleich mehrere digitale Emissionen erfasst werden können. Im schlimmsten Fall müssten zur Erfassung der acht UMTS-Kanäle jeweils auch acht „Channel-Power“-Einzelmessungen durchgeführt werden, während bei der spektralen Messung eine Einzelmessung (siehe Bild II.4.16) ausreichend ist. Daher ist die spektrale Messung der Kanalleistungsmessung in vielen Fällen vorzuziehen.

Das bereits erwähnte EMF-Messgerät SRM-3000 von Narda bietet allerdings eine neuartige Art der Kanalleistungsmessung an, bei der in einem Messdurchgang gleichzeitig mehrere frei definierbare Bänder durch Integration leistungsrichtig gemessen werden können, so dass der gesteigerte Zeitbedarf als Nachteil der Kanalleistungsmessung entfällt. Diese Betriebsart wird bei diesem Gerät „Safety-Evaluation“ genannt [KEL 05].

Wie aus der rechten Spalte von Tabelle II.4.13 ersichtlich, liefert die Betriebsart „Safety-Evaluation“ (im Gegensatz zur spektralen Messung und zur Kanalleistungsmessung) beim SRM-3000 in der Tat den RMS-Wert.

Die Zuverlässigkeit des Verfahrens wurde zusätzlich mit einer Livemessung eingehend untersucht. An den oben bereits vorgestellten beiden Messpunkten wurde neben den spektralen auch Kanalleistungsmessungen durchgeführt (Schwenkmethode). Um auch Aussagen über die Reproduzierbarkeit (Spannweite der Messergebnisse) zu erhalten, wurde jede Messung drei mal wiederholt.

Als Referenz diente wieder eine spektrale Messung mit dem ESPI-3 mit einer Auflösungsbandbreite von 5 MHz. Anschließend wurde mit dem gleichen Analysator eine Kanalleistungsmessung mit einer RBW von 0,3 MHz wiederholt. Zum Schluss fand eine Messung mit dem „Safety-Evaluation“-Mode des SRM-3000 statt. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle wiedergegeben:

Szenario	Spektrale Referenzmessung mit RBW = 5 MHz	Kanalleistungsmessung mit RBW = 0,3 MHz		„Safety Evaluation“ mit SRM-3000	
		Spannweite der drei Messungen	Differenz zur Referenzmessung	Spannweite der drei Messungen	Differenz zur Referenzmessung
LOS	-42,3 dBm	0,9 dB	-1,8 dB	0,3 dB	-2,6 dB
NLOS	-52,3 dBm	0,5 dB	-2,8 dB	3,5 dB	-3,4 dB

Tabelle II.4.14: Vergleich: Spektrale Messung, Kanalleistungsmessung und „Safety-Evaluation“

Im Vergleich zur Referenzmessung liefern Kanalleistungsmessung und „Safety-Evaluation“ tendenziell niedrigere Messwerte, insbesondere bei nicht vorhandener Sicht. In diesem Fall unterscheiden sich die Messergebnisse in der Betriebsart „Safety-Evaluation“ bezüglich Absolutwert und Streubreite um etwa 3 dB von der spektralen Messung. Die Kanalleistungsmessung zeigt nicht ganz so starke Unterschiede. Bei der Messung von ähnlich strukturierten Signalen (DAB, DVB-T) wurde in [SCH 06] eine bessere Übereinstimmung von spektraler Messung und „Safety-Evaluation“ auch bei Messungen im realen Umfeld festgestellt (Abweichungen maximal 1 dB). Es kann daher nicht sicher gesagt werden, ob die hier festgestellten etwas höheren Abweichungen wirklich durch das Messprinzip bzw. das Messgerät, oder eine eventuell vorhandene stark inhomogene Feldverteilung verursacht wurden.

Fazit:

Für die spektrale Messung von UMTS-Signalen müssen folgende Punkte besonders beachtet werden:

- Die Messungen sind mit dem RMS-Detektor durchzuführen. Der Peak-Detektor führt zu einer Überbewertung der mittleren Immission um etwa die Größenordnung des Crestfaktors. Je nach verwendetem Messgerät ist auf eine ausreichend große Sweeptime zu achten, da der RMS-Detektor bei zu kleinen Sweepzeiten zu große Messergebnisse liefert.
- Eine an die Signalbandbreite angepasste RBW ist einzustellen. Stehen derart große Auflösebandbreiten am Messgerät nicht zur Verfügung, kann auch mit der höchsten verfügbaren Bandbreite gemessen werden und eine Ergebniskorrektur mittels der in der Empfehlung der BNetzA [RegTP 03] angegebenen Korrekturformel durchgeführt werden. Allerdings ist in diesem Fall mit einer Zunahme der Messunsicherheit zu rechnen.
- Die „Kanalleistungsmessung“ ist bei korrekter Einstellung der RBW und der Sweeptime als alternative Messmethode ebenso geeignet. Der Zeitaufwand für die Erfassung der einzelnen Signale ist bei den meisten Geräten gegenüber der spektralen Messung deutlich höher. Allerdings sind seit kurzem Messgeräte verfügbar, die eine echte Kanalleistungsmessung gleichzeitig für mehrere frei definierbare Frequenzbereiche korrekt und schnell durchführen, so dass der Nachteil des größeren Zeitbedarfs entfällt. Allerdings zeigt sich auch bei der Kanalleistungsmessung in realen Szenarien, insbesondere bei fehlender Sichtverbindung, der Trend zu einer Fehlbewertung der Immission, der durch einen zusätzlichen Unsicherheitsfaktor berücksichtigt werden sollte.

II.4.5.3 Codeselektive Messung

Zwei wichtige Nachteile der breitbandigen bzw. frequenzselektiven Messung von UMTS-Signalen können durch die codeselektive Messtechnik beseitigt werden. Codeselektive Messgeräte ermöglichen es, die Immission verschiedener Anlagen bzw. unterschiedlicher Sektoren anhand der verwendeten Scramblingcodes voneinander zu trennen. Außerdem ist es damit möglich, Messungen im Livebetrieb einer UMTS-Station durchzuführen (d.h. bei permanent schwankender Immission aufgrund nicht konstanter Verkehrslast) und trotzdem zuverlässig auf die höchste betriebliche Anlagenauslastung hochrechnen zu können. Mittels der codeselektiven Messtechnik kann die Immission gemessen werden, die allein vom primären CPICH-Signal erzeugt wird. Aus der Immission, verursacht durch das CPICH-Signal, sowie dem Verhältnis CPICH-Leistung zu maximaler Leistung der Station, kann auf die Immission bei höchster betrieblicher Anlagenauslastung hochgerechnet werden.

Derzeit gibt es zwei Arten von codeselektiven Messgeräten: Zum einen können Spektrumanalysatoren, die mit einer speziellen W-CDMA Dekodierungssoftware ausgerüstet sind, verwendet werden, wie es zum Beispiel im SRM-3000 von Narda realisiert ist. Eine andere Möglichkeit sind separate Messgeräte, sog. Drivetester, die üblicherweise bei Versorgungsmessungen eingesetzt werden. Ein Beispiel für ein solches separates Messsystem (Radio Network Analyser „TSMU“ und Laptop mit Steuerungssoftware) ist in Bild II.4.18 dargestellt. Die Ergebnisdarstellung bei codeselektiver Messung unterscheidet sich deutlich von dem Anzeigebild eines Spektrumanalysators, die Resultate der Messung werden üblicherweise alphanumerisch dargestellt. Ein Beispiel für ein derartiges Display findet sich in Bild II.4.19.



Bild II.4.18: Portables, codeselektives UMTS-Messsystem (mit TSMU und Steuerrechner), Firma Rohde & Schwarz

Battery: [REDACTED] Ant: 3AX 75M-3G					Fcent
Mode: UMTS P-CPICH Dem. Cbl:					
Meas.Range: 2.25 V/m Std:					
Ind.	Scr.	Value	Max.Value	Cell Name	Table Reset
1	138	0.000 $\mu\text{V}/\text{m}$	1.564 mV/m		
2	182	2.752 mV/m	4.179 mV/m		
3	198	0.000 $\mu\text{V}/\text{m}$	9.278 mV/m		
4	213	5.150 mV/m	26.52 mV/m	Tower North 2	
5	293	5.977 mV/m	40.74 mV/m		Max Reset
					Meas. Range
Total		8.356 mV/m	49.05 mV/m		
Analog		13.12 mV/m	67.10 mV/m		
Isotropic Result					
SENSITIVE		Fcent: 2.167 2 GHz	Process Time: 1.922 s		
		Result: ACT	No. of Runs: 68		

Bild II.4.19: Typische Ergebnisdarstellung einer codeselektiven Messung (hier wurden bei einer isotropen Messung fünf Signale auf der Trägerfrequenz 2.167,2 MHz festgestellt)

In der tabellarischen Ergebnisdarstellung findet sich, neben den Scramblingcodenummern (Ziffern zwischen 0 und 511), der aktuelle Messwert (hier als elektrische Feldstärke angegeben) sowie der bisher gefundene Maximalwert (Hier aus bisher 68 Messungen). Automatisch bildet die Software die quadratische Summe aus den Feldstärkewerten („Total“). Zusätzlich wird als „Analog“-Wert noch die gesamte gemessene Leistung in diesem Frequenzkanal dargestellt, die sowohl die CPICH-Leistung als auch die Anteile der anderen Signalisierungssignale und eventuell vorhandenen Verkehrskanäle enthält. Der Analogwert ist also immer größer als der „Total“-Wert, der Unterschied zwischen beiden Werten schwankt mit der Auslastung der Station.

Der Bediener eines codeselektiven Messgerätes hat als einzigen veränderbaren Einstellparameter die Messrate zur Verfügung. Bei vielen Systemen lässt sich zwischen einer langsamen (genauen) Erfassung und einer schnellen (weniger genauen Erfassung) umschalten. Zusätzlich lässt sich bei einigen Systemen eine Art „Übersichtsmessung“ definieren, bei der zunächst der gesamte UMTS-Frequenzbereich abgescannt wird und alle nennenswert vorhandenen Signale aller Betreiber mit ihren Scramblingcodenummern aufgelistet werden. Allerdings dient diese Betriebsart nur der Übersicht, die Resultate basieren typischerweise auf zu wenigen Einzelmessungen, so dass die Absolutwerte zu ungenau sind. Hilfreich ist dieser Mode allerdings bei der Identifikation der am Messpunkt dominierenden Signale, die anschließend in einem zweiten Durchgang genau gemessen werden. Diese genaue Erfassung wird üblicherweise für jede Trägerfrequenz separat durchgeführt, so dass sich, ähnlich wie bei der Kanalleistungsmessung, bis zu acht Einzelmessungen ergeben können, was natürlich insbesondere bei der Schwenkmethode einen gewissen Zeitaufwand bedeutet.

Um einen Eindruck zu gewinnen, mit welchen absoluten Unterschieden zwischen langsamer und schneller Betriebsart zu rechnen ist, wurde auch für die codeselektive Erfassung zunächst eine leitungsgeführte Messung mit dem Vektorsignalgenerator SMIQ-3 durchgeführt. Als Testsignal diente wieder ein standardisiertes Testmodell („Testmodell 3“), so dass für die

codeselektive Messung die Synchronisation und die Pegelmessung des P-CPICH möglich wird. Als Trägerfrequenz wurde 2.112,8 MHz gewählt, der gesamte Signalpegel wurde mit einem thermischen Leistungsmesser auf -20 dBm eingestellt, die Leistung des P-CPICH beträgt -29 dBm. Untersucht wurden drei verschiedene UMTS-Messsysteme, die oben bereits erwähnten Systeme mit der Software RFEX und dem Analysator TSMU von Rohde & Schwarz sowie das SRM-3000 von Narda, die beide sowohl eine langsame als auch eine schnelle Betriebsart besitzen. Nach Herstellerangabe kann bei der langsamen Betriebsart mit einem genaueren Messergebnis sowie einer etwas gesteigerten Empfindlichkeit gerechnet werden. Diese beiden Systeme sind derzeit die am häufigsten für EMF-Messungen eingesetzten codeselektiven Messgeräte. Zusätzlich stand noch ein System zur Verfügung, das ebenfalls von der Software RFEX gesteuert wurde, als Empfänger jedoch einen Spektrumanalysator (ESPI-3 von Rohde & Schwarz) benützt. Dieses System besitzt jedoch nur eine Betriebsart.

Bevor auf die Resultate der Messungen eingegangen wird, soll im folgenden verglichen werden, wie viele Messungen pro Sekunde von den Systemen in den verschiedenen Betriebsarten durchgeführt werden. Diese Information ist insbesondere sehr wichtig für die korrekte Durchführung der „Schwenkmethode“, denn die Bewegungsgeschwindigkeit der Messantenne muss an die Häufigkeit der Probenahme angepasst werden, um eine Unterabtastung des Messvolumens zu verhindern. Die in folgender Tabelle angegebenen Messraten beziehen sich auf eine einachsige Messung. Wird die Erfassung mit einer Isotropsonde durchgeführt, sind die Messraten aufgrund der sequenziellen Erfassung der drei Polarisationsrichtungen um mindestens den Faktor drei zu verringern (drei Einzelmessungen plus Rechenzeit).

TSMU (fast)	TSMU (slow)	SRM-3000 (fast)	SRM-3000 (slow)	ESPI-3 (fast)
ca. 11 Messungen/s	ca. 8 Messungen/s	ca. 3 Messungen/s	ca. 3 Messungen/s	ca. 8 Messungen/s

Tabelle II.4.15: Erreichbare Messraten mit den hier untersuchten Systemen (Einachsige Messung)

Beim SRM-3000 lässt sich kein deutlicher Unterschied bezüglich der Messrate zwischen den beiden Betriebsarten feststellen. Im Vergleich zum System mit dem TSMU ist bei einer Erfassung mit dem SRM jedoch etwas mehr Zeit für die Maximalwertsuche im Volumen anzusetzen, da aufgrund der niedrigeren Messgeschwindigkeit die manuelle Abtastung des Volumens langsamer erfolgen muss. Erfahrungen aus einer Vielzahl von in den letzten Monaten durchgeführten Messungen mit diesen beiden Systemen zeigen, dass beispielsweise die Maximalwertsuche in einem typischen Wohnraum mit der Schwenkmethode und den langsamen Betriebsarten nach etwa 30 bis 60 Sekunden abgeschlossen ist. Hilfreich ist dabei bei beiden Systemen die dafür unabdingbare „Max-Hold“-Funktion, verbunden mit der aktuellen Messwertanzeige, so dass relativ einfach erkannt werden kann, wenn sich der Maximalwert nicht mehr nennenswert verändert.

Folgende Tabelle stellt nun die Ergebnisse der codeselektiven Messungen mit den verschiedenen Systemen und Betriebsarten vergleichend gegenüber. Dabei wurde die Messung nicht nur bei dem Startpegel des P-CPICH von -29 dBm durchgeführt, sondern das UMTS-Signal wurde in 10 dB-Schritten abgeschwächt, so dass sich bei korrekter Messung auch Resultate

ergeben müssen, die ebenfalls in 10 dB-Schritten abnehmen. Die Dämpfung wurde so lange erhöht, bis die Decodierung versagte. Der letzte angegebene Wert stellt also auch in etwa die Empfindlichkeitsgrenze der Messsysteme dar.

CPICH-Pegel [dBm]	TSMU (fast) [dBm]	TSMU (slow) [dBm]	SRM-3000 (fast) [dBm]	SRM-3000 (slow) [dBm]	ESPI-3 [dBm]
-29	-32,4 (-3,4)	-29,1 (-0,1)	-31,9 (-2,9)	-28,8 (+0,2)	-29,3 (-0,3)
-39	-44,1 (-5,1)	-39,0 (0)	-41,8 (-2,8)	-40,9 (-1,9)	-38,4 (+0,6)
-49	-53,7 (-4,7)	-49,0 (0)	-51,9 (-2,9)	-51,0 (-2,0)	-48,0 (+1,0)
-59	-62,2 (-3,2)	-59,1 (-0,1)	-61,0 (-2,0)	-59,9 (-0,9)	-57,7 (+1,3)
-69	-73,2 (-4,2)	-69,3 (-0,3)	-71,2 (-2,2)	-71,1 (-2,1)	-68,2 (+0,8)
-79	-82,7 (-3,7)	-79,2 (-0,2)	-81,1 (-2,1)	-81,0 (-2,0)	-78,5 (+0,5)
-89	-93,8 (-4,8)	-89,2 (-0,2)	-91,3 (-2,3)	-91,0 (-2,0)	-88,0 (+1,0)
-99	-	-	-100,9 (-1,9)	-100,5 (-1,5)	-98,6 (+0,4)

Tabelle II.4.16: Ergebnisse der codeselektiven Messung mit den untersuchten Messsystemen (Die Werte in Klammern geben die Differenz der gemessenen CPICH-Leistung im Vergleich zum eingestellten Wert in dB an.

Ein Vergleich der verschiedenen Messergebnisse liefert folgende Erkenntnisse:

- Die deutlich besten Messergebnisse in Bezug auf Absolutwert und Linearität liefert eindeutig das System mit TSMU im langsamen Mode. Die festgestellte Abweichung liegt hier bei etwa 0,2 dB.
- Dafür neigt das System im schnellen Mode zu einer deutlichen Unterbewertung des Immission (etwa 3 bis 5 dB). Auch die Linearität ist deutlich schlechter, offensichtlich unterliegen die Messwerte einer größeren statistischen Schwankung als im langsamen Mode.
- Zwischen diesen beiden Extremfällen liegen die Ergebnisse des Systems mit dem ESPI-3. Hier ergeben sich Abweichungen von maximal 1,3 dB zum Referenzwert.
- Auch das SRM liefert Ergebnisse die zwischen den beiden Extremfällen des TSMU-Systems liegen (maximale Abweichungen: 2,9 dB im schnellen und 2,1 dB im langsamen Mode).
- Allerdings könnten die Differenzen, die sich beim SRM und beim ESPI ergeben, durch einen geeigneten Korrekturfaktor noch deutlich reduziert werden. Hier ist offensichtlich eine systematische Abweichung vom eingespeisten Leistungswert feststellbar, die möglicherweise durch die unterschiedlichen Werkskalibrierungen bedingt sind.
- Die Empfindlichkeit des TSMU-Systems ist etwas geringer als die der anderen untersuchten Systeme.

Im Anschluss an die leitungsgebundenen Messungen wurden Untersuchungen zur codeselektiven Erfassung im bereits in Abschnitt II.4.5.2.4 vorgestellten Szenario mit der provisorisch errichteten UMTS-Antenne durchgeführt. Gemessen wurde wieder an den beiden in Bild II.4.15 gezeigten Szenarien (LOS bzw. NLOS) und zwar mit allen drei verfügbaren Messsystemen. Es ergaben sich dabei die in folgenden Tabellen angegebenen Resultate:

LOS-Szenario:

Messsystem (Mode)	Messung 1 [dBm]	Messung 2 [dBm]	Messung 3 [dBm]	Mittelwert [dBm]	Spannweite [dB]	Differenz zum Referenzwert [dB]
TSMU (slow)	-52,6	-53,1	-53,0	-52,9	0,5	0,0
TSMU (fast)	-51,8	-51,6	-52,1	-51,8	0,5	1,1
SRM-3000 (slow)	-53,7	-53,3	-53,6	-53,5	0,4	-0,6
SRM-3000 (fast)	-54,0	-54,0	-54,2	-54,1	0,2	-1,2
ESPI-3	-52,6	-53,5	-52,6	-52,9	0,9	0,0

Tabelle II.4.17: Ergebnisse der codeselektiven Messung des Signals einer simulierten UMTS-Anlage mit den untersuchten Messsystemen (LOS-Szenario). Als Referenzwert wurde das Ergebnis der Messung mit dem TSMU (slow) verwendet.

Interessant ist in diesem Zusammenhang auch ein Vergleich mit den Ergebnissen der spektralen Messung an diesem Punkt. Wie in Tabelle II.4.12 dokumentiert, ergab sich bei spektraler Erfassung mit einer RBW von 5 MHz ein Wert von -42,3 dBm für die gesamte Empfangsleistung. Aufgrund der Parameter des Signals (CPICH liegt 9 dB unterhalb der Gesamtleistung) resultiert daraus ein Messwert für die CPICH-Leistung von -51,3 dBm. Die Ergebnisse der codeselektiven Messung stimmen also relativ gut mit diesem Wert überein (Unterschied zur langsamen Messung mit dem TSMU: 1,6 dB).

NLOS-Szenario:

Messsystem (Mode)	Messung 1 [dBm]	Messung 2 [dBm]	Messung 3 [dBm]	Mittelwert [dBm]	Spannweite [dB]	Differenz zum Referenzwert [dB]
TSMU (slow)	-63,0	-63,4	-62,8	-63,1	0,6	0,0
TSMU (fast)	-67,8	-67,6	-68,1	-67,8	0,5	-4,7
SRM-3000 (slow)	-64,5	-64,3	-64,2	-64,3	0,3	-1,2
SRM-3000 (fast)	-64,2	-64,8	-64,9	-64,6	0,7	-1,5
ESPI-3	-65,4	-64,8	-64,2	-64,8	1,2	-1,7

Tabelle II.4.18: Ergebnisse der codeselektiven Messung des Signals einer simulierten UMTS-Anlage mit den untersuchten Messsystemen (NLOS-Szenario). Als Referenzwert wurde das Ergebnis der Messung mit dem TSMU (slow) verwendet.

Der Vergleich mit der frequenzselektiven Messung aus Tabelle II.4.16 liefert einen Wert für die CPICH-Leistung von -61,3 dBm: Im Vergleich mit der langsamen Messung des TSMU ergibt sich ein Unterschied von 1,8 dB.

In beiden Szenarien ist eine gute Reproduzierbarkeit zu beobachten. Die Spannweite bei jeweils dreimaliger Wiederholung der Messungen beträgt maximal etwa 1 dB. Bezüglich der absoluten Größe der Messergebnisse bestätigen sich die Ergebnisse der leitungsgebundenen Messungen aus Tabelle II.4.16: Die schnelle Betriebsart liefert größerer Abweichungen vom Referenzwert, insbesondere im NLOS-Szenario. Auch die leichte systematische Abweichung beim SRM-3000 ist wieder zu beobachten.

Im nächsten Schritt müssen die drei betrachteten Systeme auch ihre Tauglichkeit bei Messungen an realen UMTS-Stationen unter Beweis stellen. Zusätzlich soll der Einfluss der Geschwindigkeit der Antennenbewegung bei der Schwenkmethode auf das Resultat der Messung studiert werden. Dazu wurden wiederum zwei Szenarien im Freien gewählt, eine Messung bei vorhandener Sichtverbindung (LOS) und eine bei fehlender direkter Sicht zur Sendeanlage (NLOS). Die Entfernung zwischen Messpunkt und Anlage betrug zirka 105 (LOS) bzw. 195 Meter (NLOS). Wie aus folgendem Bild ersichtlich, handelte es sich bei der Station um eine typische Dachmontage mit drei um 120° versetzten Sektoren. Betreiber der Anlage ist Vodafone (Trägerfrequenz: 2.112,8 MHz).

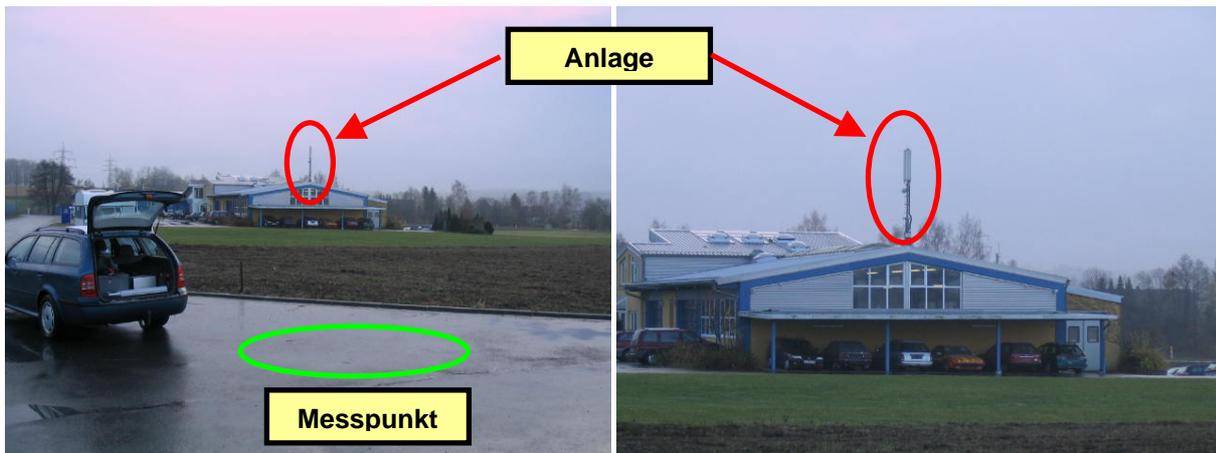


Bild II.4.20: Codeselektive Messung an einer UMTS-Station (LOS-Szenario): Messpunkt (links), Detailansicht der Anlage (rechts)

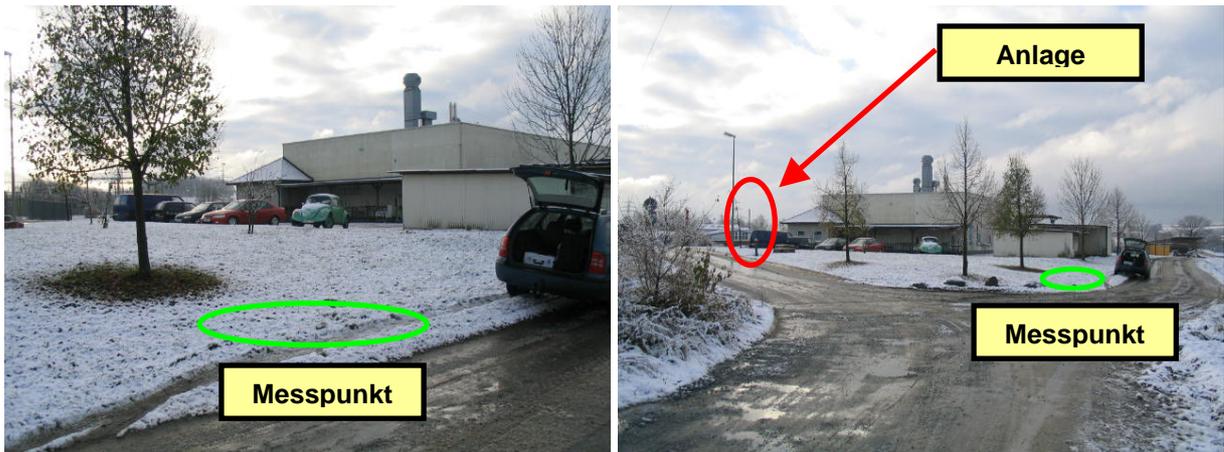


Bild II.4.21: Codeselektive Messung an einer UMTS-Station (NLOS-Szenario): Messpunkt (links), Messpunkt und Anlagenstandort (rechts)

Die drei Sektoren verwenden die Scramblingcodenummern (SC-Nr.) 383, 391 und 393, so dass am Messpunkt drei unterschiedliche Signale bei codeselektiver Messung erfassbar sein sollten. Wie in Abschnitt II.4.7 noch näher erläutert, haben codeselektive Messgeräte zwar eine sehr hohe Grundempfindlichkeit, d.h. auch sehr schwache Signale können noch detektiert und gemessen werden. Ist jedoch ein dominierendes Signal vorhanden, sind die Empfänger nicht mehr in der Lage, deutlich schwächere Signale zu erkennen. Dieser Effekt machte sich auch bei der hier dokumentierten Messung bemerkbar: Es konnten immer nur zwei der drei Signale gemessen werden, das dritte war aufgrund der Antennenausrichtung immer so schwach, dass es nicht mehr auswertbar war.

Die Messungen wurden mit dem SRM-3000 im langsamen (sensitiven) Mode durchgeführt, wobei sowohl die isotrope Antenne des Gerätes als auch eine einachsige Antenne (Log-Per-Antenne USLP- 9142 von Schwarzbeck) verwendet wurde (Bild II.4.22). Es wurden auch hier drei Messungen nacheinander vorgenommen, um einen Eindruck über die Streubreite der Ergebnisse zu bekommen. Zusätzlich wurde die Abtastgeschwindigkeit variiert: „Langsames“ Abtasten bedeutet, dass mit der handgeführten Antenne eine Strecke von einem Meter etwa innerhalb von vier Sekunden überstrichen wird, während bei der „schnellen“ Abtastung die gleiche Strecke innerhalb von einer Sekunde abgetastet wird.



Bild II.4.22: Drei verschiedene Möglichkeiten zur Abtastung des Messvolumens: Handgeführte Isotropantenne (links), Isotropantenne mit dem Messgerät verbunden (Mitte) und Messung mit handgeführter einachsiger Antenne (rechts)

Folgende Tabellen geben die Ergebnisse der Messungen wieder:

LOS-Szenario:

Isotrope Antenne mit dem Messgerät über ein 1,5 Meter langes Koaxialkabel verbunden:

Abtastgeschwindigkeit	SC Nr.	Messung 1 [dBµV/m]	Messung 2 [dBµV/m]	Messung 3 [dBµV/m]	Mittelwert [dBµV/m]	Spannweite [dB]
Langsam	391	88,0	88,5	90,4	89,0	2,4
Schnell	391	86,7	90,1	85,0	87,3	5,1
Langsam	393	105,7	103,8	105,0	104,8	1,9
Schnell	393	104,0	104,1	106,3	104,8	2,3

Tabelle II.4.19: Ergebnisse der codeselektiven Messung der Signale einer realen UMTS-Anlage (LOS-Szenario), handgeführte isotrope Messantenne

Isotrope Antenne direkt mit dem Messgerät verbunden:

Abtastgeschwindigkeit	SC Nr.	Messung 1 [dB μ V/m]	Messung 2 [dB μ V/m]	Messung 3 [dB μ V/m]	Mittelwert [dB μ V/m]	Spannweite [dB]
Langsam	391	89,2	90,8	91,8	90,6	2,6
Schnell	391	86,7	90,9	89,1	88,9	4,2
Langsam	393	104,9	104,4	104,4	104,6	0,5
Schnell	393	104,8	102,2	104,4	103,8	2,6

Tabelle II.4.20: Ergebnisse der codeselektiven Messung der Signale einer realen UMTS-Anlage (LOS-Szenario), isotrope Messantenne direkt am Messgerät angeschlossen

Log-Per-Antenne mit dem Messgerät über ein 1,5 Meter langes Koaxialkabel verbunden:

Abtastgeschwindigkeit	SC Nr.	Messung 1 [dB μ V/m]	Messung 2 [dB μ V/m]	Messung 3 [dB μ V/m]	Mittelwert [dB μ V/m]	Spannweite [dB]
Langsam	391	89,6	86,8	88,5	88,3	2,8
Schnell	391	86,0	86,9	86,8	86,6	0,9
Langsam	393	103,0	101,1	100,9	101,7	2,1
Schnell	393	101,0	100,1	99,8	100,3	1,2

Tabelle II.4.21: Ergebnisse der codeselektiven Messung der Signale einer realen UMTS-Anlage (LOS-Szenario), handgeführte einachsige Messantenne

NLOS-Szenario:

Isotrope Antenne mit dem Messgerät über ein 1,5 Meter langes Koaxialkabel verbunden:

Abtastgeschwindigkeit	SC Nr.	Messung 1 [dB μ V/m]	Messung 2 [dB μ V/m]	Messung 3 [dB μ V/m]	Mittelwert [dB μ V/m]	Spannweite [dB]
Langsam	391	80,3	79,4	79,4	79,7	0,9
Schnell	391	75,2	79,4	77,2	77,3	4,2
Langsam	393	98,3	97,3	97,5	97,7	1,0
Schnell	393	96,4	96,7	98,9	97,3	2,5

Tabelle II.4.22: Ergebnisse der codeselektiven Messung der Signale einer realen UMTS-Anlage (NLOS-Szenario), handgeführte isotrope Messantenne

Isotrope Antenne direkt mit dem Messgerät verbunden:

Abtastgeschwindigkeit	SC Nr.	Messung 1 [dB μ V/m]	Messung 2 [dB μ V/m]	Messung 3 [dB μ V/m]	Mittelwert [dB μ V/m]	Spannweite [dB]
Langsam	391	79,8	78,8	82,0	80,2	3,2
Schnell	391	74,6	78,3	80,4	77,8	5,8
Langsam	393	98,1	98,1	96,7	97,6	1,4
Schnell	393	96,7	97,8	96,2	96,9	1,6

Tabelle II.4.23: Ergebnisse der codeselektiven Messung der Signale einer realen UMTS-Anlage (LOS-Szenario), isotrope Messantenne direkt am Messgerät angeschlossen

Log-Per-Antenne mit dem Messgerät über ein 1,5 Meter langes Koaxialkabel verbunden:

Abtastgeschwindigkeit	SC Nr.	Messung 1 [dB μ V/m]	Messung 2 [dB μ V/m]	Messung 3 [dB μ V/m]	Mittelwert [dB μ V/m]	Spannweite [dB]
Langsam	391	80,6	80,3	80,0	80,3	0,6
Schnell	391	77,1	79,3	80,2	78,9	3,1
Langsam	393	96,1	96,3	94,8	95,7	1,5
Schnell	393	95,6	94,9	93,3	94,6	2,3

Tabelle II.4.24: Ergebnisse der codeselektiven Messung der Signale einer realen UMTS-Anlage (LOS-Szenario), handgeführte einachsige Messantenne

Die Messungen bestätigen die bisherigen Erkenntnisse eindeutig und beinhalten zusätzlich noch einige weitere Informationen:

- Die Schwankungsbreite der Messergebnisse ist beim stärkeren Signal meist deutlich geringer ausgeprägt, als beim schwächeren Signal. Allerdings muss man berücksichtigen, dass das schwächere Signal nur etwa 1 Prozent der Leistung des starken Signals besitzt, so dass die sich ergebende höhere Messunsicherheit keinen signifikanten Einfluss auf die Summenimmission ausübt.
- Bei schnellerer Abtastgeschwindigkeit besteht fast immer die Tendenz zur Unterbewertung der Immission, außerdem vergrößert sich die Spannweite der Messergebnisse, was auf eine weniger verlässliche Messung schließen lässt.
- Ob die isotrope Antenne in der Hand gehalten wird oder ob sie mit dem Messgerät fest verbunden ist, hat insbesondere bei langsamer Antennenbewegung keinen nennenswerten Einfluss auf das Messergebnis.

- Auch bei Verwendung einer einachsigen Antenne hat die Abtastgeschwindigkeit den gleichen Einfluss auf die Qualität der Messwerte.

Fazit:

Für die codeselektive Messung von UMTS-Signalen müssen folgende Punkte besonders beachtet werden:

- Die drei untersuchten Messsysteme sind grundsätzlich für die codeselektive Erfassung von UMTS-Signalen geeignet. Allerdings ergaben sich systematische absolute Pegelabweichungen von maximal etwa 2 dB. Anzuraten ist daher eine Kalibrierung der Systeme z.B. mit einem leitungsgeführten synthetischen UMTS-Signal.
- Einige Messsysteme besitzen zwei unterschiedliche Betriebsarten, einen „schnellen“ („fast“) und einen „langsamen“ („sensitive“) Mode. Genauere Resultate wurden hier immer im „langsamen“ Mode erzielt.
- Die untersuchten Messsysteme erreichen teilweise deutlich unterschiedliche Messgeschwindigkeiten. Bei Systemen mit sehr geringer Messrate und Anwendung der „Schwenkmethode“ ist auf eine besonders langsame Abtastung des Messvolumens zu achten.
- Insbesondere bei Systemen mit relativ geringer Messgeschwindigkeit sind in diesem Fall einachsige Messantennen den isotropen Sonden vorzuziehen, da damit die Messrate verdreifacht wird.
- Die absolute Dynamik der codeselektiven Messung ist grundsätzlich sehr hoch. Bei Anwesenheit mehrerer Signale verringert sich jedoch die relative Dynamik der Systeme auf typisch 20 dB, d.h. Signale mit der gleichen Trägerfrequenz, die mehr als 20 dB unter dem stärksten Signal liegen, werden dann häufig nicht mehr zuverlässig erfasst.

II.4.6 Antennen

Neben den Messgeräteeinstellungen spielen auch die verwendeten Antennen für die Genauigkeit der Messergebnisse eine große Rolle. Als Empfangsantennen für die frequenzselektive und codeselektive UMTS-Messung kommen sowohl Richtantennen, wie z.B. Hornantennen oder logarithmisch-periodische Antennen, als auch Antennen mit schwacher Richtwirkung, wie z.B. Dipolantennen oder bikonische Antennen in Frage. Einen Spezialfall bilden isotrope Antennen, die aus drei orthogonal angeordneten Monopol- oder Dipolantennen bestehen, welche während der Messung sequenziell durchgeschaltet werden. Das Gesamtsignal ergibt sich aus der Überlagerung der drei gemessenen Feldkomponenten.

In Szenarien mit aus unterschiedlichen Richtungen einfallenden, u.U. gleich starken Immissionen (z.B. Innenräume ohne direkte Sicht auf die Sendeanlage) haben stärker richtende Antennen theoretisch Nachteile. Allerdings wurde bereits bei Untersuchungen zur Entwicklung eines Messverfahrens für die Immissionsbestimmung bei GSM-Basisstationen [BOR 05] festgestellt, dass bei schwächer richtenden Antennentypen eine teilweise starke Beeinflussung des Messenden auf die Messantenne existiert. Inwieweit dies auch im durch UMTS genutzten Frequenzbereich auftritt, soll in diesem Abschnitt untersucht werden.

Um von äußeren Störeinflüssen unabhängige Ergebnisse zu erhalten und eine „definierte“, reproduzierbare Messumgebung zu schaffen, wurde als Messort die EMV-Absorberkammer des IMST ausgewählt. Durch die Absorberbelegung der Kammer an den Wänden und an der Decke werden ungestörte Wellenausbreitungsbedingungen geschaffen, d.h. die Messergebnisse werden nicht durch Wandreflexionen bzw. Resonanzen unreproduzierbar beeinflusst. Das zu messende Feld der Basisstation wurde mit einer Hornantenne erzeugt (Schwarzbeck BBHA-9120 B). Im Gegensatz zu den Untersuchungen bei GSM, bei denen die Untersuchungen mit einem schmalbandigen CW-Signal erfolgten, wurde ein Basisstationssimulator (Rohde & Schwarz CMU 200) verwendet, der ein breitbandiges, reales UMTS-Signal bei 2140 MHz erzeugte. Zwischen Basisstationssimulator und Hornantenne wurde ein Verstärker (Amplifier Research 25S1G4) geschaltet.

Mit dieser Anordnung wurden bei vertikaler und horizontaler Polarisation Felder erzeugt. In 5 m Entfernung wurde auf gleicher Höhe (1,5 m) die kopolarisierte Empfangsantenne aufgestellt. Als Empfangsantenne wurde folgende Antennen verwendet (Bild II.4.23):

- Hornantenne 1-18 GHz (EMCO-3115),
- Logarithmisch-periodische Antenne 0,7-5,4 GHz (Schwarzbeck USLP-9142),
- Präzisionsdipol 0,75-2,2 GHz (Schwarzbeck VHA-9125 B) und
- Isotrope Antenne Messsystem Rohde & Schwarz TS-EMF, 0,03-3 GHz (Kugelsonde)

Die Empfangsantenne wurde an einen Spektrumanalysator außerhalb der Kammer angeschlossen. Als Referenzwert diente der Wert, der sich bei „leerer“ Kammer, d.h. ohne Anwesenheit einer Messperson ergab. Anschließend begab sich eine Messperson in den Raum und bewegte sich auf der Linie Sendeanenne-Empfangsantenne von hinten aus ca. 3,0 m Entfernung direkt auf die Empfangsantenne zu. Somit kann die Beeinflussung der Messergebnisse durch den Messenden bei unterschiedlichen Abständen zur Empfangsantenne untersucht werden. Der Messaufbau ohne Bodenabsorber ist in Bild II.4.24 gezeigt.

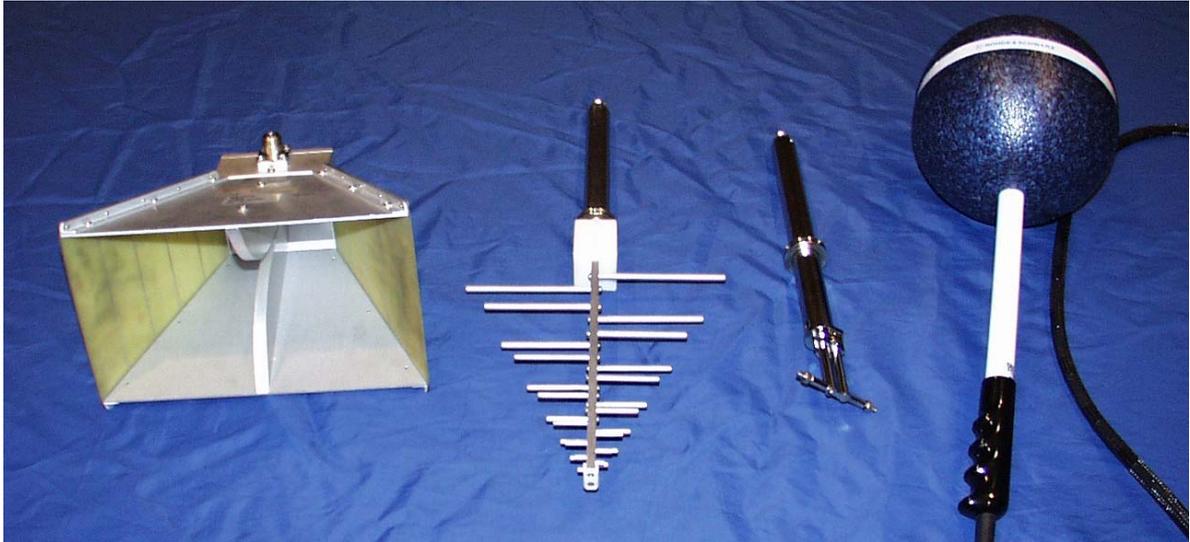


Bild II.4.23: Verwendete Antennen zur Untersuchung der Beeinflussung durch den Messenden; v.l.n.r.: Hornantenne, log.-per. Antenne, Dipol und Isotrope Kugelsonde

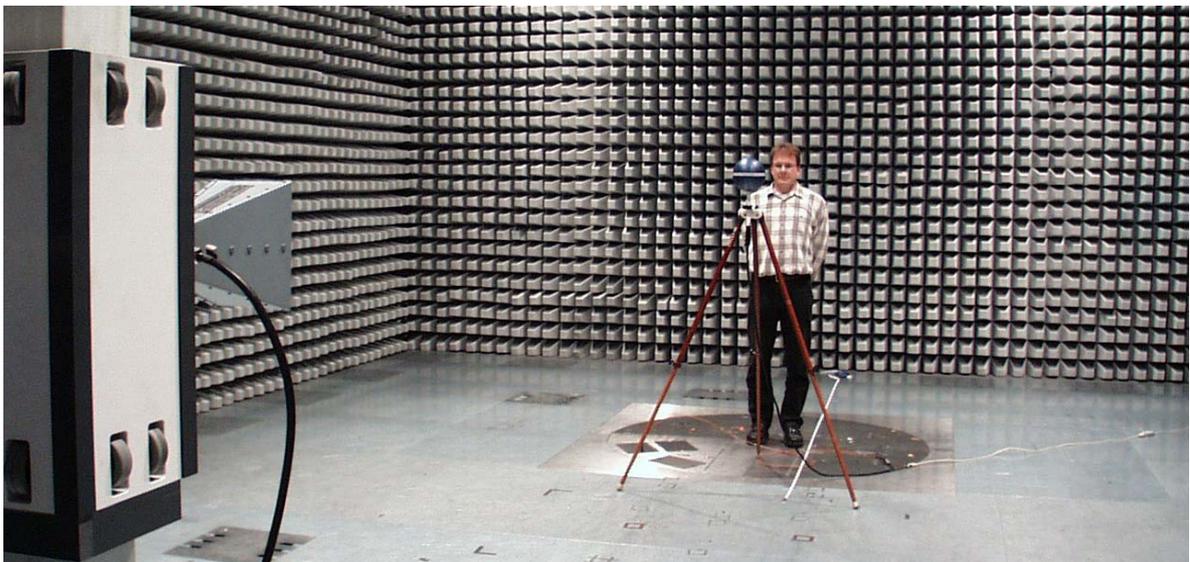


Bild II.4.24: Messaufbau zur Untersuchung des Einflusses des Messenden auf die Messergebnisse bei verschiedenen Antennentypen

Der Boden zwischen Sende- und Empfangsantenne wurde wahlweise metallisch belassen oder mit Absorbern ausgelegt. Damit ist die mögliche Spannweite realer Vorort-Immissionsmessungen abgedeckt: Bei Messungen auf einem Balkon eines oberen Stockwerkes direkt gegenüber der Sendeantenne in geringer Entfernung liegt üblicherweise ideale Freiraumausbreitung ohne Bodenreflexion vor; in größeren Abständen von der Antenne bzw. bei Messungen nahe dem Erdboden hat der Boden einen Einfluss auf die Messungen.

In den Bildern II.4.25 bis II.4.28 ist als Ergebnis die relative Abweichung (Messwert bei Anwesenheit des Messenden) – (Referenzwert bei ungestörter Messumgebung) angegeben. Gemessen wurde an den Markerpositionen; nur der Übersichtlichkeit halber sind die Markierungen durch Linien verbunden. Der Punkt „0 m Abstand“ korrespondiert mit einer Position, bei der der Messende direkten Körperkontakt mit der Antennenhalterung hat.

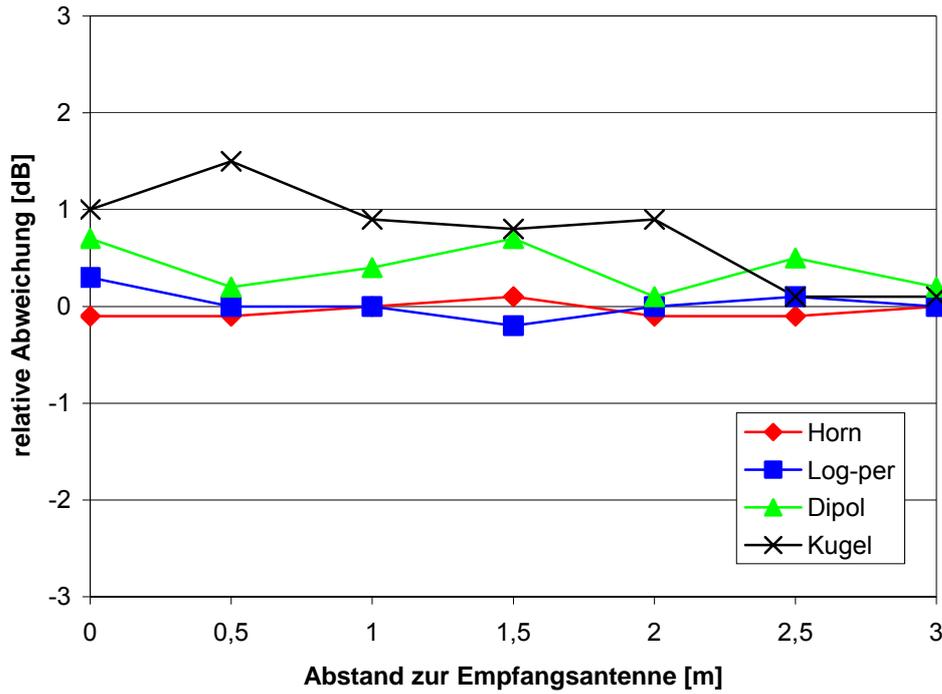


Bild II.4.25: Relative Abweichung der Messwerte bei Anwesenheit des Messenden in Relation zum ungestörten Fall in Abhängigkeit des Abstands des Messenden zur Empfangsantenne; ohne Bodenabsorber, vertikale Polarisation

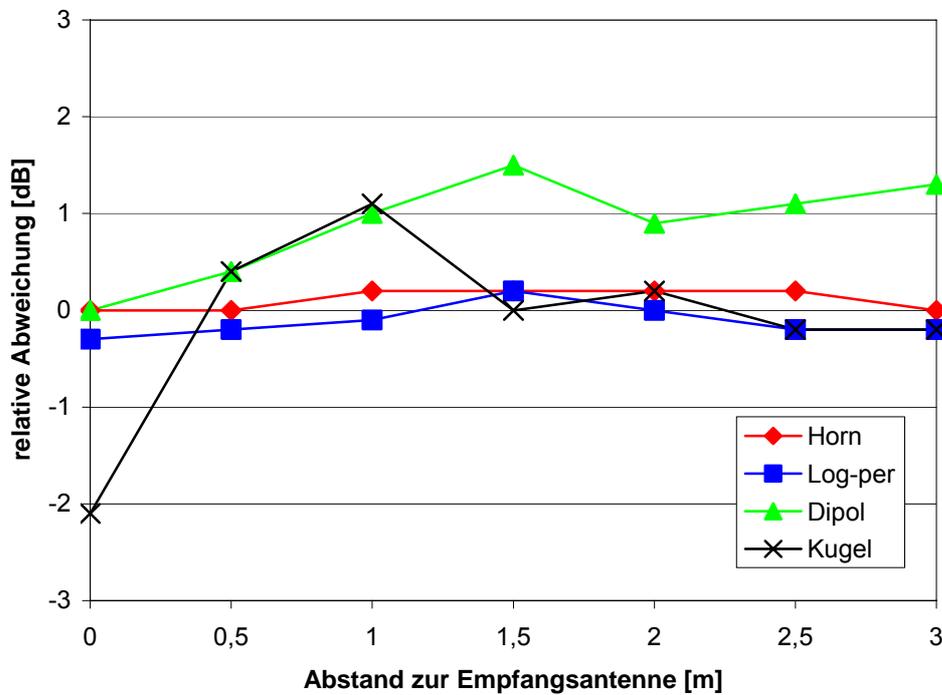


Bild II.4.26: Relative Abweichung der Messwerte bei Anwesenheit des Messenden in Relation zum ungestörten Fall in Abhängigkeit des Abstands des Messenden zur Empfangsantenne; ohne Bodenabsorber, horizontale Polarisation

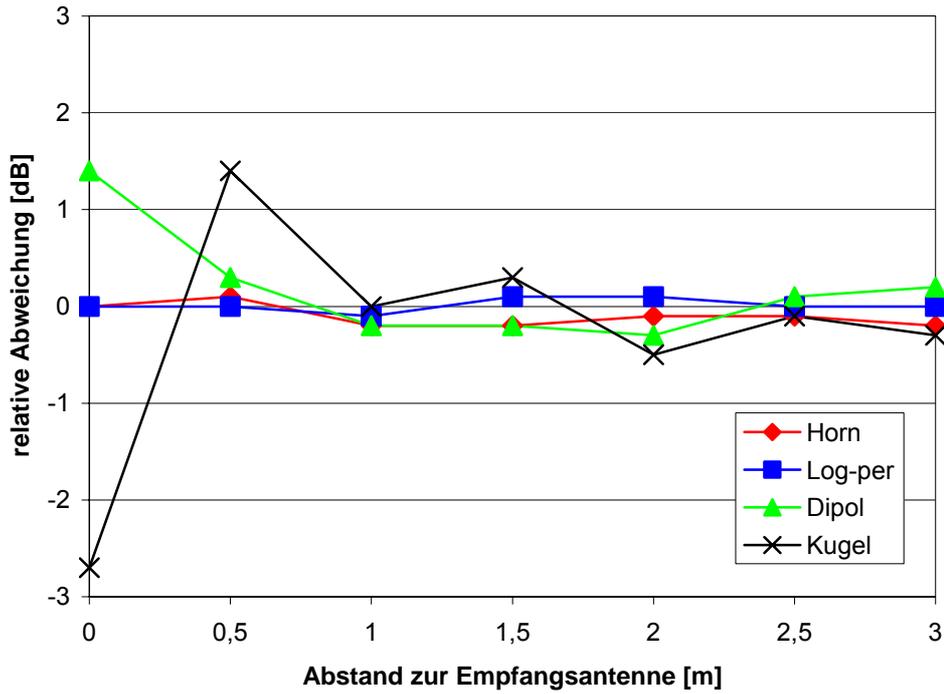


Bild II.4.27: Relative Abweichung der Messwerte bei Anwesenheit des Messenden in Relation zum ungestörten Fall in Abhängigkeit des Abstands des Messenden zur Empfangsantenne; mit Bodenabsorbern, vertikale Polarisation

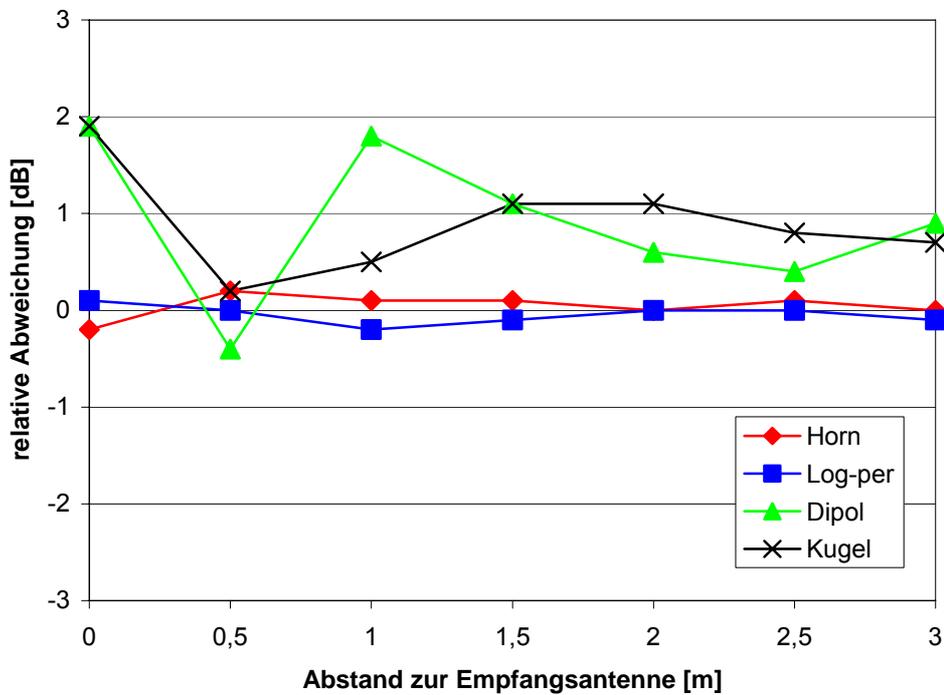


Bild II.4.28: Relative Abweichung der Messwerte bei Anwesenheit des Messenden in Relation zum ungestörten Fall in Abhängigkeit des Abstands des Messenden zur Empfangsantenne; mit Bodenabsorbern, horizontale Polarisation

Die Messungen wurden frequenzselektiv durchgeführt; jedoch wurde überprüft und bestätigt, dass die gefundenen Verläufe bei codeselektiver Messdurchführung erhalten bleiben.

Als Ergebnis kann festgestellt werden, dass bei der Hornantenne sowie der logarithmisch-periodische Antenne die hinter der Antenne stehende Messperson nahezu keinen Einfluss auf das Messergebnis hat. Die maximale relative Abweichung vom ungestörten Fall ist an lediglich jeweils einem Messpunkt 0,3 dB und liegt ansonsten darunter.

Bei der Dipolantenne bzw. der isotropen Kugelsonde sind größere Abweichungen feststellbar. Diese erreichen zwar nicht die bei GSM beobachteten Werte (bis ± 6 dB, bei direktem Kontakt zur Antenne auch höher); trotzdem werden auch hier Abweichungen bis etwa 2 dB, bei direktem Kontakt zur Antenne auch mehr erreicht.

Bedeutsam ist, dass bei zunehmendem Abstand keine monotone Veränderung, sondern eher eine sprunghafte Veränderung der Abweichungen beobachtet werden kann und es auch bei Abständen des Messenden von 3 m noch zu Abweichungen von etwa 1 dB kommen kann. Dies deutet auf Reflexionen der Sendesignale am Messenden und Überlagerung des reflektierten Signals mit dem direkten Signal an der Empfangsantenne hin. Je nach Abstand des Messenden überlagern sich die Signale konstruktiv oder destruktiv. Bei geringem Abstand des Messenden zur Empfangsantenne kann der Einfluss des Messenden auch als Verzerrung des Empfangsantennendiagramms interpretiert werden.

Durch die bei vorliegenden Versuchen gewählte definierte Umgebung liegt außerdem in gewisser Weise eine „idealisierte“ Umgebung vor, da hier außer dem direkten Strahlungspfad zwischen Sende- und Empfangsantenne beim Szenario ohne Bodenabsorber im Idealfall lediglich ein zweiter (indirekter) bodenreflektierter Strahlungspfad existiert. Bei realen Messpunkten vor allem in Innenräumen ohne direkte Sicht zur Antenne ist das vorliegende Einfallswinkel- und Polarisationspektrum in der Regel sehr viel komplexer. Dies kann sowohl zu einer teilweisen Kompensation einzelner gegensätzliche Effekte führen, in Einzelfällen ist aber auch eine Verstärkung der Effekte möglich. Dieses ist aber sehr stark von den Umgebungsbedingungen abhängig und nicht generell vorausbestimmbar.

Eine Beeinflussung der Antennen erfolgt in realen Umgebungen nicht nur durch den Messenden, sondern auch durch die „nicht reflexionsfreie“ Messumgebung. Messantennen sind üblicherweise im Freiraum kalibriert; die Kalibrierfaktoren sind streng genommen auch nur für diesen Fall gültig und weichen in realen Messumgebungen davon ab. Dies ist insbesondere dann festzustellen, wenn man sich mit der Antenne zu sehr Mobiliar, Wänden oder dem Boden nähert. Deswegen sollte bei den Messungen generell ein Mindestabstand von etwa 50 cm zu Mobiliar bzw. Wänden eingehalten werden.

Bei der Schwenkmethode ist der Abstand des Messenden zur handgeführten Messantenne in der Regel wesentlich kleiner als die hier maximal untersuchten 3 m. Bei kleineren Abständen traten tendenziell größere Abweichungen auf. Da diese Schwankungen bei geringfügigsten Positionsänderungen (die Antenne wird in Relation zum vergleichsweise feststehenden Körper des Messenden geschwenkt) wie erwähnt positiv oder negativ in Relation zum „ungestörten“ Wert sein können, bei den Messungen aber üblicherweise mit der „Max-Hold“ Funktion der Maximalwert der Immissionen festgehalten wird, werden sich diese Einflüsse des Messenden in diesem Fall als „Überbewertung“ der tatsächlichen Immissionssituation bemerkbar machen.

Bleibt jedoch bei Messungen mit nur schwach richtenden Antenne der Abstand zwischen Messperson und Messantenne konstant, kann theoretisch auch unter Verwendung der „Max-Hold“ Funktion eine Unterbewertung erfolgen. Diese Gefahr eines Einflusses des Messenden auf das Messergebnis lässt sich durch eine Vergrößerung des Antennenabstands zum Messenden mit einer nichtmetallischen Halterung sowie durch eine kontinuierliche Veränderung des Abstands zur Antenne während des Schwenkens minimieren, bei schwach richtenden Antennen aber nicht gänzlich ausschließen.

Basisstationsantennen senden ihre Signale üblicherweise linear polarisiert ab. Bei der Schwenkmethode wird eine linear polarisierte Empfangsantenne manuell auf das Maximum orientiert, d.h. in Richtung des Polarisationsvektors.

Trotz der ursprünglich linearen Polarisation kann es doch durch bestimmte Wellenausbreitungsphänomene (Beugung, Reflexion, Streuung) dazu kommen, dass am Immissionsort eine elliptische Polarisation vorliegt. Hierbei läuft die Spitze des E-Feld-Vektors auf einem Ellipsoid, der mit drei Hauptachsen beschrieben werden kann.

Streng genommen sind nur isotrope Feldmessenrichtungen, bei denen auch die Phaseninformation ausgewertet wird, in der Lage, beliebige Polarisationen richtig zu erfassen. Für Vorort-Immissionsmessungen existieren entsprechende phasenauswertende Geräte allerdings noch nicht. Bislang verfügbare isotrope Sonden realisieren die Isotropie nur dadurch, dass die drei orthogonalen Ebenen mit dipol- oder monopolarigen Antennen sequenziell gemessen werden. Eine Auswertung der Phase findet nicht statt.

Bei allgemeiner Lage des Polarisationsellipsoids führt eine isotrope Messung mit den vorhandenen Sonden im Allgemeinen zu einer leichten *Überschätzung* der maximalen effektiven Feldstärke, wohingegen der Einsatz von linear polarisierten Empfangsantennen zu einer Unterschätzung führt, da hier die Messantenne lediglich entlang der größten Hauptachse im Ellipsoid ausgerichtet wird. Der Grad der Über- bzw. Unterschätzung ist von der Form und Lage des Polarisationsellipsoids, d.h. u.a. von der Stärke der Abweichung von der linearen Polarisation abhängig. Im Extremfall einer ideal zirkularen Polarisation unterschätzen linear polarisierte Antennen die maximale effektive Feldstärke um 3 dB, wohingegen isotrope Antennen das korrekte Ergebnis anzeigen. Im Realfall ist aber der Fehler bei linearen Antennen wesentlich kleiner als 3 dB, da die zirkulare Polarisation bei Mobilfunk-Basisstationen einen sehr unwahrscheinlichen Spezialfall darstellt.

Fazit:

Als Messantennen für Vorort-Messungen zur Überprüfung der Grenzwerte, d.h. in Verbindung mit der Schwenkmethode zum Auffinden des örtlichen Maximums, können logarithmisch-periodische Antennen oder auch kleine bikonische Antennen eingesetzt werden. Logarithmisch-periodische Antennen zeichnen sich dabei durch einen äußerst geringen Einfluss des Messenden in Vergleich zu schwächer richtenden Antennen aus. Schwach richtende Antennen, wie z.B. Dipole, bikonische Antennen oder auch isotrope Sonden, fügen einen Fehler in die Messergebnisse in der Größenordnung von etwa 2 dB ein, der in einem Messunsicherheitsbudget geeignet berücksichtigt werden muss.

Isotrope Sonden haben dann ihre Berechtigung, wenn örtliche Mittelungstechniken oder zeitliche Verläufe im Mittelpunkt der Messungen stehen. Hierbei sind stärker richtende Antennen nicht und schwach richtende Antennen wie z.B. Dipole nur beschränkt einsetzbar, z.B. wenn sie nacheinander in drei orthogonale Raumrichtungen orientiert werden. Auf jeden Fall sollte dann eine nichtmetallische Antennenhalterung zur Vergrößerung des Abstandes zwischen Messendem und Messantenne verwendet werden.

Bei den Messungen ist generell ein Mindestabstand der Messantenne von etwa 50 cm zu Mobiliar bzw. Wänden einzuhalten.

II.4.7 Nachweisgrenzen

II.4.7.1 Breitbandmessung

Wie bereits in Abschnitt II.4.1 ausgeführt, ist die Empfindlichkeit breitbandiger Messgeräte begrenzt. Typische Mindestempfindlichkeiten von entsprechend verfügbaren Geräten liegen bei etwa 1 V/m; für das oben näher untersuchte Gerät Narda EMR-300 ist eine E-Feld-Sonde erhöhter Empfindlichkeit mit 0,2 V/m (Typ 18) verfügbar. Dies entspricht logarithmischen Pegeln von 120 bzw. 106 dB μ V/m. Nach Abschnitt II.4.1 beträgt die Mindestversorgungsfeldstärke bei UMTS etwa 39 dB μ V/m. Der Unterschied zwischen Nachweisgrenze und Mindestversorgungsfeldstärke liegt somit bei 81 bzw. 67 dB. Bei einem Grenzwert von 61,4 V/m (156 dB μ V/m) im Downlinkfrequenzbereich von UMTS können somit feldstärkebezogene Grenzwertausschöpfungen von 1,6 bzw. 0,3 % nachgewiesen werden.

Feldstärken im Bereich des Grenzwertes sind nur in unmittelbarer Nähe einer UMTS-Sendeanlage vorhanden. In Zusammenhang mit der fehlenden Frequenzselektivität beschränkt sich der Einsatz solcher Breitbandgeräte deswegen auf Anwendungen in unmittelbarer Antennennähe im Rahmen der Überprüfung von Sicherheitsabständen oder bei der Überprüfung zulässiger Werte für den Arbeitsschutz. In Abständen von mehreren 10 Metern können sie darüber hinaus eingesetzt werden, um einen Raumbereich vorzuselektieren, in dem mit spektraler oder codeselektiver Messung eine detaillierte Überprüfung der Immissionssituation erfolgt. Ab Abständen von wenigen 100 Metern von der Anlage sind Breitbandsonden schon aufgrund ihrer geringen Empfindlichkeit nicht mehr einsetzbar.

II.4.7.2 Frequenzselektive Messung

Die Empfindlichkeit eines spektralen Messsystems ist von folgenden Faktoren abhängig:

Spektrumanalysator

Die Empfindlichkeit des Spektrumanalysators kann als diejenige Anzeige des Gerätes aufgefasst werden, die sich ergibt, wenn kein Signal am Eingang anliegt. Es können nur solche Signale erfasst werden, die größer als das Grundrauschen des Gerätes sind; kleinere Signale werden nicht erkannt. Neben dem gewählten Gerätetyp und der Aktivierung eventu-

ell optional vorhandener Vorverstärker sind hier vor allem die Einstellparameter entscheidend, und zwar insbesondere Auflösebandbreite und Detektortyp. Einen Einfluss auf die erzielbare Empfindlichkeit haben weiterhin die Größe des Referenzpegels (hierüber wird die ZF-Verstärkung variiert) und die gewählte Eingangsdämpfung. Bei portablen Analysatoren (z.B. Narda SRM-3000 und Rohde & Schwarz FSH-3) lassen sich Referenzpegel und Eingangsdämpfung oftmals nicht separat voneinander wählen, sondern sie sind verkoppelt. Bei der Auswahl niedriger Referenzpegel wird die Eingangsdämpfung geräteintern bis auf 0 dB reduziert, wohingegen bei größeren Referenzpegeln stufenweise Eingangsdämpfungsglieder in den Messkreis zugeschaltet werden. Der gewählte Frequenzbereich oder der Spanninge haben im hier betrachteten Frequenzbereich keinen Einfluss auf die Mindestempfindlichkeit des Spektrumanalysators.

Für die nach Abschnitt II.4.5.2 für UMTS als sinnvoll klassifizierten Einstellparameter (RBW=5 MHz, VBW=10 MHz, RMS-Detektor, 200 ms Sweeptime) beträgt beispielsweise beim Spektrumanalysator Rohde & Schwarz FSP-7 die Empfindlichkeitsschwelle beim Reduzieren der Vordämpfung auf 0 dB und minimalem Referenzpegel etwa 20 dB μ V.

Bei den Betrachtungen zur Empfindlichkeit soll noch auf zwei Aspekte aufmerksam gemacht werden:

- Werden vergleichsweise große Immissionen gemessen, wird der Referenzpegel bzw. die Eingangsdämpfung automatisch oder manuell so angehoben, dass diese Signale noch gut auf der Bildschirmanzeige des Gerätes dargestellt werden können und nicht „über den oberen Bildrand hinausragen“. Dies ist notwendig, um den Eingangsmischer des Analysators vor Übersteuerung oder gar Zerstörung zu schützen. Dies geht nach den obigen Betrachtungen mit einer Reduzierung der Empfindlichkeit einher. Somit können dann ebenfalls im Spektrum vorhandene, vergleichsweise kleine Signale nicht mehr aus der erhöhten Rauschschwelle aufgelöst werden. Dies ist aber nicht als kritisch anzusehen, da die Gesamtimmission in diesem Fall von den starken Eingangssignalen dominiert wird und der Beitrag der nicht mehr auflösbaren Signalanteile zur Gesamtimmission vernachlässigt werden kann.
- Bereits im Abschnitt II.4.2.2 bei der Beschreibung von Eingangsdämpfung und Referenzpegel wurde erläutert, dass Eingangsdämpfungen von 0 dB vor allem bei der Verwendung von kleinen bikonischen Antennen aufgrund der Fehlanpassung zwischen Antenne und Eingangsmischer zu einer Erhöhung der Messunsicherheit führen, weswegen beispielsweise eine Eingangsdämpfung von 10 dB empfohlen wurde. Hier ist also ein Kompromiss zwischen Messempfindlichkeit und Messunsicherheit zu suchen.

Antenne

Neben dem Spektrumanalysator bestimmt vor allem die angeschlossene Messantenne die Empfindlichkeit des gesamten Messsystems. Der hierfür maßgebliche Parameter ist der so genannte Antennenfaktor K. Der Antennenfaktor bezeichnet als Wandlungsmaß das Verhältnis zwischen der elektrischen Feldstärke, in der sich die Antenne befindet, zur anliegenden Hochfrequenzspannung U am Antennenfußpunkt:

$$K = E / U \tag{II.4.4}$$

Ein hoher Antennenfaktor bedeutet, dass bei gleicher vorhandener Feldstärke eine in das Feld gebrachte Antenne eine geringere Fußpunktspannung liefern würde als bei einer Antenne mit niedrigerem Antennenfaktor; d.h. die Antenne ist weniger empfindlich.

Die Antennenfaktoren sind im Allgemeinen frequenzabhängig. Da jedoch der durch UMTS belegte Downlinkfrequenzbereich von 2110 - 2170 MHz im Vergleich zur Breitbandigkeit der eingesetzten Messantennen vergleichsweise schmal ist, ändert sich der Antennenfaktor in diesem Frequenzbereich nur geringfügig.

In den Bildern II.4.29 bis II.4.32 sind die Faktoren für einige Antennen angegeben, die bei UMTS-Messungen Verwendung finden. Die Log-Per Antenne Schwarzbeck USLP-9142, der Präzisionsdipol Schwarzbeck UHA-9125B und die Isotropsonde für das Messsystem Rohde & Schwarz TS-EMF sind bereits im Abschnitt II.4.6 auf den Einfluss des Messenden hin untersucht worden. Der UMTS-Downlinkfrequenzbereich ist jeweils grau unterlegt.

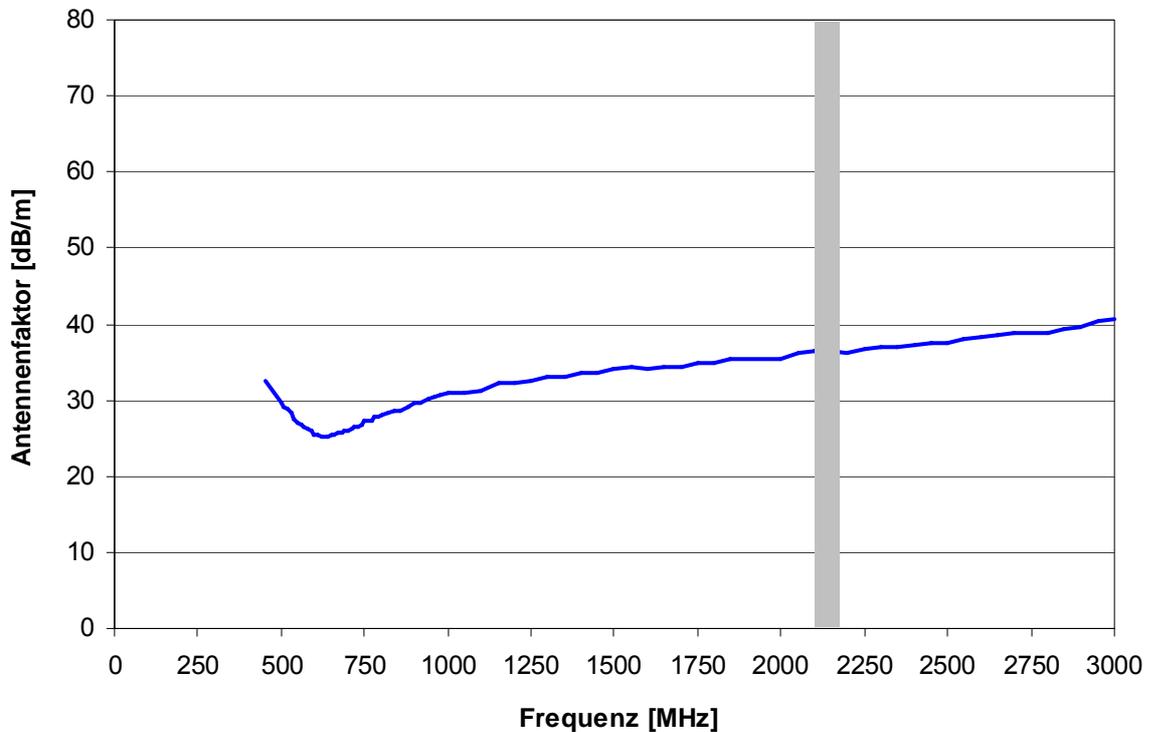


Bild II.4.29: Antennenfaktor bikonische Antenne Schwarzbeck SBA-9113

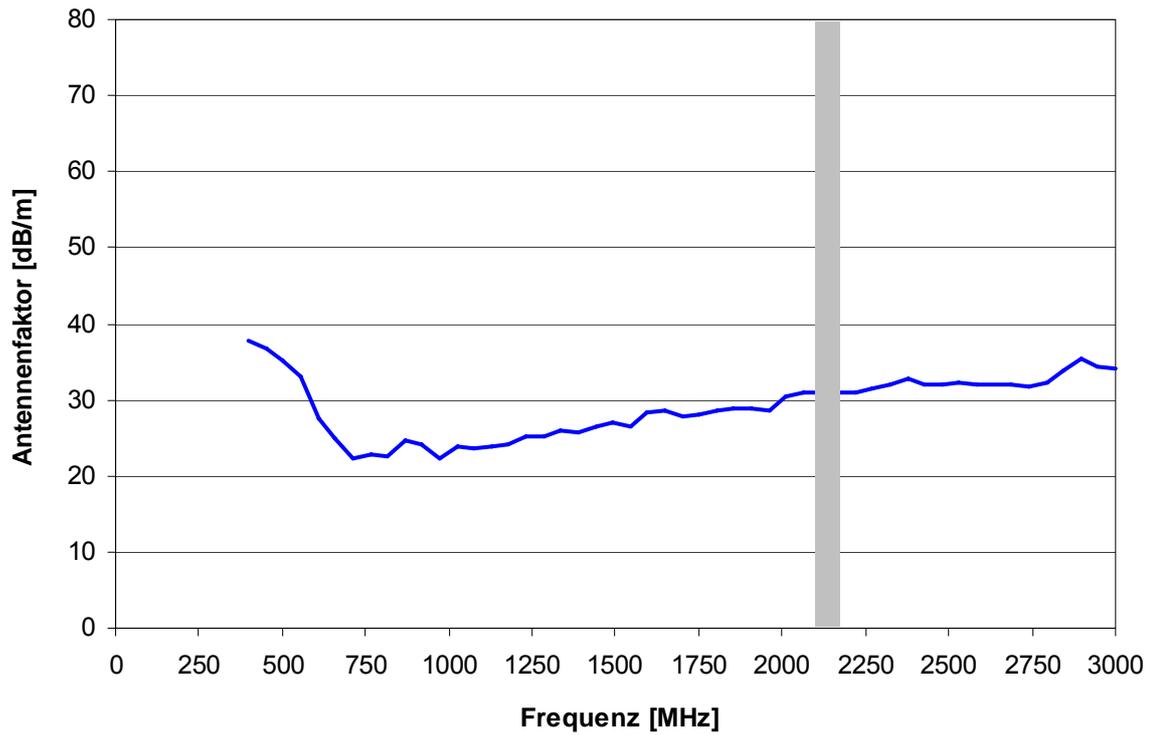


Bild II.4.30: Antennenfaktor logarithmisch-periodische Antenne Schwarzbeck USLP-9142

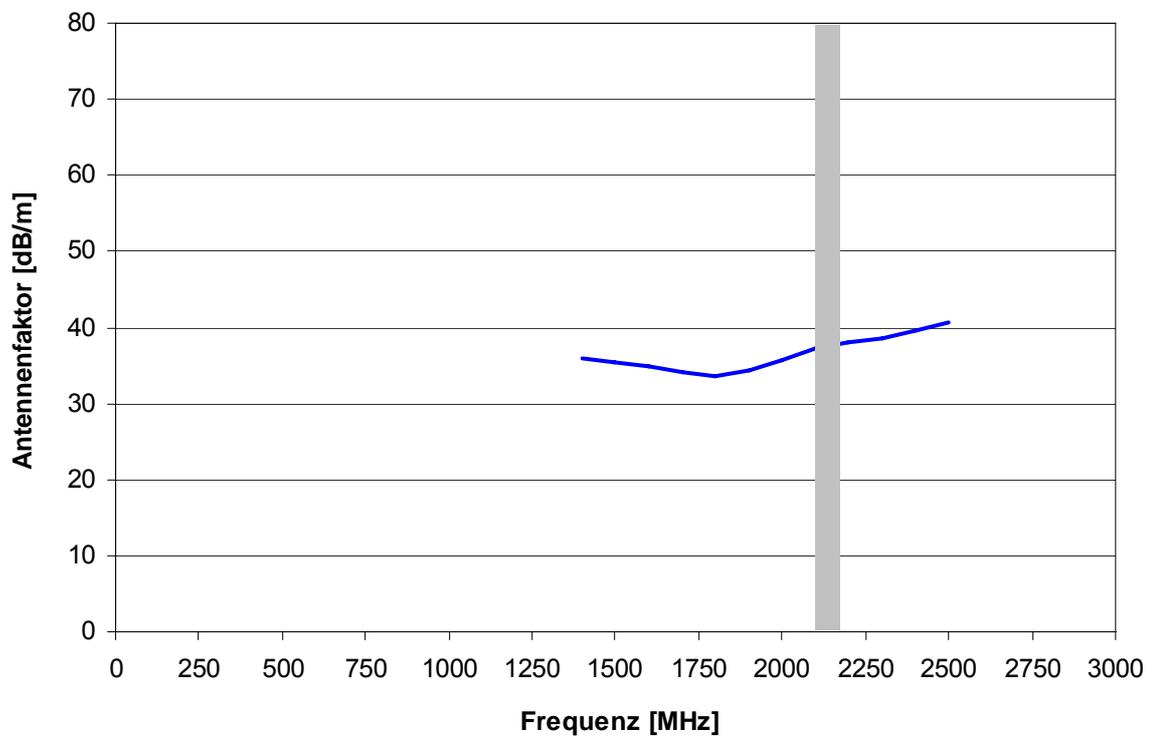


Bild II.4.31: Antennenfaktor Präzisionsdipol Schwarzbeck UHA-9125B (kurze Elementstäbe, Messung quer zur Halterungsachse)

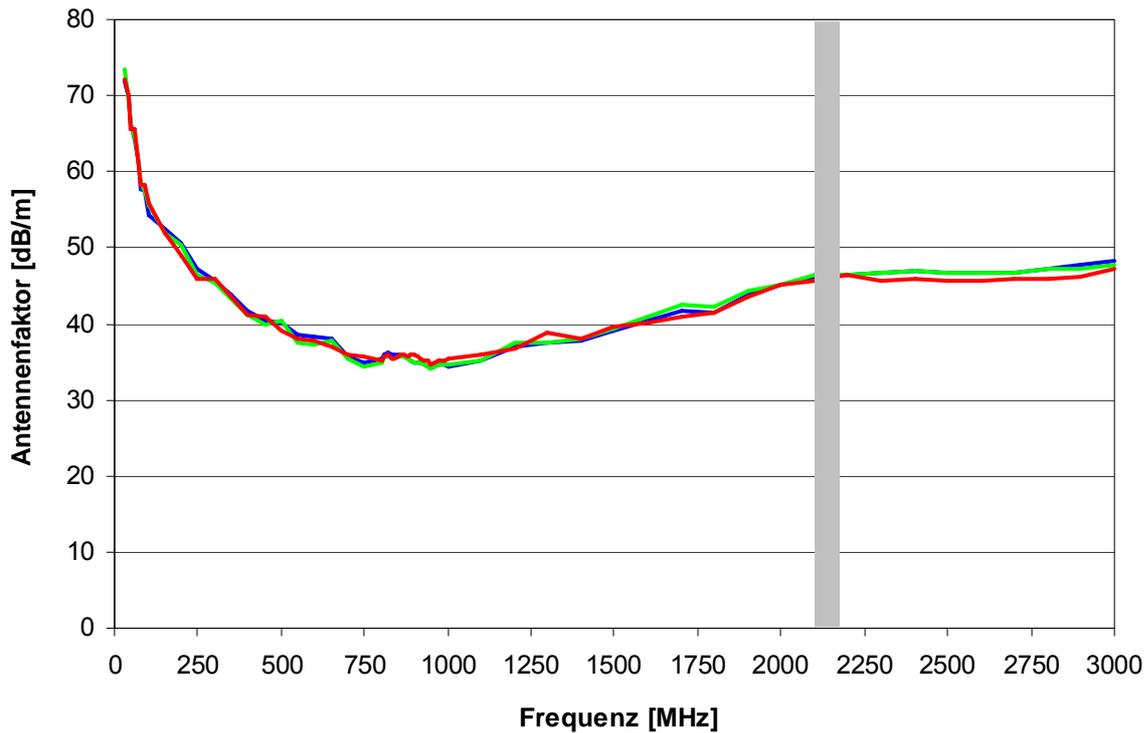


Bild II.4.32: Antennenfaktor Isotropsonde Messsystem Rohde & Schwarz TS-EMF; die drei dargestellten Kurven entsprechend den Antennenfaktoren der drei Messachsen

Folgende Erkenntnisse können aus den Bildern gewonnen werden:

- Die Isotropsonde hat einen wesentlich größeren Antennenfaktor als die anderen Antennen. Zur logarithmisch-periodischen Antenne besteht beispielsweise ein Unterschied von etwa 15 dB, was einer um den entsprechenden Faktor schlechteren Empfindlichkeit des Messsystems unter Verwendung der Isotropsonde entspricht. Dies ist (neben der nicht unproblematischen Anwendung der Schwenkmethode bei den Isotropsonden durch sequenzielles Zuschalten der drei Sondenachsen sowie des bereits im Abschnitt II.4.6 untersuchten größeren Einflusses des Messenden auf die Messresultate) der Grund dafür, dass Messungen zur normativen Überprüfung der Grenzwerte (zeitliche und örtliche Maximalwerte mittels Schwenkmethode) an beliebigen Messpunkten innerhalb des Versorgungsbereiches nicht mit den Isotropsonden durchgeführt werden sollten.
- Die Antennenfaktoren von logarithmisch-periodischer Antenne, Präzisionsdipol und bikonischer Antenne liegen in etwa derselben Größenordnung, wobei die logarithmisch-periodische Antenne mit ca. 31 dB/m den niedrigsten Antennenfaktor aufweist und somit die beste Empfindlichkeit verspricht. Auch dies spricht, neben dem äußerst geringen Einfluss des Messenden, für eine Bevorzugung dieses Antennentyps für UMTS-Messungen zur Überprüfung der Grenzwerte.

HF-Kabel

Neben dem Spektrumanalysator und der verwendeten Messantenne spielt auch das eingesetzte Hochfrequenzkabel bei der Untersuchung der Messempfindlichkeit eine Rolle. Die Empfindlichkeit verbessert sich, wenn ein dämpfungsarmes Kabel verwendet wird. Hier ist allerdings ebenfalls ein Kompromiss zu suchen, da folgende Faktoren eine Rolle spielen:

- Hochfrequenzkabel mit einer besonders niedrigen Dämpfung sind oftmals unflexibel bzw. anfällig für mechanische Beanspruchungen, was sie für den „Vor-Ort-Einsatz“ nicht optimal geeignet erscheinen lässt.
- Eine gewisse Dämpfung kann sich, wie oben beschrieben, positiv auf die Messunsicherheitsbetrachtungen auswirken, da durch höhere Dämpfungen Fehlanpassungen zwischen Antenne und Spektrumanalysator verringert werden.

Allerdings ist der Einfluss des Hochfrequenzkabels nicht so groß wie bei den Einflussgrößen Spektrumanalysator und Antennentyp, da Kabellänge und die dazugehörige Kabeldämpfung hier im Allgemeinen begrenzt sind.

Typische Kabeldämpfungen von geeigneten Messkabeln (Länge z.B. 3 m) betragen im UMTS-Frequenzbereich etwa 2 dB.

Resultierende Nachweisgrenzen

Mit den obigen Betrachtungen ist es möglich, die erzielbaren Nachweisgrenzen zu spezifizieren. Dies erfolgt beispielhaft in Tabelle II.4.25 für den Spektrumanalysator Rohde & Schwarz FSP-7 in Verbindung mit den oben angegebenen Einstellparametern sowie den untersuchten Antennen. Die Nachweisgrenzen gelten in gleicher Weise auch für Kanalleistungsmessungen geringerer Auflösungsbandbreite mit identischem Messequipment.

Die Nachweisgrenzen können dann mit den aus der Versorgungsplanung stammenden Versorgungsfeldstärken bzw. mit den gesetzlichen Grenzwerten der 26. BImSchV verglichen werden.

Funkdienst	Spektrumanalysator	Messantenne	erzielbare Empfindlichkeit [dB μ V/m]	Mindest-Versorgungsfeldstärke [dB μ V/m]	Grenzwert nach 26. BImSchV [dB μ V/m]
UMTS-Downlink 2110-2170 MHz	FSP-7	USLP-9142	53	39	156
		SBA-9113	58		
		UHA-9125B	60		
		Kugelsonde	66		

Tabelle II.4.25: Erzielbare Empfindlichkeiten für UMTS, Spektrumanalysator FSP-7 mit den Parametern RBW=5 MHz, VBW=10 MHz, RMS-Detektor, Sweeptime=200 ms, Eingangsdämpfung 0 dB, minimaler Referenzpegel

Fazit:

- Bei der spektralen Messung liegt die Nachweisgrenze auch unter Verwendung von stärker richtenden Antennen etwa 14 dB über der für UMTS benötigten Mindestversorgungsfeldstärke. Das liegt vor allem an der vergleichsweise großen Signalbandbreite, die eine mindestens ebenso große Auflösebandbreite am Analysator erfordert und so zu einem großen Rauschpegel des Analysators führt.
- Bei Verwendung von schwächer richtenden Antennen oder sogar Isotropsonden sinkt die Empfindlichkeit noch einmal um mehrere dB.
- Das bedeutet, dass es vor allem am Rande des UMTS-Versorgungsgebietes möglich sein kann, dass dieser Funkdienst mit der spektralen Messtechnik nicht mehr aufgelöst werden kann, obwohl an diesen Stellen ein UMTS-Verbindungsaufbau möglich ist. Aus Sicht des Immissionsschutzes ist dies allerdings unkritisch, da beispielsweise bei Verwendung der hier favorisierten logarithmisch-periodischen Antenne die Nachweisgrenzen immer noch etwa um den Faktor 103 dB unter den Grenzwerten der 26. BImSchV liegen. Das bedeutet, dass hiermit Immissionen, die feldstärkebezogen 0,0007 % des Grenzwertes ausschöpfen, noch nachgewiesen werden können. Bei Verwendung der Isotropsonde, die, wie später noch dargestellt wird, bei der Ermittlung von Durchschnittswerten ihre Berechtigung hat, können noch Immissionen im Bereich bis zu ca. 0,003 % des Grenzwertes nachgewiesen werden.

II.4.7.3 Codeselektive Messung

Einzigster Unterschied bezüglich der Empfindlichkeit von codeselektiven Messungen ist die Nachweisgrenze des decodierenden Empfängers, da sich bei den Antennen und Kabeln keine Unterschiede zur frequenzselektiven Messung ergeben. Untersuchungen zur Grenzempfindlichkeit der verschiedenen im Rahmen dieses Projektes verfügbaren codeselektiven Messgeräte ergaben, dass CPICH-Pegel von minimal etwa 0 bis 10 dB μ V noch einwandfrei messbar waren. Somit ergibt sich in Anlehnung an Tabelle II.4.25 eine erzielbare Empfindlichkeit von etwa 33 bis 43 dB μ V/m (bei Verwendung der USLP-9142). Man bewegt sich also mit der codeselektiven Messtechnik bezüglich der Nachweisgrenze im Bereich der Mindestversorgungsfeldstärke. Der Grund für die gesteigerte Empfindlichkeit liegt hauptsächlich im Gewinn an Störabstand begründet, der durch die Decodierung im Empfänger (Entspreizung) erzielt wird. Dies ist ein typischer Effekt der Anwendung von „spread-spectrum“-Verfahren, wie sie bei UMTS realisiert sind.

II.4.8 Reproduzierbarkeit

Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit sind vor folgendem Hintergrund sinnvoll: Einerseits kann durch mehrfache Messung an ein und demselben Messpunkt überprüft werden, inwieweit das oben abgeleitete codeselektive Messverfahren in Verbindung mit der Schwenkmethode zuverlässig den Maximalwert im Messvolumen ermitteln kann bzw. wie groß die auftretenden Messwertschwankungen hierbei sind. Andererseits wird hiermit ein Wert für die

verfahrensbedingte Messunsicherheit bzw. die Messunsicherheit der Probennahme ermittelt, der in die Aufstellung einer Messunsicherheitsbetrachtung einfließt.

Zur Ermittlung der Reproduzierbarkeit wurde folgende Vorgehensweise gewählt:

Es wurden codeselektive UMTS-Messungen zehn mal hintereinander an identischen Messpunkten in vier unterschiedlichen Szenarien durchgeführt. Die vier Szenarien sind:

- indoor, mit Sicht zur die Immission maßgeblich bestimmenden UMTS-Sendeanlage
- indoor, ohne Sicht zum Sender
- outdoor, mit Sicht zum Sender, und
- outdoor, ohne Sicht zum Sender.

Mit diesen Umgebungsklassen wird eine Vielzahl von praktisch auftretenden Messszenarien erfasst. An den Messungen waren jeweils zwei Personen beteiligt, um auch eine Streuung durch z.B. unterschiedliche Ausführung der Schwenkmethode einbeziehen zu können.

Für die Messungen wurde ein Spektrumanalysatoren Rohde & Schwarz FSP-7 mit codeselektiver Messoption sowie eine logarithmisch-periodische Antenne Schwarzbeck USLP-9142 eingesetzt.

Indoor mit Sicht

Die Indoor-Messungen mit Sicht erfolgten in einem Wohnhaus in Duisburg. Aus einem Fenster in der Diele besteht Sicht zu einer 148 m entfernten UMTS-Sendestation auf einem Betonmast. Die Sendeantennen sind in 45 m Höhe montiert. Der Winkel, von dem man die UMTS-Antennen vom Messpunkt im 1. OG aus sieht, beträgt 16° . Damit kann davon ausgegangen werden, dass der Messpunkt sich nicht in Hauptstrahlrichtung der Antennen befindet. Bild II.4.33 zeigt den Messpunkt sowie die UMTS-Sendeanlage.



Bild II.4.33: Messort für das Szenario indoor mit Sicht zum UMTS-Sender; Entfernung zur Basisstation etwa 148 m

Für die Auswertung wurden nur die Signale des Betreibers der o.g. Sendeanlage einbezogen. Im Einzelnen wurden die Codes 126 und 414 gemessen und die Summenimmission als quadratische Summation aller am Messpunkt einzeln gemessenen Codes gebildet. Die Ergebnisse sind in Tabelle II.4.26 dokumentiert.

	Messung Nummer									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Summenimmission [dB μ V/m]	94,7	93,3	92,1	94,2	94,7	92,7	93,8	92,6	94,0	93,0
Vertrauensgrenze (P=95 %)	$\pm 1,6$ dB									

Tabelle II.4.26: Ergebnisse der Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit, Indoor mit Sicht zum Sender

Mit diesen Messergebnissen ist es möglich, die Reproduzierbarkeit zu quantifizieren. Dafür wird die so genannte Vertrauensgrenze verwendet, die in der obigen Tabelle einzeln ausgewiesen ist. Die Vertrauensgrenze bestimmt sich wie folgt:

Bei konstanten Bedingungen und genügend häufiger Wiederholung einer Messung ergibt sich eine Verteilung der Messresultate, die der Normalverteilung entspricht. Die Verteilungskurve ist die Gaußkurve mit dem Mittelwert μ und der Standardabweichung σ .

Die Vertrauensgrenze kennzeichnet den Bereich um den Mittelwert, in dem sich mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit (hier 95 %) der Messwert befindet. Üblicherweise wird die Vertrauensgrenze aus der Standardabweichung σ einer großen Zahl von Messwerten berechnet. Dazu wird die Standardabweichung mit einem so genannten Erweiterungsfaktor k multipliziert:

$$P (x \%) = \sigma \cdot k \quad (II.4.5)$$

Für eine Wahrscheinlichkeit von 95 % ist der Erweiterungsfaktor $k=1,96$. Das bedeutet, dass der Messwert sich mit 95 %iger Wahrscheinlichkeit im Bereich $\mu \pm 1,96 \cdot \sigma$ befindet.

Die Gesetzmäßigkeiten der Normalverteilung gelten streng genommen nur bei Vorhandensein einer unendlich großen Zahl an Messwerten. Wenn die Messreihe so wie im vorhandenen Beispiel klein ist, muss man mit einer höheren Unsicherheit rechnen. Dies wird berücksichtigt, indem man anstelle der Normalverteilung die t-Verteilung verwendet, bei der die konkrete Anzahl der vorliegenden Messwerte in die Berechnung einfließt. Statt dem Erweiterungsfaktor k wird dann ein Studentfaktor t verwendet, der für eine 95 %ige Wahrscheinlichkeit bei den hier durchgeführten 10 Probenmessungen den Wert 2,26 (statt 1,96 bei der Normalverteilung) annimmt.

Die hier durchgeführten Reproduzierungsmessungen wurden nach dieser Methodik ausgewertet, wobei die Berechnungen von Mittelwert und Standardabweichung leistungsflussdichtebezogen erfolgten. Die ausgewiesene Vertrauensgrenze (P=95 %) ist dann ein Maß für die

Schwankung der Messwerte um den Mittelwert bzw. ein Maß für die Reproduzierbarkeit der Messungen.

Indoor ohne Sicht

Die Indoor-Messungen ohne direkte Sicht zu einer UMTS-Sendeanlage wurden in einem Büro der IMST GmbH in Kamp-Lintfort durchgeführt. In ca. 350 m Entfernung befindet sich eine UMTS-Station, allerdings besteht keine direkte Sicht vom Büro auf die Anlage. Durch Reflexionen z.B. an einem benachbarten Gebäude gelangen jedoch relevante Immissionen der Sendeanlage in das Bürozimmer.

Für die Auswertung wurden wiederum nur die Signale eines Betreibers einbezogen. Im Einzelnen wurden die Codes 203, 211, 420 und 255 gemessen. Die Codes 203, 420 und 255 stammen von der nahe gelegenen Anlage, der Code 211 von einer anderen Station. Da die Codes 211 und 255 aufgrund ihrer vergleichsweise geringen Immission nicht bei jedem Schwenk erfasst wurden, sind sie bei der unten dokumentierten Summenimmission zur Berechnung der Reproduzierbarkeit vorerst nicht mit einbezogen. Eine Einbeziehung auch dieser Codes ändert jedoch am Gesamtergebnis der Vertrauensgrenze nichts.

	Messung Nummer									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Summenimmission [dB μ V/m]	93,4	91,8	90,9	93,6	93,4	94,5	94,9	93,0	93,8	94,1
Vertrauensgrenze (P=95 %)	$\pm 1,9$ dB									

Tabelle II.4.27: Indoor, ohne Sicht zum Sender

Outdoor mit Sicht

Die Outdoor-Messungen mit Sicht erfolgten in der Umgebung einer auf dem Turm einer Müllverbrennungsanlage montierten UMTS-Station in Kamp-Lintfort. Die Anlage ist vom Messpunkt 363 m entfernt. Der vertikale Winkel vom Messpunkt zu den Antennen beträgt etwa 16°, so dass man hier davon ausgehen kann, nicht in Hauptstrahlrichtung der Antennen zu sein.

Bild II.4.34 zeigt den Messpunkt sowie die UMTS-Sendeanlage.



Bild II.4.34: Messort für das Szenario outdoor mit Sicht zum UMTS-Sender; Entfernung zur Basisstation 363 m. Die Antennen befinden sich auf der Umkränzung am Turm.

Für die Auswertung wurden nur die Signale des Betreibers der o.g. Sendeanlage einbezogen. Im Einzelnen wurden die Codes 475, 474, 473 und 497 gemessen. Da der Code 497 aufgrund seiner geringen Immission nicht bei jedem Schwenk erfasst wurden, ist er bei der unten dokumentierten Summenimmission zur Berechnung der Reproduzierbarkeit vorerst nicht mit einbezogen. Eine Einbeziehung auch dieses Codes ändert jedoch am Gesamtergebnis der Vertrauensgrenze nichts.

	Messung Nummer									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Summenimmission [dB μ V/m]	86,3	86,7	84,9	86,3	86,6	86,5	86,8	86,4	85,8	86,6
Vertrauensgrenze (P=95 %)	$\pm 1,0$ dB									

Tabelle II.4.28: Ergebnisse der Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit, Outdoor mit Sicht zum Sender

Outdoor ohne Sicht

Die Outdoor-Messungen ohne Sicht erfolgten am Institutsgebäude der IMST GmbH in Kamp-Lintfort. Wie schon beim Szenario „Indoor ohne Sicht“ befindet sich in etwa 350 m eine UMTS-Anlage. Allerdings wurde der Messort so ausgewählt, dass sich das IMST-Gebäude direkt zwischen Sendeanlage und Messpunkt befindet, so dass Immissionen der Anlage nicht über einen direkten Ausbreitungsweg zum Messort gelangen können.

Für die Auswertung wurden nur die Signale des Betreibers der o.g. Sendeanlage einbezogen. Im Einzelnen wurden die Codes 203, 211, 108 und 299 gemessen. Nur der Code 203 stammt von der nahe gelegenen Anlage. Da der Code 108 aufgrund seiner geringen Immision nicht bei jedem Schwenk erfasst wurde, ist er bei der unten dokumentierten Summenimmission zur Berechnung der Reproduzierbarkeit vorerst nicht mit einbezogen. Eine Einbeziehung auch dieses Codes ändert jedoch am Gesamtergebnis der Vertrauensgrenze nichts.

	Messung Nummer									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Summenimmission [dB μ V/m]	79,4	79,4	80,3	80,3	80,6	80,3	81,6	80,6	80,3	79,7
Vertrauensgrenze (P=95 %)	$\pm 1,2$ dB									

Tabelle II.4.29: Ergebnisse der Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit, Outdoor ohne Sicht zum Sender

Folgende Erkenntnisse können aus den berechneten Vertrauensgrenzen gezogen werden:

- Die Reproduzierbarkeit kann als gut bezeichnet werden. Die Vertrauensgrenzen als Maß für die Wiederholpräzision liegen je nach Szenario im Bereich zwischen $\pm 1,0$ dB und $\pm 1,9$ dB.
- Bei Outdoor-Messungen ist die Reproduzierbarkeit besser als bei Indoor-Messungen. Die schlechteste Reproduzierbarkeit wird im Szenario „Indoor ohne Sicht“ erreicht. Hier zeigt sich offensichtlich der bereits in [RIE 04] beobachtete Effekt, dass in Szenarien mit ausgeprägter Mehrwegeausbreitung das Maximum schwieriger zu finden ist als z.B. bei GSM-Messungen.
- Insgesamt betrachtet ist die Reproduzierbarkeit etwas schlechter als bei der frequenzselektiven Messung breitbandiger digitaler Funkdienste wie DVB-T oder DAB. In [SCH 06] wurden hierfür Reproduzierbarkeiten zwischen $\pm 0,4$ dB und $\pm 1,2$ dB ermittelt. Es wird vermutet, dass der codeselektive Algorithmus, der in den entsprechenden Messgeräten implementiert ist, zu einem Teil für diese verringerte Reproduzierbarkeit verantwortlich ist.

Insgesamt kann aber festgestellt werden, dass das codeselektive Messverfahren mit der Schwenkmethode gut für die Erfassung der UMTS-Signale unter realen Bedingungen geeignet ist. Die mittlere „erweiterte Messunsicherheit“ (d.h. Vertrauensgrenze P=95 %) wird vor allem unter Berücksichtigung der für vorliegende Aufgabenstellung besonders bedeutsamen Indoor-Messungen zu $\pm 1,8$ dB abgeschätzt.

II.4.9 Messunsicherheit

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

Die gesamte Messunsicherheit setzt sich aus zwei Beiträgen zusammen:

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

Im folgenden werden sowohl für die spektrale, als auch für die codeselektive Messung diejenigen Teilbeträge aufgelistet, die in die Berechnung der Gesamtmessunsicherheit eingehen. Eine detaillierte Betrachtung der Messunsicherheiten der breitbandigen Messung ist hier entbehrlich, da diese in den vorangegangenen Abschnitten als lediglich für Überblickszwecke tauglich eingestuft wurde. Messunsicherheitsbudgets für breitbandige Messungen finden sich in [BUWAL 03].

II.4.9.1 Frequenzselektive Messung

Die Messunsicherheiten bei der frequenzselektiven Messung setzt sich aus folgenden Einzelkomponenten zusammen:

Messgerät:

Hier werden diejenigen Unsicherheitsbeiträge primär bezüglich der Amplitudengenauigkeit übernommen, die der Hersteller in der Produktdokumentation spezifiziert hat.

Antenne

Ausschlaggebend ist hier die Kalibrierengenauigkeit der Antenne, die dem jeweiligen Kalibrierbericht zu entnehmen ist. Antennen werden aber in der Regel nur bei einigen ausgewählten Frequenzpunkten kalibriert, weswegen sich bei der Interpolation für dazwischen liegende Werte auch eine Unsicherheit ergibt.

Kabel

Hier gilt das für die Antennen Gesagte.

Zusätzlich ergeben sich durch Anschluss des Kabels an Antenne und Spektrumanalysator Fehlanpassungen, die ebenfalls berücksichtigt werden müssen. Eine Beschreibung zum speziellen Vorgehen ist z.B. in [BUWAL 03] enthalten.

Für ein typisches frequenzselektives UMTS-Messsystem (hier: Spektrumanalysator Rohde & Schwarz FSP-7, logarithmisch-periodische Antenne Schwarzbeck USLP-9142) kann beispielsweise folgendes Messunsicherheitsbudget nach Tabelle II.4.30 aufgestellt werden. Auf zwei Unsicherheitsbeiträge soll an dieser Stelle gesondert eingegangen werden:

Antennentyp

In Abschnitt II.4.6 wurde herausgearbeitet, dass vor allem bei schwach richtenden oder isotropen Antennen der Messende, abhängig von Frequenz, Abstand, Polarisation und Bodenbeschaffenheit, einen Einfluss auf das Messergebnis hat, der in ähnlich gelagerten Publikationen zu dieser Thematik, z.B. [BUWAL 03], nicht ausgewiesen wird. Hinzu kommen Fehler durch die nicht korrekte Erfassung der Polarisation, inkorrekte Berücksichtigung aller Empfangsrichtungen und mögliche Unterschiede des Freifeldantennenfaktors in realen Umgebungen.

Bei vorliegender Fehlerbetrachtung wird hierfür ein Beitrag von 2 dB unter der Voraussetzung des Einsatz der log.-per. Antenne USLP-9142 angesetzt. Bei Verwendung von dipolartigen Antennentypen oder isotropen Kugelsonden ist dieser Unsicherheitsbeitrag entsprechend den Ausführungen in Abschnitt II.4.6 anzupassen.

Probennahme

Zur Untersuchungen der Reproduzierbarkeit sind im Abschnitt II.4.8 ausführliche Untersuchungen vorgestellt worden. Als Ergebnis wird für die Unsicherheit durch die Probennahme ein Beitrag von 1,8 dB berücksichtigt. Die 1,8 dB wurden zwar streng genommen nur für die Reproduzierbarkeit bei der codeselektiven Messung abgeleitet. Die Reproduzierbarkeit bei frequenzselektiven Messungen dürfte jedoch in ähnlicher Größenordnung oder sogar geringfügig besser liegen [SCH 06].

Komponente	Einflussfaktor	Spezifizierte Unsicherheit [dB]	Verteilung	Divisor	Standardunsicherheit [dB]
FSP-7	Absolutpegel	0,2	Normal	2	0,10
FSP-7	Frequenzgang	0,5	Normal	2	0,25
FSP-7	Linearitätsabweichung	0,2	Rechteck	1,73	0,12
Kabel	Absolutkalibrierung	0,2	Normal	2	0,10
Kabel	Interpolation	0,1	Rechteck	1,73	0,06
USLP-9142	Absolutkalibrierung	1,5	Normal	2	0,75
USLP-9142	Interpolation	0,1	Rechteck	1,73	0,06
Fehlanpassung	Kabel/FSP-7	0,16	U-förmig	1,41	0,11
Fehlanpassung	USLP-9142/Kabel	0,13	U-förmig	1,41	0,09
Fehlanpassung	USLP-9142/FSP-7	0,18	U-förmig	1,41	0,13
USLP-9142	Umgebung	2,0	Normal	2	1,0
Probennahme	Reproduzierbarkeit	1,8	Normal	2	0,9
Kombinierte Standardunsicherheit					1,59
Erweiterte Messunsicherheit (k=2)					3,17

Tabelle II.4.30: Beispiel für Messunsicherheitsbudget Messungen mit FSP-7 und USLP-9142 (frequenzselektive Erfassung)

Die erweiterte Messunsicherheit für ein Vertrauensintervall von 95 % beträgt für dieses Beispiel 3,2 dB. Diese Unsicherheit bewegt sich damit im für Hochfrequenz-Immissionsmessungen üblichen Bereich.

II.4.9.2 Codeselektive Messung

Auch für die codeselektive Messung kann ein Unsicherheitsbudget aufgestellt werden, das sich allerdings etwas von dem einer frequenzselektiven Messung unterscheidet. Umfangreiche Vergleichsmessungen des Schweizer Bundesamtes für Metrologie und Akkreditierung (METAS) ergaben, dass, neben den bisherigen in Tabelle II.4.30 angegebenen Unsicherheitsbeiträgen noch ein zusätzlicher Beitrag der Codedetektion zu berücksichtigen ist [RYS 05]. Eine Auswertung von 12 verschiedenen Geräten ergab hier einen Unsicherheitsfaktor von 0,75 dB.

Führt man mit dem FSP-7 keine frequenzselektive sondern eine codeselektive Messung durch, so muss die Tabelle wie folgt erweitert werden:

Komponente	Einflussfaktor	Spezifizierte Unsicherheit [dB]	Verteilung	Divisor	Standardunsicherheit [dB]
FSP-7	Absolutpegel	0,2	Normal	2	0,10
FSP-7	Frequenzgang	0,5	Normal	2	0,25
FSP-7	Linearitätsabweichung	0,2	Rechteck	1,73	0,12
FSP-7	Unsicherheit der Codedetektion	0,75	Normal	2	0,375
Kabel	Absolutkalibrierung	0,2	Normal	2	0,10
Kabel	Interpolation	0,1	Rechteck	1,73	0,06
USLP-9142	Absolutkalibrierung	1,5	Normal	2	0,75
USLP-9142	Interpolation	0,1	Rechteck	1,73	0,06
Fehlanpassung	Kabel/FSP-7	0,16	U-förmig	1,41	0,11
Fehlanpassung	USLP-9142/Kabel	0,13	U-förmig	1,41	0,09
Fehlanpassung	USLP-9142/FSP-7	0,18	U-förmig	1,41	0,13
USLP-9142	Umgebung	2,0	Normal	2	1,0
Probennahme	Reproduzierbarkeit	1,8	Normal	2	0,9
Kombinierte Standardunsicherheit					1,63
Erweiterte Messunsicherheit (k=2)					3,26

Tabelle II.4.31: Beispiel für Messunsicherheitsbudget Messungen mit FSP-7 und USLP-9142 (codeselektive Erfassung)

Die erweiterte Messunsicherheit für ein Vertrauensintervall von 95 % beträgt für dieses Beispiel 3,3 dB. Diese Unsicherheit bewegt sich also auch bei codeselektiver Erfassung im für Hochfrequenz-Immissionsmessungen üblichen Bereich.

Ebenfalls in [RYS 05] wurde darauf hingewiesen, dass sich die Unsicherheit der Codedetektion bei Mehrwegeausbreitung unter Umständen noch vergrößern kann: Bei bestimmten Phasenverschiebungen der Teilsignale ergab sich bei einigen Geräten Unterbewertungen von 2 bis 3 dB. Allerdings traten diese nur bei simulierter Mehrwegeausbreitung und stationären Verhältnissen auf und zwar dann, wenn sich die Mehrwegesignale nahezu auslöschten. Bei konstruktiver Interferenz war die Abweichung geringer. Nach Auffassung von METAS ist dieser Effekt im realen Umfeld bei Anwendung der „Schwenkmethode“ vermutlich von geringer Bedeutung, da durch des Schwenken sich sowohl die Phasenverschiebung und die Amplitudenverhältnisse der Einzelsignale permanent verändern, so dass immer auch Kombinationen vorkommen, bei denen korrekte Ergebnisse geliefert werden.

II.4.10 Dokumentation

Zur Dokumentation der Messungen ist ein Messbericht anzufertigen. Der Messbericht sollte mindestens so aufbereitet sein, dass

- für den Auftraggeber das Ergebnis der Messungen klar und verständlich dokumentiert ist, und
- für Fachleute alle technischen und administrativen Informationen derart enthalten sind, dass das Vorgehen bei der Messung, die Rohergebnisse und die Auswertung der Messdaten *nachvollziehbar* sind.

Folgende Gliederung hat sich als geeignet erwiesen:

Administrative Angaben

Hier sind folgende Daten aufzuführen:

- Auftraggeber, Auftragnehmer mit den entsprechenden Anschriften und Kontaktpersonen,
- Messzeit, Messort, beteiligte Personen,
- eindeutige Nummerierung des Berichtes,
- eindeutige Bezeichnung der gemessenen Anlage

Gegenstand der Messung

Hier ist zu beschreiben, was der Hintergrund und Gegenstand der Messung war. Darüber hinaus ist darzulegen, ob

- neben UMTS- auch GSM-Mobilfunkimmissionen gemessen wurden,
- nur die Immissionen von der Hauptsendeanlage vor Ort gemessen wurden,
- oder zusätzlich die Immissionen anderer Mobilfunkanlagen einbezogen wurden,
- oder zusätzlich auch andere HF oder NF Quellen berücksichtigt wurden, sowie
- ob ein Vergleich mit den Grenzwerten vorgenommen wird und
- ob zusätzlich eine biologische Bewertung der gemessenen Daten stattfindet.

Daten der untersuchten Mobilfunk Sendeanlage

- Ort der Anlage,
- Betreiberinformation,
- sofern verfügbar: Anzahl der Sektoren und Kanäle pro Sektor, ggf. Scrambling-Codes der Sektoren,
- ggf. Information zu umliegenden Mobilfunk Sendeanlagen.

Die Dokumentation der Sendeanlage sollte mit Fotos hinterlegt werden.

Auswahl der Messpunkte

Hier sind sowohl die Messpunkte an sich zu beschreiben, als auch die Gesichtspunkte, nach denen diese ausgewählt wurden. Die Messpunkte sind mit Fotos zu hinterlegen.

Verwendete Messgeräte

Hier sind Informationen bezüglich Art, Gerätebezeichnung, Hersteller, Seriennummer und Datum der letzten bzw. nächsten Kalibrierung der eingesetzten Messgeräte und ggf. Messhilfsmittel anzugeben.

Eingesetztes Messverfahren

Das Messverfahren ist prinzipiell zu beschreiben. Hierzu gehört eine Auskunft darüber,

- ob frequenzselektiv, breitbandig oder codeselektiv gemessen wurde,
- ob eine Maximalwertermittlung am Messpunkt stattfand und wenn ja mit welchem Verfahren (z.B. Schwenkmethode).

Messergebnisse

Im Bericht sind die Messergebnisse in Kurzform getrennt für jeden einzelnen Messpunkt anzugeben. Detaillierte Daten sollten in einen Anhang ausgelagert werden. Im einzelnen sind dort zu dokumentieren:

- die originär gemessenen Werte (d.h. in der Form, wie sie mit dem Spektrumanalysator, der Breitbandsonde bzw. dem codeselektiven Messgerät ermittelt wurden),
- sofern eine Umrechnung auf Leistungsflussdichte bzw. Feldstärke erst später erfolgte, die aus den Rohdaten ermittelten Leistungsflussdichten oder Feldstärken,
- eine Angabe, in wie weit eine Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung erfolgt ist, sowie die daraus resultierende maximale Gesamtimmission,
- bei Berücksichtigung von Nebensendeanlagen und anderen HF Quellen deren Beiträge sowie die resultierende Gesamtimmission.

Bezüglich der Extrapolation der Mobilfunk-Immissionen auf maximale Anlagenauslastung wird die Transparenz der Messungen erhöht, wenn folgende Informationen enthalten sind:

- „Minimale“ Immission: Diese ergibt sich, in dem nur die Signalisierungskanäle in die Auswertung einbezogen werden. Dieser Zustand wird in der Regel in den Nachtstunden erreicht, wenn kein Verkehrsaufkommen vorhanden ist.
- „Aktuelle“ Immission: Hier erfolgt eine Hochrechnung der Immissionen auf den aktuellen Ausbauzustand der Anlage.
- „Maximale“ Immission: Die Hochrechnung erfolgt auf Basis der bei der BNetzA maximal beantragten Anlagenkonfiguration.

Für den Vergleich mit den Grenzwerten ist allein die „maximale“ Immission entscheidend!

Grenzwerte und Vergleich zu den Messwerten

Sofern ein Grenzwertvergleich Gegenstand des Messprojektes ist, sind die zur Beurteilung der Messergebnisse angesetzten Grenzwerte darzustellen und ggf. zu erläutern. Anschließend sind die Messwerte mit den Grenzwerten zu vergleichen. Die Messergebnisse sind dabei sowohl absolut, als auch in Relation zu den Grenzwerten anzugeben (z.B. als „Maß der Grenzwertunterschreitung“ oder als „Grad der Grenzwertausschöpfung“).

Messunsicherheit

Jedes Messergebnis ist mit einer Messunsicherheit behaftet. Diese Messunsicherheit muss durch das Messlabor bestimmt werden und ist im Prüfbericht anzugeben. Nähere Angaben hierzu finden sich im Abschnitt II.4.9

II.4.11 Qualitätssicherung

Im messtechnischen Alltag wird es sich nie mit hundertprozentiger Sicherheit vermeiden lassen, dass Defekte an der Messausrüstung zu ungenauen Messergebnissen führen. Auch Bedienungsfehler, sei es aus Nachlässigkeit oder wegen mangelnder Fachkenntnis des Personals werden sich in der Praxis nie ganz vermeiden lassen. Zweck von Qualitätssicherungsmaßnahmen ist es daher, mit der Möglichkeit des Auftretens derartiger unerwünschter Fälle bewusst zu rechnen und im Vorfeld Handlungsanweisungen zu geben, mit denen solche Fehler mit hoher Wahrscheinlichkeit erkannt und negative Auswirkungen auf die Qualität möglichst minimiert werden. Manche Maßnahmen zur Qualitätssicherung gelten für viele Arten von EMF-Messungen, einige Hinweise sind jedoch speziell für UMTS-Expositionsmessungen angebracht. Im folgenden einige Anmerkungen zu den Einflussfaktoren „Technik“ und „Mensch“:

„Kalibrierung ist nicht alles“

Selbstverständlich sollten für EMF-Messungen Geräte eingesetzt werden, die einem regelmäßigen Kalibrierzyklus unterliegen. Dies gilt insbesondere für die Antennen, das Messkabel und das Messgerät. Der Kalibrierzyklus richtet sich nach der „Robustheit“ bzw. der „Belastung“ der Komponente (Beispielsweise unterliegen die Messkabel meist größeren mechanischen Belastungen als die Antennen) und natürlich nach der Einsatzhäufigkeit.

Allerdings ist es genau so wichtig, zwischen den einzelnen Kalibrierungen zu überprüfen, ob sich beispielsweise durch einen Defekt die Eigenschaften der Messmittel deutlich verändert haben. Dies kann durch einfache Überprüfungsmessungen sichergestellt werden, die zwar nicht die Genauigkeit von Kalibrierungen besitzen, jedoch signifikante Änderungen in der Performance der Ausrüstung an den Tag bringen können. Überprüfungsmessungen sollten beispielsweise vor und nach jeder EMF-Messung durchgeführt werden. Allerdings sind für derartige Überprüfungsmessungen einige zusätzliche Mess- und Testgeräte notwendig.

Mittels der Messung des Eingangsreflexionsfaktors der Messantenne können gravierende Veränderungen in ihrem Verhalten erkannt werden, die Dämpfung des Messkabels kann ebenfalls durch eine Vierpolmessung mit einem Netzwerkanalysator oder in einfacherer Form punktweise mit einem Signalgenerator und einem Spektrumanalysator geprüft werden. Gerade die Stecker der Messkabel sind anfällig gegen mechanische Belastungen. Frequenzgang und Linearität des Analysators sind ebenfalls mittels Messungen der Ausgangssignale eines HF-Generators prüfbar. Bei codeselektiven UMTS-Messgeräten ist die Prüfung deutlich schwieriger, da hier spezielle Vektorsignalgeneratoren notwendig sind, die eine UMTS-Basisstation simulieren müssen, damit sich das Messgerät aufsynchronisieren und die Decodierung durchführen kann. Derartige Generatoren sind relativ teuer und daher nicht in jedem Labor verfügbar. Dies bedeutet, dass für diese Geräte mit kürzeren Kalibrierintervallen geplant werden sollte, da eine Eigenüberprüfung nur schwer möglich ist. Inzwischen bieten erste nationale metrologische Ämter (z.B. das Schweizer METAS) die rückführbare Kalibrierung codeselektiver Messgeräte an.

„Blindes Vertrauen in die Messtechnik ist gefährlich“

Gerade die codeselektiven Messgeräte verführen zu blindem Vertrauen, da die Resultate meist fix und fertig in alphanumerischer Form angeboten werden und das vom Spektrumanalysator gewohnte Auswerten der spektralen Darstellung entfällt. Die sehr komplizierte und auch noch relativ neue codeselektive Messtechnik bietet dem Nutzer gelegentlich einige Überraschungen, die, wenn man sich nicht angemessen auf sie eingestellt hat, zu Fehlinterpretationen führen können. Hier kann nur empfohlen werden, jedes Messergebnis kritisch zu hinterfragen und beispielsweise im Vorfeld der Messung eine überschlägige Berechnung der zu erwartenden Feldstärke mittels typischer Anlagendaten, Entfernung und Höhenunterschied (siehe Kapitel II.2) durchzuführen. Decken sich die Mess- und Berechnungsergebnisse in etwa, wächst auch die Wahrscheinlichkeit, dass die Messung korrekt durchgeführt wurde, bei deutlichen Unterschieden sollte man die Messdurchführung hinterfragen und eventuell die Messung wiederholen.

Die mehrmalige Durchführung einer Messung (was bei der Schwenkmethode auch meist keinen so großen zusätzlichen Zeitaufwand bedeutet) ist ebenfalls eine einfache Maßnahme zur Vermeidung von beispielsweise gelegentlich auftretenden Unregelmäßigkeiten bei der codeselektiven Messtechnik.

Besonders empfohlen sei an dieser Stelle noch, vor der Durchführung einer codeselektiven Messung mittels einer frequenzselektiven „Vormessung“ sich einen Überblick zu verschaffen, auf welchen Trägerfrequenzen überhaupt nennenswerte UMTS-Signale vorhanden sind und anschließend erst die codeselektive Messung durchzuführen. Ein Vergleich der codeselektiven Messergebnisse mit den Resultaten der frequenzselektiven Messung kann Hinweise auf Fehler geben. Beispielsweise sollte die Summe aller CPICH-Leistungen eines Kanals, die mit der codeselektiven Messtechnik erfasst wurden, kleiner sein, als die frequenzselektiv gemessene Gesamtleistung des Kanals.

Die Durchführenden von EMF-Messungen bei UMTS-Stationen sollten also eine Mindestmenge an Erfahrung auf diesem Sektor mitbringen. Regelmäßige Schulungen, Erfahrungsaustausch, Überprüfungen durch eine zweite Person aber auch Arbeitsanweisungen und

standardisierte Messprotokolle verringern das Risiko von Messfehlern aufgrund von Unzulänglichkeiten des Faktors „Bedienpersonal“. Zur Qualifikation des Messpersonals siehe auch die Hinweise in [LAI 04].

II.4.12 Messverfahren zur Überprüfung der Grenzwerte

Sind durch EMF-Messungen die Einhaltung geltender Grenzwerte nach 26. BImSchV nachzuweisen, so müssen insbesondere die folgenden Punkte beachtet werden:

- Die Immission ist für den Punkt mit der größten Einwirkung zu bestimmen, d.h. im Messvolumen ist der größte Wert der Exposition zu suchen und für die Bewertung zu verwenden.
- Die Messung ist bei höchster betrieblicher Anlagenauslastung durchzuführen, also in der Betriebsart der für die Immission verantwortlichen Sendeanlagen, in der diese die maximalen Feldstärken im betrachteten Volumen erzeugen. Kann diese Betriebsart nicht sichergestellt werden, ist der Messwert geeignet auf höchste Anlagenauslastung zu extrapolieren.
- Bei Vorhandensein mehrere unterschiedlicher Signale ist eine grenzwert- und leistungsbezogene Summierung der Felder durchzuführen.
- Die bei den Erhebungen auftretende Messunsicherheit ist geeignet zu berücksichtigen.

Für die Suche der größten Feldstärke im Messvolumen hat sich, wie in den vorangehenden Kapiteln bereits dargelegt, die „Schwenkmethode“ als geeignetes Verfahren herausgestellt. Mit diesem Verfahren ist es ohne großen Zeitaufwand möglich, unter Verwendung der „Max-Hold“-Funktion des Messgerätes die größten Felder im Messvolumen zu bestimmen. Allerdings geht dabei die Information verloren, an welchem Punkt im Raum diese Größtwerte aufgetreten sind. Auch führt die „Schwenkmethode“ zu einer systematischen Überbewertung der Exposition, da hierbei immer angenommen wird, dass die von verschiedenen Sendeanlagen im Volumen erzeugten Maxima an exakt der gleichen Stelle auftreten, was in der Realität nicht unbedingt so sein muss.

Da es im alltäglichen Wirkbetrieb kaum möglich ist, eine UMTS-Station für den Zeitraum der Messungen in den Zustand höchster betrieblicher Auslastung (Ausstrahlung der maximal möglichen Leistung) zu bringen, muss die Maximalexposition durch geeignete Hochrechnungsfaktoren aus den Messwerten extrapoliert werden. Je nach angewendetem Messverfahren ergeben sich dabei mehr oder weniger zuverlässige Resultate. Die Problematiken, die für diese unterschiedliche Qualität der Extrapolation verantwortlich sind, werden im folgenden erläutert.

In Tabelle II.4.32 sind alle UMTS-Signalisierungskanäle aufgelistet, die von den Stationen permanent gesendet werden. Die Summe dieser Signale stellt die minimale Leistung einer

UMTS-Station dar, die abgestrahlt wird, auch wenn momentan keine Verbindung zu einem Teilnehmer bedient wird.

Abkürzung	Name	Besonderheit
P-CPICH	Common pilot channel	permanent on
P-CCPCH	Primary common control physical channel	600 μ s on, 67 μ s off
P-SCH	Primary synchronization channel	67 μ s on, 600 μ s off
S-SCH	Secondary synchronization channel	67 μ s on, 600 μ s off

Tabelle II.4.32: Synchronisations- bzw. „Pilotkanäle“, die permanent gesendet werden

Primärer und sekundärer Synchronisationskanal (P-SCH, S-SCH) werden nur während der ersten zehn Prozent eines Zeitschlitzes übertragen. Ein Zeitschlitz hat eine Dauer von 667 Millisekunden. Die restlichen 90 Prozent des Zeitschlitzes sind die SCH's deaktiviert, stattdessen wird der P-CCPCH ausgesendet. Die SCH's und der P-CCPCH sind also nie gleichzeitig in der Luft (siehe Bild II.4.35). Der P-CPICH hingegen wird permanent abgegeben. Bei der Bestimmung der Gesamtleistung aller permanent vorhandenen Signalisierungskanäle darf also nicht einfach die Leistungssumme der vier in obiger Tabelle angegebenen Kanäle gebildet werden. Die Bedeutung dieser vier „Pilotkanäle“ wurde bereits im ersten Projektteil näher erläutert.

Sowohl bei einer breitbandigen, als auch einer frequenzselektiven Messung kann nicht die Leistung einer dieser Signale, sondern immer nur die Summenleistung aller Pilotensignale bestimmt werden. Daher kann eine Hochrechnung auf maximale Anlagenauslastung auch nur durch einen Leistungsvergleich zwischen gesamter Pilotleistung und Maximalleistung der Station realisiert werden.

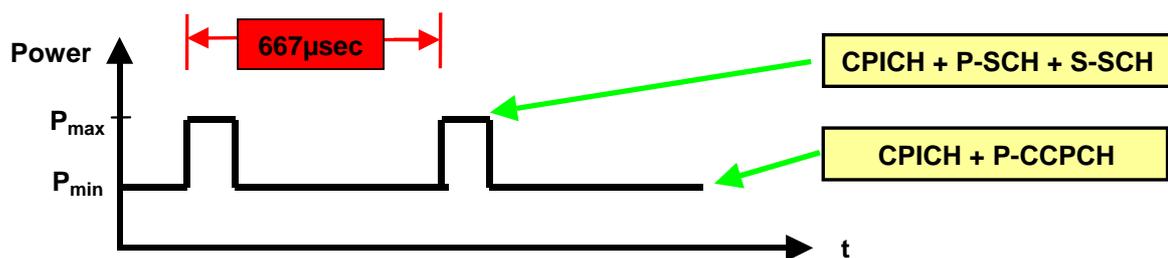


Bild II.4.35: Zeitlicher Verlauf der Leistung der Pilotensignale einer UMTS-Station

Für die Hochrechnung wird angenommen, dass zum Zeitpunkt der Messung nur diese Pilotensignale von der Station abgegeben werden. Ist aufgrund von Auskünften der Betreiber die Summenleistung der einzelnen Pilotkanäle P_{Pilot} und auch die Maximalleistung P_{max} der Station bekannt, so kann ein Extrapolationsfaktor k' bestimmt werden, der sich nach folgender Formel berechnet:

$$K' = P_{\max}/P_{\text{Pilot}} \quad (\text{II.4.6})$$

Die hochgerechnete Exposition E_{\max} ergibt sich also durch Multiplikation der gemessenen Immission E_{gem} mit dem Extrapolationsfaktor K' oder, falls die Angaben in dB vorliegen, durch Addition des Extrapolationsfaktors in dB.

$$E_{\max} = E_{\text{gem}} [\text{dB}] + K' [\text{dB}]. \quad (\text{II.4.7})$$

Dieses Verfahren hat allerdings einige Nachteile, die zu einer deutlichen Überbewertung der Exposition führen können:

Breitbandmessung

Bei einer breitbandigen Messung kann nicht zwischen den Feldern unterschiedlicher Betreiber unterschieden werden, da das Messgerät immer die Summe aller vorhandenen hochfrequenten Signale anzeigt. Erzeugen am Messpunkt also Stationen unterschiedlicher Betreiber nennenswerte Anteile an der Gesamtexposition, kann nicht zugeordnet werden, welche Anteile des Messwertes auf die einzelnen Betreiber (Frequenzkanäle) fällt. Wie aus Tabelle II.4.33 ersichtlich, haben die Betreiber in ihren Netzen durchaus unterschiedliche Leistungen bei den Pilotsignalen eingestellt. Für die Extrapolation bleibt im Sinne einer „worst case“-Betrachtung nichts anderes übrig, als den größten Hochrechnungsfaktor für die Extrapolation zu verwenden (aus den Einzelhochrechnungsfaktoren der für den Messort relevanten Betreiber). Dies führt natürlich grundsätzlich zu einer Überbewertung der Exposition.

Ein weiterer Grund für die bei der Breitbandmessung auftretende Überbewertung ist, dass auch Signale, die nicht von UMTS-Stationen abgegeben werden (z.B. von GSM-Anlagen oder Rundfunk- und TV-Sendern, sowie hausinternen Quellen, wie DECT-Telefonen) aufgrund der nicht vorhandenen Frequenzselektivität als UMTS-Felder betrachtet werden und in die Hochrechnung mit einfließen. Nur wenn die UMTS-Felder am Messort die deutlich dominierende Expositionsquelle darstellen, kann dieser Effekt vernachlässigt werden. Dieser Einfluss kann auch minimiert werden, wenn man Breitbandsonden verwendet, die möglichst nur im UMTS-Frequenzbereich empfindlich sind. Derartige Probes werden seit einiger Zeit von manchen Herstellern angeboten.

Ein drittes Problem tritt auf, wenn zum Zeitpunkt der Messung Datenverkehr zu Teilnehmern abgewickelt wird. In diesem Fall wird nicht nur die Pilotleistung, sondern auch die Leistung der Datenkanäle gemessen und für die Hochrechnung herangezogen. Dies führt ebenfalls zu einer Überbewertung der Exposition, maximal um den Faktor K' . Aus all diesen Gründen ist eine breitbandige Messung nur wenig geeignet, brauchbare Extrapolationswerte für höchste betriebliche Anlagenauslastung zu liefern.

Frequenzselektive Messung

Eine frequenzselektive Messung ist eher in der Lage, brauchbare hochgerechnete Immissionswerte zu liefern, da aufgrund der Frequenzselektivität der Einfluss von Fremdsignalen (andere Funksendeanlagen) ausgeschlossen ist. Auch kann die Pilotleistung für jeden UMTS-Frequenzkanal separat bestimmt und mit dem entsprechenden Hochrechnungsfaktor K' multipliziert werden.

Zwei Probleme, die zu einer Überbewertung führen, bleiben jedoch: Auch bei der frequenzselektiven Erfassung ist nicht ausgeschlossen, dass zum Zeitpunkt der Messung Datenverkehr abgewickelt wurde und es so, wie bei der Breitbandmessung, zu einer Überbewertung der Exposition kommt.

Außerdem ist die Leistung der Pilotkanäle kein für das gesamte Netz konstanter Wert. Wie aus den Beispielen in Tabelle II.4.33 zu ersehen, unterscheiden sich die Hochrechnungsfaktoren nicht nur von Betreiber zu Betreiber sondern auch heute schon zwischen einzelnen Regionen eines Betreibers. Ursache dafür ist, dass die Betreiber in den Regionen teilweise Systemtechnik unterschiedlicher Lieferanten einsetzen und je nach Lieferant eine etwas andere individuelle Parametrisierung der Anlagen vorliegt. Die Zahlenwerte in Tabelle II.4.33 wurden von den Betreibern auf Rückfrage zur Verfügung gestellt. Zusätzlich muss in Zukunft damit gerechnet werden, dass die Pilotleistungen mehr und mehr stationsindividuell unterschiedlich eingestellt werden, um die Netzperformance zu optimieren. Galten die Werte aus Tabelle II.4.33 also zu Beginn des UMTS-Betriebs für alle Stationen der Region, muss in Zukunft damit gerechnet werden, dass die Parameter und damit der Hochrechnungsfaktor für jede Anlage unterschiedlich sind. Selbst bei der Messung in der Nähe nur eines UMTS-Standortes, der ja gewöhnlich aus drei Sektoren besteht, muss im schlimmsten Fall mit drei unterschiedlichen Hochrechnungsfaktoren K' gerechnet werden. Für die Extrapolation bleibt dann wieder nichts anderes übrig, als den größten der drei Hochrechnungsfaktoren zu verwenden, was wiederum zu einer Überbewertung führt. Misst man an einem beliebigen Punkt ohne direkte Nähe zu einer UMTS-Anlage, wird die Ermittlung des Hochrechnungsfaktors noch schwieriger, da aus dem Ergebnis der frequenzselektiven Messung nicht geschlossen werden kann, welche Stationen des Betreibers signifikanten Anteil an der Summenimmission am Messpunkt besitzen, da ja alle Signale mit der gleichen Trägerfrequenz gesendet werden.

Insgesamt gesehen, bietet das frequenzselektive Verfahren also die Möglichkeit, mit einem geringeren Potenzial der Überbewertung als bei der Breitbandmessung einen Extrapolationswert auf höchste betriebliche Anlagenauslastung zu liefern, jedoch sind auch hier nicht alle Möglichkeiten der Überbewertung ausgeschlossen. Zudem ist die Bestimmung des Extrapolationsfaktors K' relativ mühsam, da unter Umständen eine Vielzahl von individuellen Parametern verschiedener UMTS-Stationen von den Betreibern erfragt werden müssen.

Betreiber / Region	P_{\max}	$P_{\text{CPICH(CW)}}$	$P_{\text{P-CCPCH}}$ (600µs on, 67 µs off)	$P_{\text{P-SCH}}$ (67µs on, 600µs off)	$P_{\text{S-SCH}}$ (67µs on, 600µs off)	P_{Pilot}	K' [dB]
Betr. 1/Reg. 1	20,0	2,00	1,10	1,00	1,00	3,18	7,98
Betr. 1/Reg. 2	20,0	2,00	1,00	1,26	1,26	3,15	8,03
Betr. 2/Reg. 1	20,0	2,00	0,63	1,00	1,00	2,76	8,60
Betr. 2/Reg. 2	20,0	2,00	1,26	1,26	1,26	3,38	7,72
Betr. 2/Reg. 3	20,0	2,00	1,00	1,00	1,00	3,10	8,09

Tabelle II.4.33: Bestimmung der Summenleistung der Pilotkanäle aus den Angaben verschiedener Betreiber in verschiedenen Regionen Deutschlands (Alle Leistungsangaben in Watt)

Codeselektive Messung

Die bestmögliche Hochrechnung auf maximale Anlagenauslastung ermöglicht die codeselektive Erfassung. Wie bereits mehrfach erläutert, werden bei diesem Messverfahren nur die Feldstärken gemessen, die durch die P-CPICH-Signale erzeugt werden. Da die abgestrahlte Leistung derzeit beim P-CPICH konstant ist, ergibt sich ein Messwert, der unabhängig vom momentanen Auslastungsgrad der Station ist. Außerdem lässt sich aufgrund der individuellen Scramblingcodenummer jeder Station genau zuordnen, von welcher Anlage die Immission erzeugt wurde. Dadurch wird der Aufwand für die Abfrage der Leistungen beim Betreiber deutlich verringert. Es ist nur noch zu erfragen, welcher Bruchteil der Maximalleistung P_{\max} der gemessenen Stationen durch den P-CPICH abgestrahlt wird (P_{CPICH}). Aus diesen Angaben kann wie folgt die hochgerechnete Immission unter Zuhilfenahme des Korrekturfaktors K berechnet werden:

$$K = P_{\max}/P_{\text{CPICH}} \quad (\text{II.4.8})$$

$$E_{\max} = E_{\text{gem}} [\text{dB}] + K [\text{dB}]. \quad (\text{II.4.9})$$

Derzeit sind die Anlagen meist so eingestellt, dass der P-CPICH zehn Prozent der maximalen Leistung einer Station beansprucht, es ergibt sich also typisch ein Extrapolationsfaktor von $K = 10$ dB.

Eine (allerdings nahezu vernachlässigbare) Überbewertungsmöglichkeit besteht auch bei der codeselektiven Erfassung. Messungen in der Umgebung von typischen UMTS-Anlagen mit drei um 120° versetzt angeordneten Antennen führen meist zu drei sehr unterschiedlichen Feldstärkewerten für den CPICH. Meist dominiert am Messpunkt eines der drei Signale, was durch die Antenne, die mit ihrem horizontalen Öffnungswinkel den Messort überstreicht, erzeugt wird. Das Signal der Antenne, die nahezu in die entgegen gesetzte Richtung strahlt,

ist häufig im Vergleich dazu sehr schwach ausgeprägt, so dass es passieren kann, dass das codeselektive Messgerät es nicht mehr anzeigen kann (Codeselektive Messgeräte besitzen zwar eine sehr hohe absolute Empfindlichkeit, jedoch ist ihre relative Empfindlichkeit sehr stark eingeschränkt. In der Praxis muss damit gerechnet werden, dass Signale, die mehr als 20 dB schwächer sind als das dominierende Signal, vom Gerät nicht mehr angezeigt werden). Um auch derartige schwache Signale zu berücksichtigen, können sie in der Auswertung beispielsweise mit einem Messwert, der genau 20 dB unter dem gefundenen Maximalwert des Standortes liegt, berücksichtigt werden, was natürlich eventuell eine geringe, jedoch vernachlässigbare, Überbewertung darstellt.

Die Extrapolation auf höchste betriebliche Anlagenauslastung bei einer UMTS-Station kann also durch folgende Vorgehensweise beschrieben werden:

- Codeselektive Messung der einzelnen am Messort vorhandenen P-CPICH-Signale.
- Erfragen des prozentualen Anteils des P-CPICH an der Gesamtleistung der für die gemessenen Immissionen verantwortlichen Stationen bei den Betreibern.
- Berechnung der individuellen Korrekturfaktoren und Multiplikation der Messwerte mit diesen.
- Leistungsbezogene Summenbildung aller Teilsignale.
- Bewertung mit dem Grenzwert (nach 26. BImSchV: 61 V/m). Die Grenzwertbewertung kann vor oder nach der Summenbildung durchgeführt werden, da im Downlinkbereich von UMTS ein nicht frequenzabhängiger Grenzwert von 61 V/m anzuwenden ist.
- Will man nicht nur die maximale Immission bei aktuellem Ausbauzustand der Station ermitteln, sondern auch zukünftige Erweiterungen des Standortes mit berücksichtigen, sollte man prüfen, ob für die betreffenden Standorte von den Betreibern bei der BNetzA bereits der zweite Frequenzkanal beantragt, jedoch noch nicht in Betrieb genommen wurde. Unter der Annahme, dass der zweite Kanal mit gleicher Leistung über die gleiche Antenne abgestrahlt wird, kann auf die Immission bei maximalem Ausbauzustand der Station hochgerechnet werden, in dem man den Summenimmissionswert der ersten Trägerfrequenz um 3 dB erhöht.

Ein weiterer Sonderfall, der nur durch eine codeselektive Messung erkannt und geeignet berücksichtigt werden kann, ist die Tatsache, dass manche Betreiber aus Kostengründen eine Dreisektoranlage derzeit mit nur einer Basisstation über einen Powersplitter versorgen und erst nach Zunahme der Auslastung diesen Standort mit den anderen beiden Sendemodulen erweitern. Derartige Anlagen fallen bei einer frequenzselektiven Messung nicht auf, während sie bei codeselektiver Erfassung deutlich zu lokalisieren sind, da sie nur einen P-CPICH abgeben. Bei der Hochrechnung auf Maximalausbau kann dann für derartige Stationen berücksichtigt werden, dass aufgrund des Powersplitters nur ein Drittel der Signalleistung pro Antenne im Vergleich zum regulären Ausbau abgegeben wird. Dies muss dann durch einen Korrekturfaktor von mindestens 4,8 dB bei der Hochrechnung angemessen berücksichtigt werden. (Eventuell ist der Korrekturfaktor auch noch etwas höher, da die Powersplitter verlustbehaftet sind; nähere Auskünfte dazu können die Betreiber geben).

Fazit

Für Messungen, die den Zweck verfolgen, die Einhaltung der Grenzwerte nach 26. BImSchV nachzuweisen, ergeben sich also folgende Schlussfolgerungen:

- Aufgrund der großen Unsicherheiten bei der Extrapolation auf höchste betriebliche Anlagenauslastung sind breitbandige Verfahren für Messungen im Rahmen der Überprüfung der Einhaltung der Grenzwerte nach 26. BImSchV wenig geeignet.
- Auch eine frequenzselektive Messung bietet noch relativ große Unsicherheiten bei der Extrapolation auf höchste betriebliche Anlagenauslastung, insbesondere der Einfluss der Verkehrslast führt zu einer regelmäßigen Überbewertung der Exposition. Mit breitbandigen und frequenzselektiven Messungen ist aufgrund der vorhandenen Überbewertungen die Einhaltung der Grenzwerte sicher nachweisbar, jedoch nicht deren Überschreitung.
- Die zuverlässigsten Messergebnisse liefert eine codeselektive Erfassung der Exposition. Eine Hochrechnung auf maximale Anlagenauslastung ist auf einfache Weise mit relativ geringem Aufwand möglich. Vorhandener Datenverkehr beeinträchtigt die Extrapolation nicht. Aufgrund dieser Vorteile sollte die codeselektive Messung bevorzugt im Rahmen von Untersuchungen angewendet werden, bei denen die Immissionen bei höchster betrieblicher Anlagenauslastung zuverlässig ohne nennenswerte Überbewertung bestimmt werden sollen.

Für die Maximalwertsuche im Messvolumen hat sich die „Schwenkmethode“ als effizientes Verfahren herausgestellt.

II.4.13 Messverfahren zur Ermittlung von Durchschnittswerten

Nachdem die Ausführungen des letzten Abschnitts auf Messverfahren zur normativen Überprüfung der Grenzwerte konzentriert waren, sollen in diesem Abschnitt Messverfahren zur Ermittlung von örtlichen und zeitlichen Durchschnittswerten untersucht werden. Die Berechtigung für diese Betrachtungen erwächst z.B. aus Anforderungen für epidemiologische Studien, bei denen keine (auf die maximale Anlagenauslastung hochgerechneten) örtlichen und zeitlichen Spitzenwerte, sondern „reale“ Immissionswerte von Interesse sind. Darüber hinaus sind z.B. zeitliche Verläufe der Immission ein geeignetes Mittel, um die verkehrsabhängige Sendeleistungsregelung an UMTS-Sendestationen zu studieren.

Im folgenden sollen die verschiedenen denkbaren Varianten von zeitlichen und örtlichen Erfassungsmethoden für Mobilfunk-Immissionen vorgestellt und bewertet werden. Anschließend erfolgt eine Anwendung der als sinnvoll und realisierbar klassifizierten Methoden auf verschiedene Szenarien.

II.4.13.1 Generelle zeitliche und örtliche Erfassungsmethoden

Tabelle 4.34 gibt einen Überblick über die vielfältigen Kombinationsmöglichkeiten von zeitlichen und örtlichen Erfassungsmethoden.

	zeitlicher Augenblickswert	zeitlicher Verlauf	zeitlicher Mittelwert	zeitliches Maximum	zeitliches Maximum mit Hochrechnung
fixer Ort (Punkt)	nicht sinnvoll einfach zu realisieren	sinnvoll einfach zu realisieren	begrenzt sinnvoll einfach zu realisieren	begrenzt sinnvoll einfach zu realisieren	begrenzt sinnvoll einfach zu realisieren
Volumen, örtlicher Mittelwert	nicht sinnvoll nicht realisierbar	begrenzt sinnvoll nicht realisierbar	sinnvoll realisierbar	begrenzt sinnvoll nicht realisierbar	nur für Körpervolumen sinnvoll schwierig zu realisieren
Volumen, örtliches Maximum	begrenzt sinnvoll aufwändig realisierbar	begrenzt sinnvoll aufwändig realisierbar	begrenzt sinnvoll aufwändig realisierbar	begrenzt sinnvoll aufwändig realisierbar	sinnvoll einfach zu realisieren

Tabelle II.4.34: Grundsätzliche Möglichkeiten der zeitlichen und örtlichen Erfassung von UMTS-Mobilfunkimmissionen

Fixer Ort, zeitlicher Augenblickswert

Die Messung an einem beliebigen Punkt im Raum muss, wie die Ergebnisse der vorangegangenen Abschnitte bezüglich der kleinskaligen Feldstärkeschwankungen zeigen, als nicht aussagekräftig für die Immissionssituation in einem Volumen, wie z.B. einem Innenraum, klassifiziert werden. Mit der Messung an einem beliebigen Punkt kann weder eine Aussage über das Maximum (Grenzwertaspekt), noch über den Mittelwert im Raum getroffen werden. Gleiches gilt für den „zeitlichen Augenblickswert“, der keine Einschätzung über die vorhandene zeitliche Schwankungsbreite bzw. Minima oder Maxima aufgrund sich verändernder Verkehrssituation (Sendeleistungsregelung) oder sich zeitlich verändernder Ausbreitungsbedingungen ermöglicht. Diese Erfassungsmethode ist deswegen als nicht sinnvoll einzuschätzen.

Die technische Realisierbarkeit hingegen ist einfach: Eine isotrope Antenne (z.B. 3-Achsen-Kugelsonde) wird an einem Messpunkt aufgestellt und frequenzselektiv eine einmalige Messung durchgeführt. Alternativ können hier auch dipolartige Antennen verwendet werden, die manuell oder automatisch in drei orthogonale Richtungen positioniert werden. Hier ist allerdings die Zeitbasis für die drei Raumrichtungen nicht dieselbe. Dieser Fehler wird bei isotropen Messsonden minimiert, da das (sequenzielle) Umschalten der drei Achsen im Millisekunden-Bereich erfolgt. Eine Richtantenne hingegen ist hier nicht einsetzbar.

Fixer Ort, zeitlicher Verlauf

Für die begrenzte Sinnhaftigkeit der Messungen an einem beliebigen, festen Ort gilt prinzipiell das oben Gesagte. Diese Messungen können allerdings interessant sein, um Erkenntnisse über das generelle zeitliche Verhalten der Immission zu gewinnen. Hier können zeitliche Charakteristika detailliert untersucht werden, die aus der sendeanlagenseitigen Leistungsregelung sowie aus zeitlichen Änderungen in den Ausbreitungspfaden vom Sender zum Messpunkt resultieren. Für beides werden im nächsten Abschnitt Beispiele vorgestellt.

Die technische Realisierung erfolgt durch eine frequenzselektive Messung, wobei unbedingt eine isotrope Sonde mit automatischer Umschaltung der drei Messachsen verwendet werden muss. Eine geeignete Ansteuerungssoftware, wie z.B. RFEX der Firma Rohde & Schwarz, eröffnet die Möglichkeit, ein und dieselbe Messung beliebig oft hintereinander zu wiederholen und die Ergebnisse abzuspeichern, so dass hier ein zeitlicher Verlauf der Immission aufgezeichnet werden kann. Für die hier erforderliche oftmalige Wiederholung ein und derselben Messung erscheint die Verwendung von Dipolantennen mit manueller oder motorgesteuerter Umschaltung der Raumachsen nicht praktikabel.

Fixer Ort, zeitlicher Mittelwert

Diese Messung ist nur sehr eingeschränkt aussagekräftig und kann höchstens als „Zugabe“ bei der Auswertung der Erfassungsmethode „Fixer Ort, zeitlicher Verlauf“ angesehen werden. Die messtechnische Realisierung entspricht exakt derjenigen vorgenannter Methode: Die aufgezeichneten Werte der Langzeitmessung werden geeignet gemittelt, wobei hier eine leistungsmäßige Mittelung (d.h. quadratische Mittelung der Feldstärken) vorzunehmen ist.

Fixer Ort, zeitlicher Maximalwert

Diese Messung ist ebenfalls nur sehr eingeschränkt aussagekräftig und kann höchstens als „Zugabe“ bei der Auswertung der Erfassungsmethode „Fixer Ort, zeitlicher Verlauf“ angesehen werden. Die messtechnische Realisierung entspricht exakt derjenigen letztgenannter Methode: Aus den aufgezeichneten Werte der Langzeitmessung wird der Maximalwert extrahiert.

Fixer Ort, zeitlicher Maximalwert mit Hochrechnung auf den maximalen Betriebszustand

Diese Messung ist nur sehr eingeschränkt aussagekräftig, primär aufgrund der Nicht-Repräsentativität eines beliebigen Raumpunktes für die Immissionsverhältnisse in einem Messvolumen.

Die technische Realisierbarkeit erfolgt durch eine isotrope Kugelsonde, mit der jetzt allerdings eine codeselektive Messung durchgeführt wird. Aus dem codeselektiven Ergebnis kann auf den Zustand bei maximaler Anlagenauslastung geschlossen werden (siehe Abschnitt II.4.12).

Örtlicher Volumen-Mittelwert, zeitlicher Augenblickwert

Die Aussagekraft dieser Erfassungsmethode ist aufgrund des zeitlichen Augenblickswertes stark eingeschränkt, da sich aufgrund der Verkehrssituation oder ändernder Ausbreitungsverhältnisse der Messwert von Augenblick zu Augenblick verändern kann.

Die technische Realisierbarkeit ist praktisch nicht gegeben: Hierfür müsste ein Punktraster aus isotropen Sonden aufgebaut werden, das das Messvolumen repräsentativ abdeckt. Zum gleichen Zeitpunkt ist für alle Sonden simultan spektral ein Messwert zu nehmen und dieser über alle Sonden zu mitteln. Dies ist nicht praktikabel.

Örtlicher Volumen-Mittelwert, zeitlicher Verlauf

Diese Erfassungsmethode kann prinzipiell interessante Ergebnisse liefern, da im Gegensatz zu einer Einpunkt-Messung hier der zeitliche Verlauf an den einzelnen Messpunkten im Raum durch veränderte Ausbreitungsbedingungen unterschiedlich sein kann. Allerdings liefert diese Methode keinen für die Epidemiologie brauchbaren Wert, sondern ist lediglich aus Sicht des Verständnisses des zeitlichen und örtlichen Immissionsverhaltens sinnvoll.

Die Erfassungsmethode ist nicht praktikabel. Ähnlich wie bei der vorigen Methode müsste ein Netz aus isotropen Sonden aufgebaut werden, das das Messvolumen repräsentativ abdeckt. Mit allen Sonden wird eine spektrale Langzeitmessung durchgeführt.

Örtlicher Volumen-Mittelwert, zeitlicher Mittelwert

Diese Erfassungsmethode ist sinnvoll, da sie einen für die Epidemiologie aussagekräftigen Beurteilungswert für die „mittlere“ Immission z.B. in einem Zimmer liefern kann.

Eine technische Realisierbarkeit ist wie folgt möglich: Mit einer isotropen Sonde wird handgeführt in möglichst gleichförmiger Bewegung das zu untersuchende Raumvolumen langsam abgetastet. Die Bewegung muss dabei so langsam erfolgen, dass während der Abtastung eines begrenzten Volumenbereiches eine zeitliche Mittelung erfolgen kann. Während dessen wird eine frequenzselektive Langzeitmessung durchgeführt (Messwerte mindestens im Sekundentakt), und die Messergebnisse werden anschließend leistungsbezogen gemittelt. Prinzipiell kann das „Abfahren“ des Volumens auch durch eine Punkrastermessung ersetzt werden, die dann aber wesentlich mehr Zeit beansprucht. Hier ist vor allem der Aspekt einer repräsentativen Anzahl von Punkten wichtig: Das Ergebnis einer solchen Messung wird erst dann tatsächlichen Mittelwertcharakter aufweisen, wenn nicht nur einige wenige, sondern einige 10 Messpunkte in die Volumenmittelung einbezogen werden.

Diese Methode hat zwei Schwachpunkte:

Zum einen erfolgt die zeitliche Mittelung für jedes „Teilvolumen“ nicht im selben Zeitintervall, sondern sequenziell. Dies wäre nur durch „gleichzeitige“ Langzeitmessungen an allen Rasterpunkten im Volumen zu umgehen; ist jedoch, wie oben angesprochen, nicht praktikabel.

Zum anderen kann diese Methode aufgrund des manuellen „Abschreitens“ des Volumens nur einen zeitlichen Mittelwert über einen Zeitraum von etwa einer oder weniger Minuten liefern. Unter Umständen kann aber hierbei begleitend eine zeitliche Verlaufsmessung an einem festen Punkt eingesetzt werden, sofern Mittelungen über mehrstündige Zeitintervalle von Interesse sind.

Örtlicher Volumen-Mittelwert, zeitliches Maximum

Die Sinnhaftigkeit dieser Erfassungsmethode ist begrenzt, da hier ein örtlicher Mittelwert mit einem zeitlichen Maximum verknüpft wird, so dass weder normative Grenzwertaussagen, noch echte Mittelwerte abgeleitet werden können.

Die Erfassungsmethode ist nicht praktikabel. Ähnlich wie bei den vorangegangenen Methoden müsste ein Netz aus isotropen Sonden aufgebaut werden, das das Messvolumen repräsentativ abdeckt. Mit allen Sonden wird eine spektrale Langzeitmessung durchgeführt und deren Maximalwerte werden in die Auswertung einbezogen.

Örtlicher Volumen-Mittelwert, zeitlicher Maximalwert mit Hochrechnung auf den maximalen Betriebszustand

Wird hier ein Raumvolumen z.B. von der Größe eines Zimmers betrachtet, gilt für diese Methode das oben Gesagte.

Interessant ist diese Methode allerdings in Bezug auf eine Interpretation des Mittelungsvolumens als das Volumen eines Menschen: Hiermit kann eine normative Grenzwertüberprüfung

erfolgen, da z.B. nach [ICNIRP 98] die (abgeleiteten) Grenzwerte als über den menschlichen Körper räumlich gemittelte Werte definiert werden.

Eine messtechnische Realisierung erweist sich jedoch als schwierig: Prinzipiell muss hier die codeselektive Messmethode angewendet werden, wobei entweder durch ein festes Punkteraster oder das kontinuierliche manuelle „Abfahren“ ein den menschlichen Körper repräsentierendes Volumen untersucht wird. Die Schwierigkeit liegt darin begründet, dass in bisherigen Untersuchungen keine vereinfachte allgemeingültige „Mittelungsgeometrie“ gefunden werden konnte (Abschnitt II.4.4.1 sowie [BOR 05]). Vielmehr waren die Mittelwerte von der verwendeten Mittelungsgeometrie abhängig, wobei sich für unterschiedliche Immissionsszenarien (z.B. Sichtverhältnisse zur Basisstation) jeweils andere Mittelungsgeometrien als optimal erwiesen. Diese Schwierigkeiten haben in Verbindung mit einer mangelnden Praktikabilität dieses Verfahrens beim Vor-Ort-Einsatz bislang eine Anwendung dieser Erfassungsmethode behindert.

Örtliches Maximum, zeitlicher Augenblickswert

Die Aussagekraft dieser Erfassungsmethode ist aufgrund des zeitlichen Augenblickswertes stark eingeschränkt, da sich aufgrund der Verkehrssituation oder ändernder Ausbreitungsverhältnisse der Messwert von Augenblick zu Augenblick verändern kann.

Die technische Realisierbarkeit könnte wie folgt geschehen: Mit einem codeselektiven Verfahren (zur „Ausblendung“ der zeitlichen Schwankungen durch Verkehrslast) muss mit einer geeigneten Methode, z.B. Schwenkverfahren oder Punktrastermethode (jeweils mit isotroper Antenne) das örtliche Maximum gesucht werden. An diesem erfolgt dann spektral eine isotrope Augenblickswertmessung.

Örtliches Maximum, zeitlicher Verlauf

Hiermit werden im Vergleich zur Methode „Fixer Ort, zeitlicher Verlauf“ im wesentlichen keine neuen Informationen gewonnen.

Diese Methode ist allerdings etwas aufwändiger zu realisieren, da wie beim zeitlichen Augenblickswert zuerst codeselektiv der Ort des Maximums gefunden werden muss. An diesem kann dann eine frequenzselektive Langzeitmessung durchgeführt werden.

Örtliches Maximum, zeitlicher Mittelwert

Diese Methode entspricht der Variante „Fixer Ort, zeitlicher Mittelwert“, wobei hier zuerst codeselektiv der Ort des Maximalwertes im Volumen gefunden werden muss.

Örtliches Maximum, zeitlicher Maximalwert

Diese Methode entspricht der Variante „Fixer Ort, zeitlicher Maximalwert“, wobei hier zuerst codeselektiv der Ort des Maximalwertes im Volumen gefunden werden muss.

Örtliche Maximum, zeitlicher Maximalwert mit Hochrechnung auf den maximalen Betriebszustand

Diese Methode entspricht der im Abschnitt II.4.12 abgeleiteten Messmethode zur normativen Überprüfung der Grenzwerte: Mit einer Antenne (hier sollte im Gegensatz zu den vorangegangenen Methoden keine isotrope Antenne, sondern eine Richtantenne eingesetzt werden) wird ein Messvolumen abgetastet und codeselektiv vermessen. Durch eine „Max-Hold“-Auswertung wird der Maximalwert im Messvolumen ermittelt und auf den Zustand bei maximaler Anlagenauslastung extrapoliert.

Abschließend sei noch auf folgenden Aspekt bezüglich einer zeitlichen Mittelwertbildung hingewiesen: Moderne Spektrumanalysatoren verfügen über eine Möglichkeit, über mehrere Messungen zu mitteln („Trace Average“). Hierbei ist jedoch zu beachten, dass diese Einstellungen nur Auswirkungen auf die am Bildschirm dargestellte Messkurve haben, um diese z.B. zu glätten. Eine Verwendung dieser Funktion für eine zeitliche Mittelung im Rahmen dieser Untersuchungen kann zu völlig anderen Ergebnissen führen als erhofft: Ist die Bildschirmanzeige beispielsweise, wie allgemein üblich, im logarithmischen Maßstab dargestellt, erfolgt die Mittelung auf Basis der logarithmierten Messwerte. Das führt dazu, dass bei zeitlich schwankenden Signalen ein „Trace-Averaging“ die tatsächlichen Mittelwerte unterschätzen würde. Die Unterschätzung fällt dann umso größer aus, je größer der Pegelunterschied zwischen den durch zwei aufeinander folgende Traces erfassten Signalen ist. Deswegen wird hier ausdrücklich empfohlen, die Mittelung nicht mittels automatischer Gerätefunktionen durchzuführen, sondern die Messwerte mit geeigneter Software aus dem Analyser auszulesen und mit einem Tabellenkalkulationsprogramm eine Mittelung der Messwerte vorzunehmen. Hierbei ist darauf zu achten, die Mittelung leistungsbezogen durchzuführen: Werden z.B. Feldstärkewerte ausgegeben, sind diese (in linearer Darstellung) quadratisch zu mitteln.

Im nächsten Abschnitt soll die Anwendung der als sinnvoll und realisierbar gekennzeichneten Erfassungsmöglichkeiten an realen Szenarien demonstriert werden.

4.13.2 Anwendung der Erfassungsmethoden auf reale Szenarien

Als Anwendungsbeispiele werden auf die schon im Abschnitt II.4.8 verwendeten Szenarien

- indoor, mit Sicht zur die Immission maßgeblich bestimmenden UMTS-Sendeanlage
- indoor, ohne Sicht zum Sender
- outdoor, mit Sicht zum Sender, und
- outdoor, ohne Sicht zum Sender

ausgewählt. Zusätzlich werden hier auch künstliche Verkehrslastsituationen erzeugt, um deren Auswirkungen auf den zeitlichen Verlauf der Immission untersuchen zu können.

In jedem Szenario wurden dabei folgende Messungen durchgeführt:

- Örtliches Maximum, zeitlicher Maximalwert mit Hochrechnung auf den maximalen Betriebszustand (Überprüfung der Grenzwerte): Codeselektive Messung mit Schwenkmethode und anschließender Hochrechnung auf die maximale Anlagenauslastung (hierbei wurde von einer Maximalbelegung von zwei Kanälen ausgegangen). Die Messungen erfolgten mit der isotropen Kugelsonde, um eine Vergleichbarkeit zu den folgenden Durchschnittswert-Messungen sicherzustellen. Diese Messung dient als Referenz.
- Fixer Ort, zeitlicher Verlauf: An einem beliebigen Punkt wurde mit der isotropen 3-Achsen-Sonde eine spektrale Langzeitmessung durchgeführt.
- Örtlicher Volumen-Mittelwert, zeitlicher Mittelwert: In einem Volumen von ca. 5 m x 5 m x 1 m (L x B x H) wurde eine frequenzselektive Langzeitmessung mit der isotropen 3-Achsen-Sonde durchgeführt, bei der die Sonde langsam durch das Volumen geführt wurde. Die entstehenden Messwerte wurden leistungsbezogen gemittelt; weiterhin wurden auch die im Volumen auftretenden Maximal- und Minimalwerte extrahiert. Bei den Indoor-Messungen wurde das Messvolumen an die vorliegende örtliche Situation angepasst, wobei immer ein Mindestabstand der Messantenne von 50 cm zu Wänden und Mobiliar gewährleistet wurde.

Indoor mit Sicht

Das Szenario „Indoor mit Sicht“ ist in Abschnitt II.4.8 beschrieben und in Bild II.4.33 dokumentiert. In Tabelle II.4.35 sind die Ergebnisse der Messungen aufgelistet. Als Referenz dient die Messung zur Überprüfung der Grenzwerte. In der rechten Spalte „Differenz“ ist der Unterschied der Messwerte zum auf maximale Anlagenauslastung hochgerechneten Referenzwert aufgelistet. Hierdurch kann beurteilt werden, in wieweit „reale“ Immissionen und „maximale“ Immissionen differieren.

Szenario: Indoor mit Sicht		Referenzwert: 108,0 dB μ V/m
Zeitlicher Verlauf an einem festen Punkt		Differenz zum Referenzwert
Maximalwert	89,2 dB μ V/m	18,8 dB
Minimalwert	87,7 dB μ V/m	20,3 dB
Durchschnittswert	88,4 dB μ V/m	19,6 dB
Spanne	1,5 dB	
Örtlicher Volumen-Mittelwert, zeitlicher Mittelwert		Differenz zum Referenzwert
Maximalwert	94,1 dB μ V/m	13,9 dB
Minimalwert	84,5 dB μ V/m	23,5 dB
Durchschnittswert	90,2 dB μ V/m	17,8 dB
Spanne	9,6 dB	

Tabelle II.4.35: Vergleich zwischen Durchschnittswerten und dem normativen Maximalwert, Szenario Indoor mit Sicht

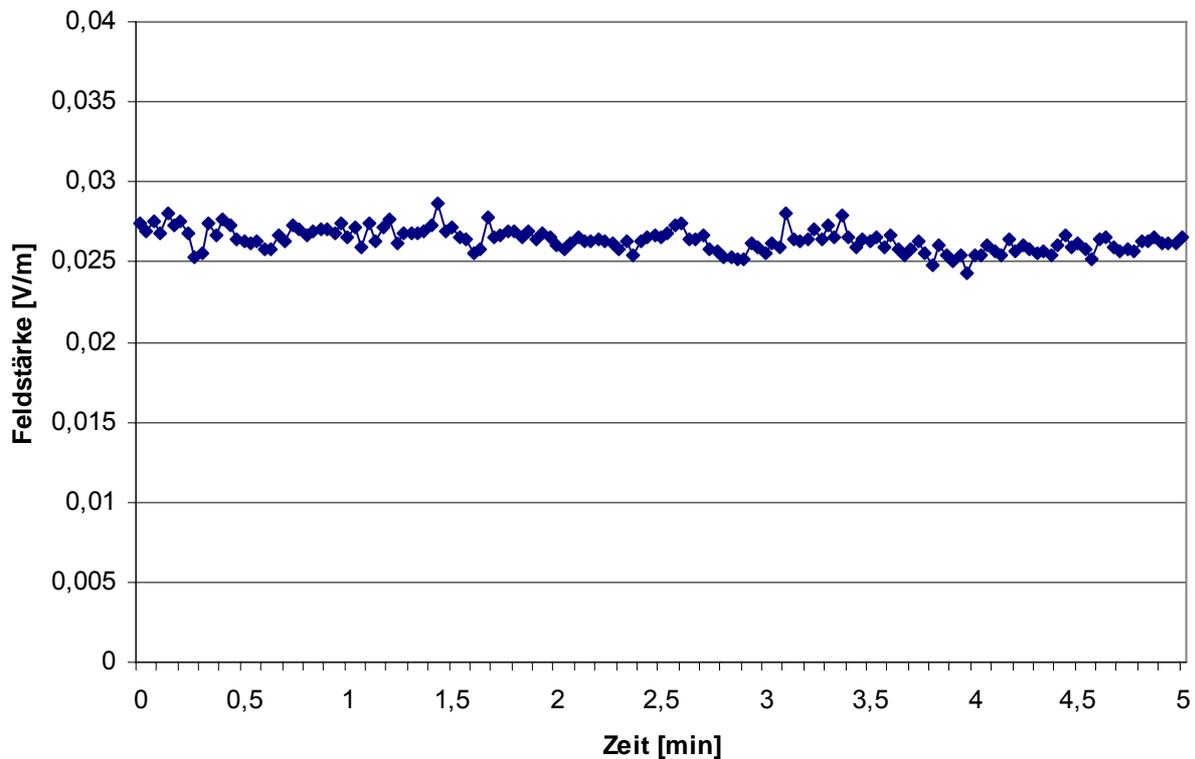


Bild II.4.36: Zeitlicher Verlauf an einem festen Punkt, Szenario Indoor mit Sicht

Bild II.4.36 zeigt den zeitlichen Immissionsverlauf an einem beliebigen Punkt innerhalb des für die örtliche Mittelwertbildung abgetasteten Volumens über einer Zeitspanne von etwa 5

Minuten. Wie ersichtlich ist, sind die Immissionen zeitlich nahezu konstant; die Spannbreite zwischen Maximal- und Minimalwert beträgt 1,5 dB. Offensichtlich lief die Anlage trotz der Tatsache, dass sie sich in städtischem Gebiet befindet, ohne nennenswerten Verkehr.

Aus Tabelle II.4.35 lassen sich interessante Schlüsse bezüglich der Unterschiede zwischen den Ergebnissen von Immissionsmessungen unter zeitlichen und örtlichen Maximierungsansätzen einerseits und Durchschnittswerten zur Abbildung einer „realen“ Immission ableiten: Im hier dargestellten Fall beträgt der Unterschied bezüglich des örtlichen und zeitlichen Mittelwertes etwa 18 dB, was einem leistungsbezogenen Faktor von 60 entspricht. Hierbei ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Anlage ohne nennenswerten Verkehr arbeitete: Bei aktivem Verkehr führt die anlagenseitige Sendeleistungsregelung dazu, dass die Differenz zwischen zeitlich und örtlich gemitteltem Wert (reale Immission) und der grenzwertrelevanten Maximalimmission geringer ausfällt.

Indoor, ohne Sicht

In Tabelle II.4.36 sind die Ergebnisse der Messungen für das Szenario „Indoor ohne Sicht“ dokumentiert.

Szenario: Indoor ohne Sicht		Referenzwert: 111,1 dB μ V/m
Zeitlicher Verlauf an einem festen Punkt		Differenz zum Referenzwert
Maximalwert	100,4 dB μ V/m	10,7 dB
Minimalwert	91,7 dB μ V/m	19,4 dB
Durchschnittswert	94,1 dB μ V/m	17,0 dB
Spanne	8,7 dB	
Örtlicher Volumen-Mittelwert, zeitlicher Mittelwert		Differenz zum Referenzwert
Maximalwert	99,9 dB μ V/m	11,2 dB
Minimalwert	83,3 dB μ V/m	27,8 dB
Durchschnittswert	95,0 dB μ V/m	16,1 dB
Spanne	16,6 dB	

Tabelle II.4.36: Vergleich zwischen Durchschnittswerten und dem normativen Maximalwert, Szenario Indoor ohne Sicht

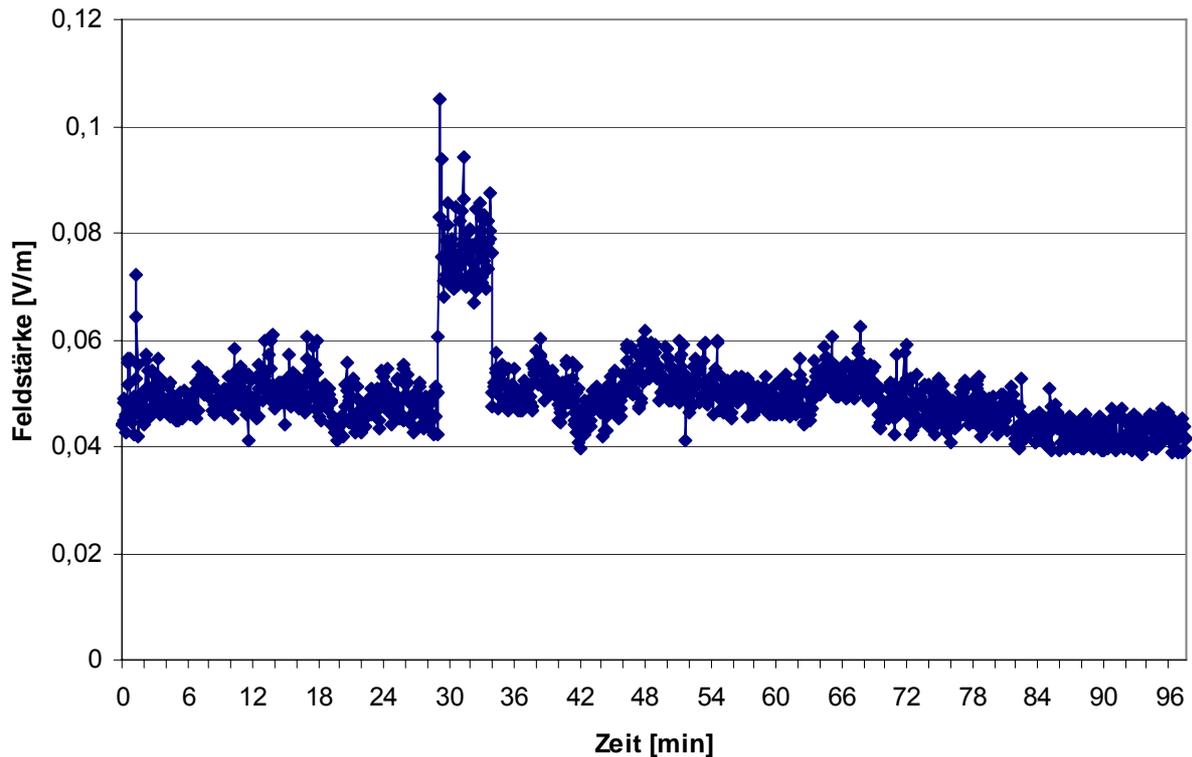


Bild II.4.37: Zeitlicher Verlauf an einem festen Punkt, Szenario Indoor ohne Sicht

Bild II.4.37 zeigt den zeitlichen Immissionsverlauf an einem beliebigen Punkt innerhalb des für die örtliche Mittelwertbildung abgetasteten Volumens innerhalb einer Zeitspanne von 1,5 Stunden. Auffällig ist der Immissionsanstieg nach etwa 30 Minuten. Die Erklärung ist überraschend: Wie schon in Abschnitt II.4.8 beschrieben, handelt es sich bei diesen Messungen um ein Bürozimmer der IMST GmbH. Nach ca. 30 Minuten kam ein Mitarbeiter in das Büro und hielt sich für ca. 5 Minuten relativ ortsfest in ca. 1 m Abstand zur isotropen Sonde auf. Allein diese Annäherung führt zu einem Immissionssprung um ca. 4 dB nach oben, ein Umstand, auf den u.a. in den Abschnitten II.4.4.1 und II.4.6 schon detailliert eingegangen wurde. Ein Zurückführen dieses Immissionssprunges auf eventuell vorhandenen Verkehr kann mit großer Sicherheit ausgeschlossen werden, da das Ereignis zeitlich genau mit dem Aufenthalt des Mitarbeiters nahe der Sonde korrespondierte. Während der letzten 12 Minuten war keine Person im Zimmer; hier ist der Immissionsverlauf „glatt“ mit einer Schwankungsbreite von ca. 1,7 dB. Diese korrespondiert recht gut mit dem Wert von 1,5 dB, der als maximale zeitliche Schwankung beim Szenario „Indoor mit Sicht“ ermittelt wurde. In den restlichen Zeitintervallen waren Personen im Zimmer anwesend.

Insgesamt lässt sich in vorliegendem Szenario eine größere Spannbreite der Immission beim Durchführen der örtlichen und zeitlichen Mittelung feststellen (16,6 dB im Vergleich zu 9,6 dB im vorangegangenen Szenario). Der „reale“, d.h. örtlich und zeitlich gemittelte Wert liegt etwa 16 dB unter dem für die Grenzwertüberprüfung relevanten Referenzwert. Dies entspricht leistungsmäßig einem Faktor von 40. Auch hier ist jedoch die Tatsache zu beachten, dass offensichtlich die UMTS-Station ohne nennenswerten Verkehr lief.

Outdoor, mit Sicht

Das Szenario „Outdoor mit Sicht“ ist in Abschnitt II.4.8 beschrieben und in Bild II.4.34 dokumentiert. In Tabelle II.4.37 sind die Ergebnisse der Messungen für das Szenario „Outdoor mit Sicht“ aufgelistet.

Szenario: Outdoor mit Sicht		Referenzwert: 103,5 dB μ V/m
Zeitlicher Verlauf an einem festen Punkt		Differenz zum Referenzwert
Maximalwert	90,7 dB μ V/m	12,8 dB
Minimalwert	87,3 dB μ V/m	16,2 dB
Durchschnittswert	88,3 dB μ V/m	15,2 dB
Spanne	3,4 dB	
Örtlicher Volumen-Mittelwert, zeitlicher Mittelwert		Differenz zum Referenzwert
Maximalwert	91,8 dB μ V/m	11,7 dB
Minimalwert	86,8 dB μ V/m	16,7 dB
Durchschnittswert	89,1 dB μ V/m	14,4 dB
Spanne	5,0 dB	

Tabelle II.4.37: Vergleich zwischen Durchschnittswerten und dem normativen Maximalwert, Szenario Outdoor mit Sicht

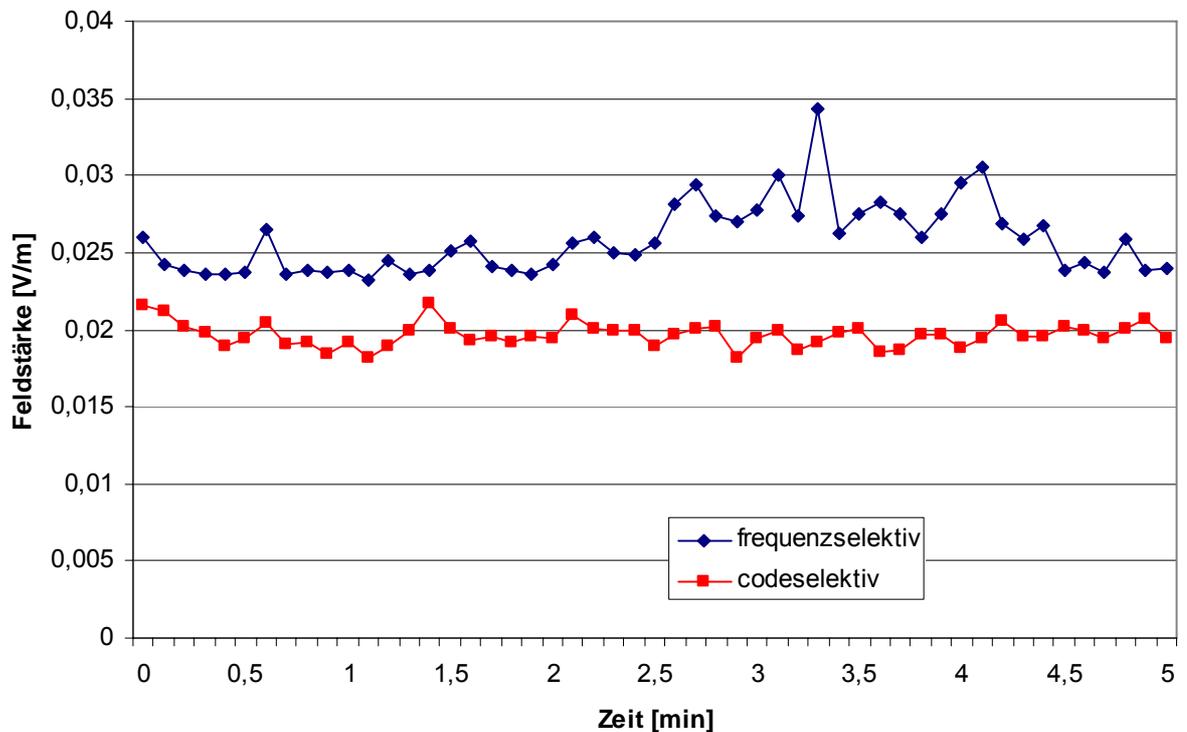


Bild II.4.38: Zeitlicher Verlauf an einem festen Punkt, Szenario Outdoor mit Sicht

Bild II.4.38 zeigt den zeitlichen Immissionsverlauf an einem beliebigen Punkt innerhalb des für die örtliche Mittelwertbildung abgetasteten Volumens innerhalb einer Zeitspanne von etwa 5 Minuten. Neben einer frequenzselektiven Messung ist hier auch eine codeselektive Messung durchgeführt worden. Obwohl nacheinander durchgeführt, sind beide Verläufe in ein gemeinsames Diagramm eingetragen.

Bei der Anlage handelt es sich um eine UMTS-Station in ländlicher Umgebung. Hier war, wie schon in den beiden vorangegangenen Beispielen, mit wenig oder gar keinem Verkehr seitens der Station zu rechnen. Deswegen wurde hier ein Verkehrsaufkommen künstlich initiiert: Am Messort wurde eine UMTS-Datenkarte in einem Notebook in Betrieb genommen (zum Betreiber der Basisstation passende Datenkarte). Die Datenkarte erlaubt eine maximale Datenrate im Download von 384 kBit/s. Real wurden während des Downloads Datenraten bis 40 kByte/s erreicht. Der Download wurde nach etwa 1,5 Minuten gestartet. Es ist im frequenzselektiven Verlauf deutlich zu erkennen, dass hierdurch sowohl die Schwankungsbreite der Immission, als auch der Maximalwert deutlich steigt. Vor Beginn des Downloads liegt die Schwankungsbreite bei etwa 1,1 dB und damit im typischen Bereich „ohne Verkehr“; nach Aktivierung des Downloads steigt sie auf etwa 3,4 dB an.

In einem zweiten Durchlauf wurde eine codeselektive Langzeitmessung durchgeführt. Hier erfolgte während der ersten drei Minuten ein Download, danach wurde die Verbindung zur Basisstation aufgehoben. Es ist zu erkennen, dass sich das wechselnde Verkehrsaufkommen nicht in einer relevanten Veränderung des codeselektiven Messpegels widerspiegelt. Die maximale Schwankungsbreite bei der codeselektiven Messung liegt bei 1,6 dB. Diese Messung sollte zur Verifizierung des codeselektiven Messequipments dienen, da das codeselektive Messergebnis vom Verkehrsaufkommen unabhängig sein muss. Die trotzdem noch vorhandenen Schwankungen lassen sich z.B. durch zeitliche Änderungen im Ausbreitungsweg (während der Messung fahren LKW vorbei) erklären.

Aus einem Vergleich zwischen dem zeitlichen Mittelwert der frequenzselektiven Messung vor dem Start des Downloads und dem Mittelwert der codeselektiven Messung kann in etwa der prozentuale Anteil der Gesamtsignalisierung bei UMTS abgeschätzt werden: Für die vorliegende Station beträgt dieser etwa 15 % (Annahme: der CPICH schöpft etwa 10 % der Gesamtleistung aus). Dieser Zahlenwert stimmt recht gut mit den Angaben aus Tabelle II.4.33 überein, die hierfür Werte zwischen 13,8 und 16,9 % ergeben.

Insgesamt lässt sich in vorliegendem Szenario eine wesentlich geringere Spannbreite der Immission von 5,0 dB beim Durchführen der örtlichen und zeitlichen Mittelung im Vergleich zu den Indoor-Szenarien feststellen. Dies lässt auf eine „homogenere“ Feldverteilung im Outdoor-Szenario schließen, wo fast und slow fading-Effekte nicht so stark ausgeprägt sind wie im Indoor-Szenario. Der „reale“, d.h. örtlich und zeitlich gemittelte Wert liegt hier etwa 14 dB unter dem für die Grenzwertüberprüfung relevanten Referenzwert. Dies entspricht leistungsmäßig einem Faktor von 27. Auch hier ist jedoch die Tatsache zu beachten, dass während der zeitlichen und örtlichen Volumenabtastung durch die Datenkarte kein Verkehr forciert wurde.

Outdoor, ohne Sicht

In Tabelle II.4.38 sind die Ergebnisse der Messungen für das Szenario „Outdoor ohne Sicht“ dokumentiert.

Szenario: Outdoor ohne Sicht (nur Betreiber A)		Referenzwert: 101,9 dB μ V/m
Zeitlicher Verlauf an einem festen Punkt		Differenz zum Referenzwert
Maximalwert	84,5 dB μ V/m	17,4 dB
Minimalwert	82,4 dB μ V/m	19,5 dB
Durchschnittswert	83,4 dB μ V/m	18,5 dB
Spanne	2,1 dB	
Örtlicher Volumen-Mittelwert, zeitlicher Mittelwert		Differenz zum Referenzwert
Maximalwert	89,9 dB μ V/m	12,0 dB
Minimalwert	83,1 dB μ V/m	18,8 dB
Durchschnittswert	86,5 dB μ V/m	15,4 dB
Spanne	6,8 dB	

Tabelle II.4.38: Vergleich zwischen Durchschnittswerten und dem normativen Maximalwert, Szenario Outdoor ohne Sicht

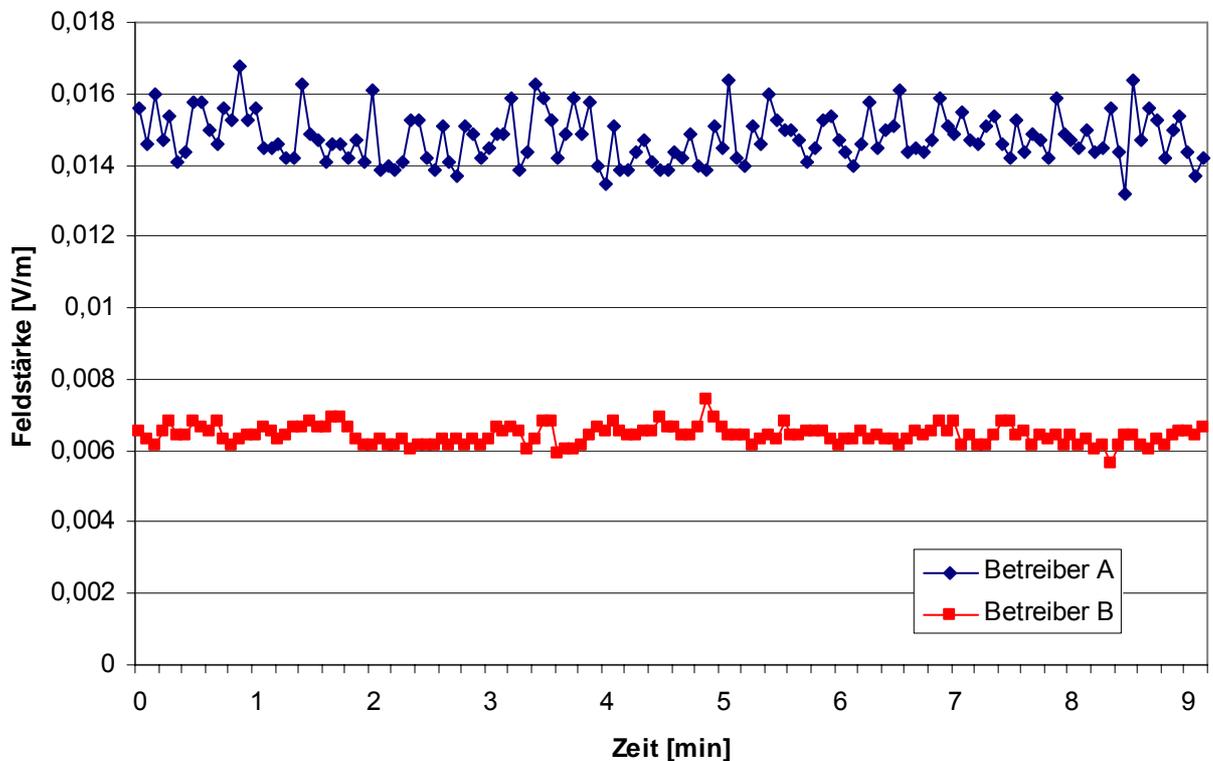


Bild II.4.39: Zeitlicher Verlauf an einem festen Punkt, Szenario Outdoor ohne Sicht

Bild II.4.39 zeigt den zeitlichen Immissionsverlauf an einem beliebigen Punkt innerhalb des für die örtliche Mittelwertbildung abgetasteten Volumens innerhalb einer Zeitspanne von etwa 10 Minuten. Als Besonderheit sind hier die Immissionsbeiträge zweier Betreiber dargestellt, die simultan frequenzselektiv gemessen wurden. In die Auswertung nach obiger Tabelle fließen jedoch nur die Angaben zu Betreiber A ein.

Auch hier scheinen beide Anlagen mit keinem oder nur geringem Verkehr zu laufen. Die maximale Spannbreite liegt für Betreiber A bei etwa 2,1 dB. Dies ist zwar höher als bei den ersten beiden Szenarien; hier könnten jedoch auch zeitliche Schwankungen seitens des Ausbreitungsweges (durch Wind bewegte Bäume etc.) eine zusätzliche Variabilität einbringen.

Die Spannbreite der Immission beim Durchführen der örtlichen und zeitlichen Mittelung liegt bei 6,8 dB und damit nur unwesentlich höher als im Szenario „Outdoor mit Sicht“. Offensichtlich ist auch hier das Feld homogener als bei den Indoor-Szenarien. Der „reale“, d.h. örtlich und zeitlich gemittelte Wert liegt etwa 15 dB unter dem für die Grenzwertüberprüfung relevanten Referenzwert. Dies entspricht leistungsmäßig einem Faktor von 35. Auch hier ist jedoch die Tatsache zu beachten, dass offensichtlich die UMTS-Station ohne nennenswerten Verkehr lief.

Bei den hier durchgeführten Messungen wurde die Feststellung gemacht, dass die Ergebnisse identischer Messungen (z.B. codeselektiv, Schwenkmethode, gleiches Volumen) bei Verwendung der isotropen 3-Achsen-Sonde generell größer waren als mit der logarithmisch-periodischen Antenne. Der Unterschied lag typisch zwischen 1 und 4 dB. Neben der schon untersuchten Beeinflussung des Messenden wird hier auch ein Problem mit der Isotropie der 3-Achsen-Sonde vermutet, da die Unterschiede von der „Lage“ der Kugelsonde im Raum abhingen. Dies konnte bei cursorischen Überprüfungen in der EMV-Absorberkammer bestätigt werden. Die Isotropie von Sonden mit einem Haltegriff ist generell ein Problem, was z.B. auch bei breitbandigen isotropen Messgeräten zu beobachten ist. Hierzu wurde Kontakt zum Hersteller der 3-Achsen-Sonde aufgenommen.

Fazit:

Bezüglich einer zeitlichen und räumlichen Momentan-, Mittelwert- oder Maximalwerterfassung von UMTS-Immissionen existieren verschiedene Kombinationsmöglichkeiten. Wohingegen einige dieser Kombinationen nicht sinnvoll oder technisch nicht zu realisieren sind, werden folgende Kombinationen als sinnvoll und praktikabel für Vorort-Messungen erachtet:

- Die Ermittlung des zeitlichen und örtlichen Maximalwertes in einem Volumen mit Extrapolation auf die maximale Anlagenauslastung: Dieser Erfassungswert ist für einen normativen Vergleich mit den geltenden Grenzwerten relevant.

- Die Ermittlung von zeitlichen und örtlichen Mittelwerten in einem Volumen z.B. von der Größe eines Zimmers: Hierdurch werden in Vergleich zum Grenzwertaspekt eher „reale“ Immissionswerte erfasst.
- Die Ermittlung des zeitlichen Verlaufs der Immission an einem ortsfesten Punkt zum detaillierten Studium von Leistungsregelungsmechanismen und zeitlichen Änderungen des Ausbreitungsweges.

Die Praktikabilität dieser drei Erfassungsmethoden wurde an vier unterschiedlichen Szenarien nachgewiesen. Dabei wurden leistungsbezogene Unterschiedsfaktoren zwischen „realen“ raum- und zeitgemittelten Werten und dem auf maximale Anlagenauslastung hochgerechneten Wert zwischen etwa 25 und 60 festgestellt. Da derzeit die Verkehrsauslastung der untersuchten Stationen sehr gering war, ist im zukünftigen Regelbetrieb der UMTS-Anlagen mit etwas geringeren Unterschieden zu rechnen. Die größten Differenzen zwischen örtlichen Maximal- und Minimalwerten ergaben sich erwartungsgemäß bei Indoor-Szenarien. Durch eine Initiierung von Datenverkehr konnten Informationen über das zeitliche auslastungsabhängige Sendeleistungsverhalten einer UMTS-Station gewonnen werden.

II.4.14 Zukünftige Entwicklungen

II.4.14.1 Einsatz der TDD-Version von UMTS

Die TDD-Variante von UMTS (TDD = time division duplex) verwendet zur Trennung des Up- und Downlinkkanals nicht unterschiedliche Trägerfrequenzen, sondern die beiden Kommunikationsrichtungen werden auf der gleichen Frequenz, jedoch in unterschiedlichen Zeitschlitzen realisiert. Zu diesem Zweck wird das Signal in Rahmen („frames“) zu je 10 Millisekunden Dauer zerlegt. Ein Rahmen besteht wiederum aus 15 Zeitschlitzen („timeslots“) mit je 66,7 Mikrosekunden Dauer. Wie viele Zeitschlitze für Up- bzw. Downlink zur Verfügung gestellt werden, hängt von der jeweils zu übertragenden Datenrate ab. Minimal muss einer der 15 Zeitschlitze für den Uplink reserviert werden, während der Downlink mindestens 2 Zeitschlitze benötigt. Alle Verteilungen der Zeitschlitze zwischen diesen Extremwerten sind zulässig. In der Praxis wird jedoch vermutlich häufiger eine hohe Datenrate im Downlink abgefragt werden, so dass das Signal der Basisstation meist die überwiegende Zahl der Zeitschlitze für sich beanspruchen wird.

Führt man also eine frequenzselektive Messung an einer TDD-Basisstation durch, so ergibt sich eine zeitliche Schwankung der Exposition ähnlich wie bei einem GSM-Traffic-Channel. Auch eine Leistungsregelung der Signale ist im TDD-Mode vorgesehen. Die sinnvollste Methode der Erfassung bietet vermutlich die Messung der Spitzenleistung des stärksten Zeitschlitzes („zero span“) und eine nachfolgende Extrapolation auf den ungünstigen Lastfall (14 der 15 Zeitschlitze mit Downlinksignalen belegt). Dadurch ergibt sich natürlich wiederum eine Überbewertung der Exposition, was unter „worst-case“-Gesichtspunkten jedoch durchaus toleriert werden kann.

Spezielle codeselektive Messverfahren für den TDD-Mode sind derzeit nicht bekannt. Eine Nachfrage bei Rohde & Schwarz, dem weltweit führenden Hersteller von Versorgungsmess-

systemen für UMTS-Netze, ergab, dass derzeit im Bereich TDD noch nicht einmal Lösungen zur Versorgungsmesstechnik vorliegen. Diese wären jedoch die Basis für mögliche codeselektive Messungen in den EMF-Messsystemen.

Vermutlich vereinfacht sich jedoch die Problematik der Messung von TDD-Signalen, da TDD-Systeme allein nicht „lebensfähig“ sind, weil sie keine Synchronisations- bzw. Pilotkanäle zur Synchronisation der Endgeräte bzw. zur Durchführung eines Handovers besitzen. Eine TDD-Übertragung macht also nur dann Sinn, wenn das TDD-System zusammen mit einer FDD-Anlage arbeitet, so dass die Synchronisationsaufgaben vom FDD-System übernommen werden können. Die TDD-Signale werden dann zweckmäßigerweise über die gleiche Antenne abgestrahlt wie die FDD-Signale. In derartigen Fällen ist die Immissionserfassung dann natürlich relativ einfach: Durch codeselektive Messung wird wieder der P-CPICH des FDD-Signals gemessen. Die Extrapolation auf höchste betriebliche Anlagenauslastung berücksichtigt dann nicht nur die maximale Leistung des FDD-Systems, sondern auch noch die maximale Leistung (bei maximaler Anzahl an Downlinkzeitschlitzten) der TDD-Anlage.

Hauptgrund für die derzeit noch recht undefinierten Zustände bei TDD-UMTS ist die Tatsache, dass derartige Systeme im Moment nur vereinzelt und dort auch nur als Insellösungen z.B. in firmeninternen Hausnetzen zur Steigerung der Übertragungskapazität realisiert werden. Ein flächendeckender Einsatz von TDD-UMTS ist bei den in Deutschland tätigen Netzbetreibern noch nicht abzusehen. Erst wenn TDD-UMTS eine gewisse Verbreitung gefunden hat, werden sich vermutlich die derzeit noch offenen Fragen der optimalen Messtechnik abschließend, beispielsweise durch geeignete Funktionalitätssteigerungen der vorhandenen Messsysteme, lösen lassen.

II.4.14.2 Intelligente Antennensysteme

Eine konventionelle Basisstation ist üblicherweise aus drei um 120° versetzten Sektorantennen aufgebaut. Jede Sektorantenne leuchtet einen etwa 120° breiten Sektor aus, so dass mit den drei Antennen eine Rundum-Versorgung der Mobilfunkzelle erreicht wird.

Im Gegensatz zu diesem konventionellen Antennenkonzept sind für UMTS-Systeme auch so genannte „Intelligente Antennensysteme“ geplant. Die Idee ist hierbei, die Sendeenergie der Antenne nicht gleichmäßig im Sektor zu verteilen, sondern auf einzelne Benutzer zu fokussieren. Durch die damit verbundene Interferenzminimierung wird u.a. eine Kapazitätserhöhung (bzw. bei gleicher Datenrate auch eine Expositionsminimierung) erreicht.

Intelligente Antennensysteme werden derzeit noch nicht im Regelnetzbetrieb eingesetzt, sondern befinden sich im Entwicklungsstadium. Es gibt jedoch eine Vielzahl von Untersuchungen, aus denen sich Tendenzen bezüglich einer konkreten Umsetzung ableiten lassen.

Als mögliche Konzepte werden das „Fixed beam switching“ sowie das „Adaptive beamforming“ diskutiert (Bild II.4.40) [SCHA 03], [WIE 03].

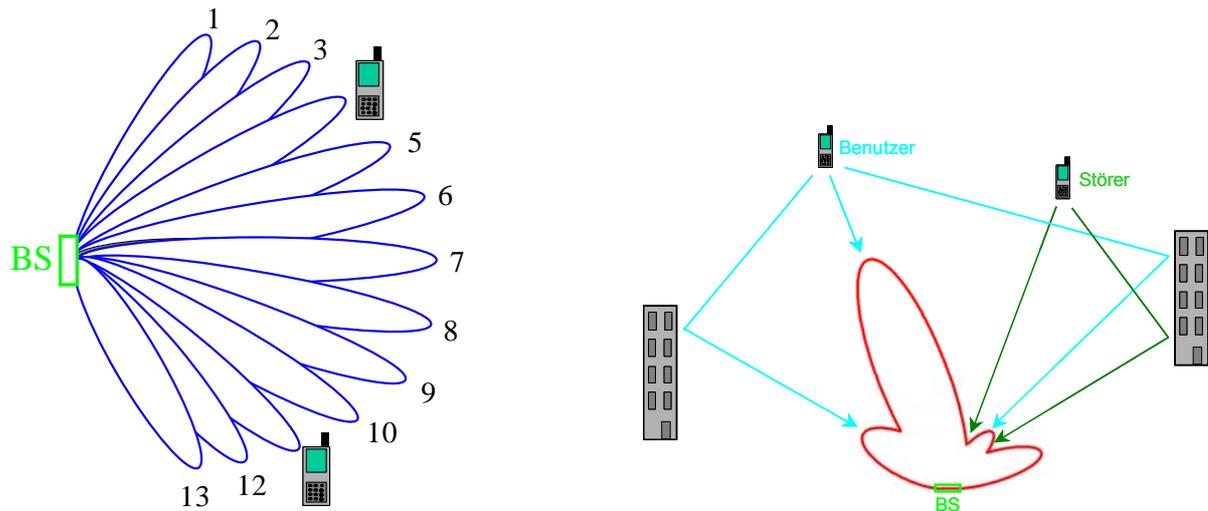


Bild II.4.40: Mögliche Konzepte für adaptive Antennen:
Fixed beam switching (links) und Adaptive beamforming (rechts) [WUS 04-2]

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

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

Nach Aussagen des weltweit größten Antennenherstellers, der Firma Kathrein, hat das „Adaptive beamforming“ Konzept die größten Chancen auf eine konkrete Umsetzung. Hierbei ist geplant, ein horizontales Array aus 2-4 Einzelelementen (d.h. Einzelantennen) zu realisieren. Mit diesem Array ist eine Strahlformung und ein Schwenken der Strahlrichtungen in horizontaler Richtung möglich. An ein vertikales Schwenken sei derzeit nicht gedacht.

Der P-CPICH Kanal wird dabei über eine der Einzelantennen abgestrahlt und damit nicht geformt bzw. geschwenkt, sondern verbleibt permanent in der Zelle. In einer späteren Variante wird darüber nachgedacht, ihn durch die Zelle zu scannen. Prinzipiell ist auch eine Abstrahlung des P-CPICH über eine separate Antenne möglich. Allen Varianten bleibt jedoch gleich, dass der P-CPICH mit dem gleichen Downtilt abgestrahlt wird wie die geformten und geschwenkten Verkehrskanäle und durch die „Nicht-Formung“ weiterhin den gesamten 120° Sektor ausleuchtet.

Das Beamforming-Konzept erfordert Überlegungen, in wieweit das oben abgeleitete Messverfahren insbesondere zur normativen Überprüfung der Grenzwerte anwendbar ist, da sich das Abstrahlendiagramm der Basisstation permanent ändern kann. Für die oben beschriebene Realisierungsvariante erscheint jedoch eine generelle Übertragbarkeit des bisherigen code-selektiven Messverfahrens möglich. Vor allem die folgenden beiden Aspekte sind hierbei bedeutsam:

- Der P-CPICH, auf dessen Auswertung die codeselektive Messtechnik zur Erfassung eines Maximalwerts im Sinne des Grenzwertaspekts beruht, verbleibt permanent in der Zelle. Er wird weiterhin im gesamten 120° Sektor abgestrahlt und weder geformt, noch geschwenkt.
- P-CPICH und Verkehrskanäle werden mit gleichem Downtilt abgestrahlt, u.U. sogar über dieselbe Antennenanlage. In diesem Falle ist davon auszugehen, dass das Vertikaldiagramm für CPICH- und Verkehrskanalabstrahlung identisch ist.

Für diesen Fall könnte das auf die Erfassung des P-CPICH basierende Messverfahren theoretisch beibehalten werden: Allerdings darf in diesem Fall der Hochrechnungsfaktor nicht mehr aus dem Verhältnis von Gesamt-Sendeleistung einer Station zur Sendeleistung des P-CPICH bestimmt werden, sondern es muss der Gewinn der Antennen, mit denen P-CPICH bzw. Verkehrskanäle abgestrahlt werden, berücksichtigt werden. Damit ist für den Hochrechnungsfaktor das Verhältnis zwischen den Strahlungsleistungen (EIRP) der Verkehrskanäle und dem P-CPICH relevant. Die maximale EIRP der Verkehrskanäle ist eine Größe, die auch seitens der BNetzA bei der Berechnung des Sicherheitsabstandes berücksichtigt werden muss.

Dieses Konzept funktioniert auch dann, wenn für den P-CPICH eine separate Antenne verwendet wird, die aber das gleiche vertikale Abstrahldiagramm aufweisen muss wie ein Einzelelement des Arrays für die Verkehrskanäle. Sofern vom Messpunkt direkte Sicht zu beiden Antennen besteht und der Abstand des Messpunktes zur Anlage wesentlich größer als der Abstand zwischen beiden Antennen ist, ist dieser Fall ohne nennenswerte Auswirkung auf die Immissionsmessung. Sind die vertikalen Antennendiagramme hingegen unterschiedlich, funktioniert der vorgestellte Algorithmus nur dann, wenn sich der Messpunkt zusätzlich in (vertikaler) Hauptstrahlrichtung der Antennen befindet, da in diesem Fall das vertikale Abstrahldiagramm nicht von Belang ist.

Die hier durchgeführten theoretischen Betrachtungen erfordern selbstverständlich umfangreiche Tests an realen Stationen. Dies kann jedoch erst dann erfolgen, wenn mit solchen Systemen ausgestattete UMTS-Anlagen in Betrieb sind.

II.4.14.3 Aktive Regelung des CPICH

Eine weitere zukünftige Entwicklung in UMTS-Netzen stellt die Möglichkeit dar, die Leistung des P-CPICH zeitabhängig zu verändern, um die Reichweite der einzelnen Stationen z.B. bei verstärkter Interferenz oder kurzfristig auftretenden Spitzenlasten zu variieren. In diesem Fall ist es natürlich für den Netzbetreiber schwierig, im Nachhinein anzugeben, mit welcher Leistung der P-CPICH zum Zeitpunkt der Immissionsmessung abgestrahlt wurde, so dass die Hochrechnung auf maximale Anlagenauslastung schwieriger durchzuführen ist. Eine Möglichkeit wäre anzunehmen, dass der P-CPICH zum Zeitpunkt der Messung mit der minimalen Leistung, die überhaupt über der Zeit vom Betreiber protokolliert wurde, im Moment der Messung abgestrahlt wurde, was natürlich mit hoher Wahrscheinlichkeit wieder

eine Überschätzung der Exposition nach sich zieht. Außerdem ist nicht unbedingt sichergestellt, dass die Betreiber den zeitlichen Verlauf der P-CPICH-Leistung über längere Zeiträume abspeichern.

Ein anderer Lösungsansatz für diese Problematik scheint hier deutlich sinnvoller: Im Übertragungsprotokoll zwischen Basisstation und Endgerät wird die Information über die momentan gewählte CPICH-Leistungsstufe mit an das Endgerät übertragen. Da codeselektive Messgeräte im Prinzip wie ein Endgerät arbeiten, besteht natürlich auch die Möglichkeit, diesen Parameter im Rahmen der codeselektiven Messung der einzelnen P-CPICH-Signale für jede Station mit auszulesen und der alphanumerischen Ergebnisdokumentation beizufügen. Dadurch ist dokumentiert, welcher momentaner Leistungswert den jeweiligen P-CPICH-Signalen zugeordnet war, so dass wiederum individuelle Extrapolationsfaktoren ermittelt werden können, die keine Gefahr der Überbewertung beinhalten.

Die derzeit am meisten verbreiteten codeselektiven EMF-Messsysteme von Rohde & Schwarz bzw. Narda verfügen nicht über die Auswertung der momentanen P-CPICH-Leistung. Nachstellerauskunft wäre eine geeignete Erweiterung der Messgerätefunktionalität bei Bedarf in der Zukunft allerdings durchaus möglich. Falls also damit begonnen wird, die P-CPICH-Leistungen in UMTS-Netzen zeitabhängig zu verändern, dürften geeignete Messlösungen, die dieser neuen Herausforderung gerecht werden, auch aufgrund der Kundennachfrage in absehbarer Zeit verfügbar sein.

Literaturverzeichnis

- [0848-1_1995] **DIN VDE 0848-1**, *Sicherheit in elektromagnetischen Feldern. Teil 1: Mess- und Berechnungsverfahren*. Entwurf, Beuth-Verlag Berlin, Mai 1995.
- [0848-1_2000] **DIN VDE 0848-1**, *Sicherheit in elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern. Teil 1: Definitionen, Mess- und Berechnungsverfahren*. VDE-Verlag Berlin, August 2000.
- [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.
- [3DEM] <http://www.visualizationsoftware.com/3dem.html>
- [99/519/EG] **1999/519/EG**, *Empfehlung des Rates vom 12. Juli 1999 zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern (0 Hz – 300 GHz)*, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften L 199/59, 30.07.1999.
- [BOR 02] **Chr. Bornkessel und J. Pamp**, *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, *Zwischenbericht Literaturstudie zu bestehenden Mess- und Berechnungsverfahren*, Kamp-Lintfort, (2002).
- [BOR 04] **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, *Zwischenbericht Analyse der Immissionsverteilung*, Kamp-Lintfort, (2004).
- [BOR 05] **Chr. Bornkessel und M. Schubert**, *Entwicklung von Mess- und Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Exposition der Bevölkerung durch elektromagnetische Felder in der Umgebung von Mobilfunk Basisstationen*, Studie im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz, *Abschlussbericht Entwicklung geeigneter Mess- und Berechnungsverfahren*, Kamp-Lintfort, (2005).
- [BUWAL 03] **Mobilfunk-Basisstationen (UMTS-FDD) - Messempfehlung, Entwurf vom 17.09.2003**, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) und Bundesamt für Metrologie und Akkreditierung (METAS), Bern, (2003).
- [CEPT 03] **CEPT/ECC/Recommendation (02)04**, *Measuring Non-Ionising Electromagnetic Radiation (9 kHz - 300 GHz)*, Maisons Alfort, 2003.

- [ICNIRP 98] **ICNIRP Guidelines**, *Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz)*, Health Physics, vol. 74 no. 4, S. 494-522, (1998).
- [KEL 05] **H. Keller**, *Grundlagen und Anwendung moderner Spektrumanalysatoren*, Firmenschrift Narda Safety Test Solutions, Pfullingen (2005).
- [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).
- [LS] <http://www.landserf.org/>
- [prEN 50400] **prEN 50400:200X**, *Basic Standard to Demonstrate the Compliance of Fixed Equipment for Radio Transmission (110 MHz - 40 GHz) Intended for Use in Wireless Telecommunication Networks With the Basic Restrictions or the Reference Levels Related to General Public Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, When Put Into Service*. CENELEC Draft Standard, Oktober 2004.
- [RAU 00] **Chr. Rauscher**, *Grundlagen der Spektrumanalyse*, Rohde & Schwarz, München, (2000).
- [RegTP 03] **Reg TP MV 09/EMF/3**, *Messvorschrift für bundesweite EMVU-Messreihen der vorhandenen Umgebungsfeldstärken*, BNetzA Bonn, Ausgabe Februar 2003.
- [RIE 04] **M. Riederer, P. Fahrni**, *Messverfahren UMTS-Mobilfunkbasisstationen*, NIR 2004 Nichtionisierende Strahlung Sicherheit und Gesundheit, 36. Jahrestagung des Fachverbandes für Strahlenschutz, Köln, 31.8.-2.9.2004, S. 362-371, (2004).
- [RYS 05] **H. Ryser, B. Mühlemann**, *Vergleichsmessungen mit UMTS Code-leistungs-Messgeräten*, Metas Bericht 2005-255-575, November 2005.
- [SCH 06] **M. Schubert, Chr. Bornkessel und M. Wuschek**, *Bestimmung der Exposition der Bevölkerung in der Umgebung von digitalen Rundfunk- und Fernsehsendern*, Studie im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz, Abschlussbericht, Kamp-Lintfort, (2006).
- [SCHA 03] **M. Schacht, A. Dekorsky und P. Jung**, *Downlink Beamforming concepts in UTRA FDD*, Advances in Radio Science, vol. 1, S. 149-153, (2003).
- [SRTM] <http://www.dlr.de/srtm/produkte/produkte.htm>
- [VTP] <http://www.vterrain.org>
- [WIE 03] **W. Wiesbeck**, *Alternative Funksysteme mit minimaler Strahlungsdichte im digitalen Rundfunk, Mobilfunk, drahtlosen LANs (miniWatt)*, Studie im Auftrag des BMBF, Abschlussbericht, (2003).

- [WUS 04] **M. Wuschek und C. Bornkessel**, *EMF-Messprojekt Berlin*, Newsletter der Forschungsgemeinschaft Funk e.V., Nr. 4/2004, S. 68-74, Bonn, (2004).
- [WUS 04-2] **M. Wuschek, C. Bornkessel, D. Manteuffel, M. Schubert und P. Schmidt**, *Möglichkeiten und Grenzen der Minimierung von Mobilfunkimmissionen: Auf Messdaten und Simulationen basierende Optionen und Beispiele*, Abschlussbericht für das Bayerische Landesamt für Umweltschutz, Regensburg, (2004).

Abkürzungsverzeichnis

BlmSchV	Bundes-Immissionsschutzverordnung
BS	Basisstation
BNetzA	Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen
CDMA	Code Division Multiple Access (engl.) → Codemultiplex
CENELEC	Comité Européen de Normalisation Electrotechnique (frz.) → Europäisches Komitee für elektrotechnische Normung
CEPT	European Conference of Postal and Telecommunications Administrations (engl.) → Europäische Konferenz der Verwaltungen für Post und Telekommunikation
CPICH	Common Pilot Channel (engl.) → Pilotkanal (Kontrollkanal bei UMTS)
DAB	Digital Audio Broadcasting (engl.) → Digitale Radio Übertragung
DVB-T	Digital Video Broadcasting – Terrestrial (engl.) → Digitales terrestrisches Fernsehen
EIRP	Equivalent Isotropically Radiated Power (engl.) → Äquivalente isotrope Strahlungsleistung
FDD	Frequency Division Duplex
GSM	Global System for Mobile Communications (engl.) → Globales System für Mobilkommunikation
LOS	Line of Sight (engl.) → Sichtverbindung
METAS	Schweizer Bundesamtes für Metrologie und Akkreditierung
MS	Mobilstation
NLOS	Non Line of Sight (engl.) → keine Sichtverbindung
P-CPICH	Primary Common Pilot Channel (engl.)
P-CCPCH	Primary Common Control Physical Channel (engl.)
P-SCH	Primary Synchronization Channel (engl.)
RBW	Resolution bandwidth (engl.) → Auflösebandbreite
RegTP	Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post
RefLvl	Referenzlevel (engl.) → Referenzpegel
S-SCH	Secondary Synchronization Channel (engl.)
Span	Frequenzbereich bei frequenzselektiven Messgeräten = Endfrequenz – Anfangsfrequenz des dargestellten Spektrums
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission

StOB	Standortbescheinigung
SWT	Sweeptime
TDD	Time Division Duplex
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System (engl.) → Universelles Mobiltelekommunikationssystem
USGS	U.S. Geological Survey (engl.) → Geologische Überwachungsbehörde der USA
UTM	Universales Transversales Mercator System
VBW	Video bandwidth (engl.) → Videobandbreite

Verzeichnis häufig verwendeter Symbole

f	Frequenz
h	Höhe
k	Erweiterungsfaktor bei Normalverteilung
k	Antennenfaktor (logarithmiert)
r	Abstand
r_a	Reflexionsfaktor der Antenne
r_s	Reflexionsfaktor des Spektrumanalysatoreingangs
t	Erweiterungsfaktor für Student-Verteilung
B	Bandbreite
B_{Signal}	Bandbreite des zu messenden Signals
B_N	Rauschbandbreite
E	Elektrische Feldstärke
H	Magnetische Feldstärke
K	Korrekturfaktor für Bandbreitenhochrechnung und Anlagenvolllast
K	Antennenfaktor
P	Leistung
P	Vertrauensintervall
S	elektrische Leistungsflussdichte
U	elektrische Spannung
U_{Peak}	Maximal auftretende Signalamplitude
U_{RMS}	Effektivwert des Signals
Z_{F0}	Feldwellenwiderstand des freien Raumes
$\lambda_{(0)}$	(Freiraum-) Wellenlänge
λ	Wellenlänge
μ	Mittelwert
σ	Standardabweichung
ΔL	Pegelfehler

Anhang: Vorgaben für eine Messnorm

In diesem Anhang werden diejenigen Aspekte zusammengefasst, die aus technischer Sicht relevant für eine Messnorm zur Ermittlung der Exposition der Bevölkerung durch elektromagnetische Felder in der Nähe von UMTS-Mobilfunksendeanlagen (FDD-Mode) unter dem Aspekt der Überprüfung der Grenzwerte sind.

In einem Vorgängerprojekt im Deutschen Mobilfunkforschungsprogramm mit dem Titel „Entwicklung von Mess- und Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Exposition der Bevölkerung durch elektromagnetische Felder in der Umgebung von Mobilfunk-Basisstationen“ sind darüber hinaus Ausführungen zur Messung der Immissionen an GSM-Sendeanlagen angegeben.

Eingeklammert sind Passagen gekennzeichnet, die in der Messnorm enthalten sein sollten, die aber keinen direkten technischen Bezug zum Messverfahren an sich haben.

1 Zweck

Diese Messnorm definiert ein Verfahren zur messtechnischen Ermittlung der Exposition der Bevölkerung durch elektromagnetische Felder im Umfeld von UMTS-Sendeanlagen (FDD-Mode) außerhalb des durch die BNetzA festgelegten Sicherheitsabstandes unter dem Aspekt der Überprüfung der Personenschutzgrenzwerte.

(...)

2 Geltungsbereich

(...)

3 Begriffe

(Hier erfolgt eine Erklärung von Begriffen, die für das Verständnis der nachfolgenden Anweisungen relevant sind).

4 Vorgehensweise

4.1 Auswahl der Messpunkte

Die Messpunkte sind abhängig von der konkreten Aufgabenstellung zu wählen. Sofern Maximierungsgesichtspunkte für die Immission im Sinne der 26. BImSchV eine Rolle spielen, sollten Messpunkte ausgesucht werden, die

- direkte Sicht zur Anlage haben und
- sich auf gleicher oder geringfügig niedrigerer Höhe wie die Sendeantennen der Anlage befinden und
- sich in direkter horizontaler Ausrichtung zu einer der Sendeantennen der Anlage befinden und
- sich in geringem lateralen Abstand zur Anlage befinden.

Unterstützend können Messungen mit einer Breitbandsonde oder numerische Simulationen zur Vorselektion geeigneter Messorte eingesetzt werden.

Sofern in Innenräumen gemessen wird, sind, sofern möglich, Fenster bzw. Balkontüren zu öffnen.

4.2 Messgeräte und Hilfsmittel

Für die Messungen sind codeselektive Messgeräte mit auf den jeweiligen Frequenzbereich abgestimmten Empfangsantennen einzusetzen.

Mögliche Antennentypen sind logarithmisch-periodische Antennen, bikonische Antennen, Dipolantennen oder isotrope 3-Achsen-Sonden. Logarithmisch-periodische Antennen sind aufgrund der geringen Beeinflussung durch den Messenden bzw. Wänden und Mobiliar zu bevorzugen. Zur Minimierung dieser Einflüsse sollten die Antennen an einer nichtmetallischen Verlängerung betrieben werden.

Alle Messgeräte und Hilfsmittel sind regelmäßig zu kalibrieren.

4.3 Messdurchführung

Die Messungen sind nach der Schwenkmethode durchzuführen.

Bei der Schwenkmethode wird ein Messvolumen mit der handgeführten Messantenne abgetastet, wobei gleichzeitig die Vorzugsrichtung und die Polarisationsrichtung der Messantenne variiert werden. Der Schwenkbereich erstreckt sich vorrangig bis in ca. 1,75 m Höhe. Während des ganzen Suchvorgangs werden aus dem Codespektrum die P-CPICH Signale erfasst und mit der „Max-Hold“ Funktion des Messgerätes maximiert.

Beim Schwenken muss die Antenne immer einen minimalen Abstand von 50 cm zu Wänden, Boden, Decke und Mobiliar einhalten.

Für jede Frequenz (d.h. für jeden Betreiber) ist ein separater Schwenkvorgang durchzuführen. Eine Messzeit von mindestens 6 Minuten laut Normvorgabe ist nicht notwendig, da die für die weitere Auswertung erfassten P-CPICH Kanäle in ihrer Intensität anlagenseitig derzeit

nicht schwanken. Messzeiten von ca. 30 Sekunden bis eine Minute pro Schwenkvorgang sind ausreichend.

Speziell bei der Nutzung der logarithmisch-periodischen Antenne muss der Schwenkvorgang sehr sorgfältig durchgeführt werden. Da diese Antennen über eine ausgeprägte Richtwirkung verfügen, muss sichergestellt werden, dass während des Schwenkvorgangs die Antenne überall im Messvolumen in jede Richtung und Polarisation orientiert wird.

Bei Messsystemen, die eine „schnelle“ und eine „langsame“ Betriebsart besitzen, ist der „langsame“ Mode zu bevorzugen. In diesem Fall sollten vorzugsweise einachsige Messantennen zur Steigerung der Messrate eingesetzt werden.

Die Bewegung der Antenne muss bezogen auf die Messrate des codeselektiven Messgerätes langsam erfolgen. Dies ist insbesondere bei Messungen im „langsamen“ Mode zu beachten, da sonst die Immission unterbewertet wird.

Der Schwenkvorgang ist auch bei Messungen im Freien durchzuführen.

5 Auswertung

Die unter Berücksichtigung der Antennenfaktoren und der Kabeldämpfung für jede Frequenz gemessenen Feldstärken E_{gem} der einzelnen P-CPICH Kanäle werden mit Hilfe eines Korrekturfaktors K auf die maximale Feldstärke E_{max} bei höchster betrieblicher Anlagenauslastung extrapoliert. Der Korrekturfaktor K ergibt sich aus dem Verhältnis von maximal für den Sektor/Anlage von der BNetzA bewilligten Leistung P_{max} und der aktuell eingestellten Leistung des P-CPICH P_{CPICH} und ist vom Betreiber der Anlage zu erfragen:

$$K = \frac{P_{\text{max}}}{P_{\text{CPICH}}} \quad (5.1)$$

$$E_{\text{max}} = E_{\text{gem}} \cdot \sqrt{K} \quad (5.2)$$

Dabei bedeuten:

P_{max}	maximal bewilligte Leistung des jeweiligen Sektors der Anlage, in W
P_{CPICH}	aktuelle Leistung des P-CPICH des jeweiligen Sektors der Anlage, in W
K	Korrekturfaktor des jeweiligen Sektors der Anlage zur Extrapolation, ohne Einheit
E_{max}	maximal mögliche Feldstärke durch den jeweiligen Sektor der Anlage, in V/m
E_{gem}	gemessene Feldstärke des P-CPICH durch den jeweiligen Sektor der Anlage, in V/m

Die bei einer Frequenz über alle erfassten P-CPICH Codes gemessenen Teilsignale sind leistungsbezogen zu addieren und ergeben die auf höchste betriebliche Anlagenauslastung hochgerechnete Feldstärke durch alle auf der gemessenen Frequenz betriebenen Sektoren bzw. Anlagen:

$$E_{\max, \text{Frequenz}} = \sqrt{\sum_{\text{Codes}} (E_{\max})^2} \quad (5.3)$$

Zur Berechnung der Gesamtmission durch alle UMTS-Anlagen aller Betreiber sind die so ermittelten Feldstärken leistungsmäßig über alle Frequenzen zu addieren:

$$E_{\max, \text{gesamt}} = \sqrt{\sum_{\text{Frequenzen}} (E_{\max, \text{Frequenz}})^2} \quad (5.4)$$

Anmerkung: Derzeit verfügbare codeselektive Messgeräte besitzen zwar eine sehr hohe absolute Empfindlichkeit, jedoch ist ihre relative Empfindlichkeit stark eingeschränkt. In der Praxis muss damit gerechnet werden, dass Signale, die mehr als 20 dB schwächer als das dominierende Signal sind, vom Gerät nicht mehr erfasst werden. In den Fällen, in denen ein oder zwei Sektoren einer Station aufgrund eines sehr starken Signals nicht mehr angezeigt werden, sind die fehlenden Signale fiktiv mit 20 dB unter dem stärksten Signal anzunehmen.

6 Dokumentation

Die Dokumentation soll die folgenden Punkte umfassen:

- Administrative Daten: Auftraggeber, Auftragnehmer mit den entsprechenden Anschriften und Kontaktpersonen, Messzeit, Messort, beteiligte Personen, eindeutige Nummerierung des Berichtes, eindeutige Bezeichnung der gemessenen Anlage
- Gegenstand der Messung
- Daten der untersuchten Mobilfunk-Sendeanlage: Ort der Anlage, Betreiberinformation, ggf. Scrambling-Codes der Sektoren, ggf. Information zu umliegenden Mobilfunk Sendeanlagen (mit Fotos)
- Beschreibung der Messpunkte (mit Fotos)
- Eingesetzte Messgeräte mit Hersteller, Seriennummer und Kalibrierdaten
- Beschreibung des eingesetzten Messverfahrens
- Messergebnisse: Originär gemessene Daten und Ergebnisse der Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung
- Angewendete Grenzwerte und Vergleich der Messergebnisse mit den Grenzwerten

- Messunsicherheit: Es ist ein Messunsicherheitsbudget nach Tabelle 6.1 aufzustellen. Dabei sind die Unsicherheitsbeiträge des eingesetzten codeselektiven Empfängers, des Kabels und der Antennen sowie von Fehlanpassungen (Antenne – Kabel, Kabel – Empfänger, Antenne – Empfänger) zu berücksichtigen. Für verfahrensbedingte Unsicherheiten sind die Unsicherheiten der Probennahme sowie die Rückwirkung der Umgebung (Messpersonal, Wände, Mobiliar) auf das Messresultat abzuschätzen. Die Erweiterte Messunsicherheit ist mit einem Erweiterungsfaktor von 2 zu bilden (95 % Vertrauensintervall). Die Messunsicherheit ist nicht auf die Messergebnisse aufzuschlagen.
- Endergebnis: Das Ergebnis der Messung ist kurz und prägnant darzulegen.

Komponente	Einflussfaktor	Spezifizierte Unsicherheit [dB]	Verteilung	Divisor	Standardunsicherheit [dB]
Empfänger	Absolutpegel				
Empfänger	Frequenzgang				
Empfänger	Linearitätsabweichung				
Empfänger	Unsicherheit der Codedetektion				
Kabel	Absolutkalibrierung				
Kabel	Interpolation				
Antenne	Absolutkalibrierung				
Antenne	Interpolation				
Fehlanpassung	Kabel/Empfänger				
Fehlanpassung	Antenne/Kabel				
Fehlanpassung	Antenne/Empfänger				
Antenne	Umgebung				
Probennahme	Reproduzierbarkeit				
Kombinierte Standardunsicherheit					
Erweiterte Messunsicherheit (k=2)					

Tabelle 6.1: Aufstellung des Messunsicherheitsbudgets