

---

Bestimmung der realen Feldverteilung von  
hochfrequenten elektromagnetischen Feldern  
in der Umgebung von UMTS-Sendeanlagen

Abschlussbericht

erstellt für das  
Bundesamt für Strahlenschutz

15. August 2006

## **Projektleitung beim Auftragnehmer**

Dr. Christian Bornkessel  
Institut für Mobil- und Satellitenfunktechnik (IMST) GmbH  
Abteilung Prüfzentrum  
Carl-Friedrich-Gauß-Straße 2  
47475 Kamp-Lintfort  
Tel: 02842/981-383  
Fax: 02842/981-399  
E-Mail: bornkessel@imst.de

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

## **Autoren**

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

## **Projektleitung beim Auftraggeber**

Dirk Geschwentner  
Bundesamt für Strahlenschutz  
Fachbereich Strahlenschutz und Gesundheit  
Ingolstädter Landstraße 1  
85764 Oberschleißheim  
Tel: 01888/333-2148  
Fax: 01888/333-2305  
E-Mail: DGeschwentner@bfs.de

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

## Kurzzusammenfassung

Ziel vorliegenden Forschungsvorhabens war es, Mess- und Berechnungsverfahren zu entwickeln und damit die reale Verteilung von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern in der Umgebung von UMTS-Sendeanlagen zu ermitteln.

Bezüglich *Expositionsmessungen* existieren mit breitbandigen, frequenzselektiven (spektralen) und codeselektiven Verfahren drei Methoden mit völlig unterschiedliche Messprinzipien. Für Messungen zum Nachweis der *Einhaltung der 26. BImSchV-Grenzwerte* liefert das codeselektive Verfahren die zuverlässigsten Ergebnisse. Zur Messung von *örtlichen und zeitlichen Mittelwerten bzw. zeitlichen Verläufen* sind frequenzselektive Messverfahren in Verbindung mit isotropen Antennen einzusetzen. Hierbei ist die Gefahr von Fehlbewertungen der Immission durch falsche Messgeräteeinstellungen allerdings sehr hoch.

Mittels "Schwenkmethode" sowie Hochrechnung auf den maximalen Betriebszustand wurde codeselektiv die Feldverteilung in 11 verschiedenen Szenarien gemessen, die repräsentativ für gegenwärtige UMTS-Netzstrukturen und Zelltypen sind.

Die Messungen ergaben sehr unterschiedliche Expositionswerte. Der überwiegende Teil der Ergebnisse lag unter einem Prozent vom Feldstärkegrenzwert. Maximal wurden etwa 8,4 % (entsprechend 5,1 V/m bzw. 69,3 mW/m<sup>2</sup>) gemessen; der kleinste Messwert beträgt etwa 0,01 % (entsprechend 0,006 V/m bzw. 0,1 µW/m<sup>2</sup>). Raum- und zeitgemittelte Feldstärken sind um den Faktor 5 bis 8 kleiner als die oben angegebenen Werte.

Die größten Messwerte ergaben sich in kleinzelligen Szenarien. Hier ist zwar die Sendeleistung klein, allerdings bedingen die niedrig montierten Antennen einen geringen Abstand zu Personen. Hoch montierte Antennen der UHS-Stationen ergaben kleinere Expositionen.

Der Abstand ist im direkten Umfeld der Anlage (bis zu etwa 100 m, abhängig von Montagehöhe und Downtilt) in Outdoor-Szenarien als Schätzer für die UMTS-Exposition wenig geeignet. Sichtbedingungen sowie die Lage des Messpunktes zur vertikalen Hauptkeule der Antenne haben hingegen einen deutlichen Einfluss auf die Exposition.

Parallel zu den UMTS-Expositionen wurde auch die GSM-Exposition gemessen. Insgesamt überwiegen an 85 % der Messpunkte grenzwertbezogen die GSM-Expositionen, was durch die höhere installierte Sendeleistung, die breitere Hauptkeule sowie den kleineren Expositionsgrenzwert vor allem von GSM 900 im Vergleich zu UMTS begründet ist.

Langzeitmessungen zeigen, dass die tageszeitlichen Variationen bei einer Vielzahl von UMTS-Stationen wesentlich weniger ausgeprägt sind als bei GSM-Stationen.

Bezüglich Berechnungsverfahren wurden mehrere kommerziell verfügbare Programmpakete getestet. Einflüsse von Montageumgebung, Downtilt und Frequenz auf die Abstrahlcharakteristik werden durch ein synthetisiertes Diagramm berücksichtigt. Zur Einbeziehung der Gelände- und Gebäudedaten in die Programme wurden geeignete Techniken entwickelt.

In LOS-Szenarien prognostizierten alle Programme die Exposition zuverlässig. In NLOS-Szenarien überschätzen Freiraummodelle die gemessene Exposition um 10-60 dB, wohingegen die anderen Verfahren teilweise bis zum Zellrand gute Ergebnisse liefern, sofern Gebäude oder andere Hindernisse im Ausbreitungspfad berücksichtigt werden. In Outdoor-Szenarien kann die Transmissionsdämpfung durch Gebäude vernachlässigt werden.

## Abstract

The aim of the presented research project was to develop measurement and calculation methods as well as to apply them to a determination of the actual field distribution of RF electromagnetic fields around UMTS base stations.

Concerning measurements broadband, frequency selective (spectral) and code selective methods exist, which use completely different measurement principles. For measurements used to prove that the *exposure limits of the German 26. BImSchV* are met, the code selective method gives the most reliable measurement results. For measurements of *space and time averages or time characteristics*, frequency selective methods with isotropic field probes have to be used. Here it is of utmost importance to use the right spectrum analyzer settings; otherwise measurement errors of several dB are possible.

Using the code selective technique with “sweeping method” and extrapolation on maximal operational state, the exposure distribution was measured in 11 different scenarios, which represent the present available network structure and cell types of the UMTS network.

In each scenario as well as between the scenarios different exposures have been found. The majority of the measurement results is below 1 % of the field strength limit. The highest value was found to be 8,4 % (corresponding to 5.1 V/m and 69.3 mW/m<sup>2</sup>), the smallest value was about 0.01 % (corresponding to 0.006 V/m and 0.1 µW/m<sup>2</sup>). Time and space averaged field strengths are a factor of about 5 to 8 smaller than the exposures given above.

The highest exposures were measured in micro cell scenarios, which were operated with relatively small transmit powers, but use low mounted antennas, that result in short distances to persons. The high mounted antennas of UHS stations result in lower exposures.

The distance in the direct vicinity of the station (up to several 100 meters, depending on height and downtilt) in outdoor scenarios is not suited as a measure for quantifying UMTS exposures. Sight conditions and the orientation of the measurement point to the vertical main lobe of the antenna, however, have a large influence on the exposure.

Parallel to the UMTS exposure also the GSM exposure was measured. Overall, at 85 % of the measurement points GSM exposures were higher than UMTS exposures (with regard to exposure limit consumption), which is mainly due to higher installed transmit power, broader main lobe and smaller exposure limit especially of GSM 900 compared to UMTS.

Long term measurements show, that daily variations at UMTS stations are less present on many sites in comparison to GSM stations.

Concerning numerical exposure prediction, several commercially available tools were tested. Different operation and mounting conditions of the base station's antenna are accounted for with a synthetic radiation pattern. Also techniques to include topography and buildings in the simulation have been developed.

In LOS scenarios all programs predict the exposure accurately. In NLOS scenarios, however, simple free space models overestimate measured exposure by 10-60 dB, whereas other methods partially exhibit good predictions up to the borders of the coverage area, if buildings and other obstacles between station and prediction location are included accordingly. For outdoor scenarios the transmission through buildings can be omitted.

## Zusammenfassung

Ziel vorliegenden Forschungsvorhabens war es, Mess- und Berechnungsverfahren zu entwickeln bzw. bestehende Verfahren zu modifizieren und damit die reale Verteilung von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern in der Umgebung von UMTS-Sendeanlagen zu ermitteln bzw. die tatsächliche Exposition von Personen im Umfeld dieser Anlagen abzuschätzen.

Ortsfeste UMTS-Sendeanlagen unterliegen dem Standortbescheinigungsverfahren der Bundesnetzagentur (BNetzA). Damit ist gewährleistet, dass in allgemein zugänglichen Aufenthaltsbereichen die Grenzwerte zum Schutz der Bevölkerung vor elektromagnetischen Feldern eingehalten werden [99/519/EG, 26.BImSchV]. Über diese Feststellung hinaus liegen aber bezüglich der Sendeanlagen des noch jungen Mobilfunksystems UMTS nur wenig belastbare Informationen über die Größe und Verteilung der elektromagnetischen Immissionen im Umfeld der Basisstationen vor. Insbesondere werden bei UMTS Modulations- bzw. Vielfachzugriffsverfahren verwendet, die sich grundsätzlich von den bei GSM üblichen Prinzipien unterscheiden. Dadurch ergeben sich wesentliche Unterschiede bei der Messung der elektromagnetischen Immissionen derartiger Anlagen.

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 wurden 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 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.

Für die Maximalwertsuche im Messvolumen hat sich die „Schwenkmethode“ als effizientes Verfahren erwiesen. Eine Maximalwertsuche mit der Punktrastermethode führt in der Regel zu einer Unterbewertung, sofern für die Messung praktikable Punktmengen verwendet werden. Auch eine zweistufige Maximalwertsuche (Vormessung plus Präzisionsmessung an dem vorher als maximal klassifizierten Punkt) kann aufgrund des Einflusses der messenden Person zu einer Fehlbewertung 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, sind frequenzselektive Messverfahren in Verbindung mit isotropen Antennen einzusetzen. 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.

Zweidimensionale Scanmessungen zur Charakterisierung der kleinskaligen örtlichen Schwankungsbreite im Umfeld einer GSM 900- / UMTS-Anlage zeigen, dass entgegen der Erwartungen (größere spektrale Bandbreite bei UMTS) keine deutliche Reduzierung der Schwankungsbreite des „fast fadings“ zu erkennen ist. Obwohl dieses Ergebnis unter Umständen durch die codeselektive Messtechnik beeinflusst sein kann, muss hieraus abgeleitet werden, dass der Schwenkvorgang bei der Messung von UMTS-Immissionen ebenso sorgfältig durchgeführt werden muss wie bei der Messung von GSM-Immissionen.

Mittels des codeselektiven Messverfahrens mit Schwenkmethode und Hochrechnung auf die höchste betriebliche Anlagenauslastung wurden Messungen der elektrischen Immissionsverteilung in der Umgebung von UMTS-Mobilfunkanlagen in insgesamt 11 unterschiedlichen Szenarien durchgeführt. Die Szenarien bilden die derzeit verfügbaren Netzstrukturen und Zellarten der UMTS-Netze ab:

1. Niedrig montierte Station im ländlichen Umfeld
2. Hoch montierte Station im ländlichen Umfeld = frei stehender Mast
3. Station in einem Gewerbegebiet
4. Niedrig montierte Station im städtischen Umfeld
5. Hoch montierte Station im städtischen Umfeld
6. UHS-Station (Ultra High Site)
7. Station zur Indoor-Versorgung
8. Station zur Versorgung eines Fußballstadions
9. Station zur Versorgung einer Messehalle
10. Station zur Versorgung einer Pikozele
11. Station auf einem Gebäudedach und Ermittlung der Immission im Gebäude

Die Messungen wurden bei verschiedenen Abständen, Sichtbedingungen, Orientierungen und Höhenunterschieden zu den Anlagen durchgeführt und gestatten durch diese Systematik in gewissen Grenzen eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf ähnliche Szenarien. Die solchermaßen ermittelten Immissionen an insgesamt 163 Messpunkten lassen sich wie folgt charakterisieren:

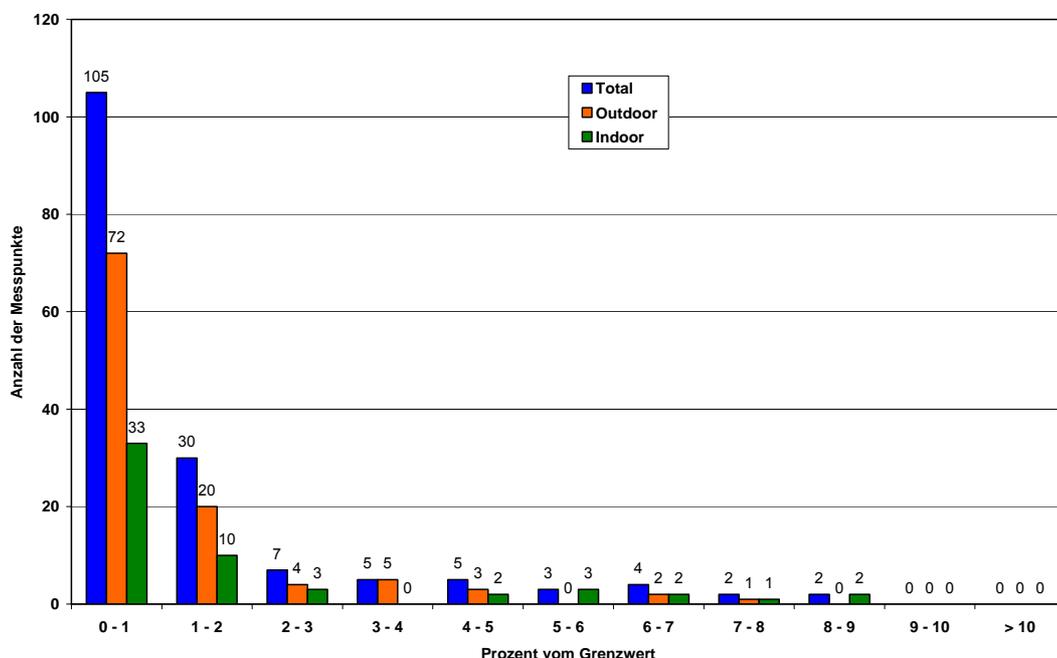


Bild 1: Verteilung der Messergebnisse; Feldstärke in Prozent des Grenzwertes der 26. BImSchV

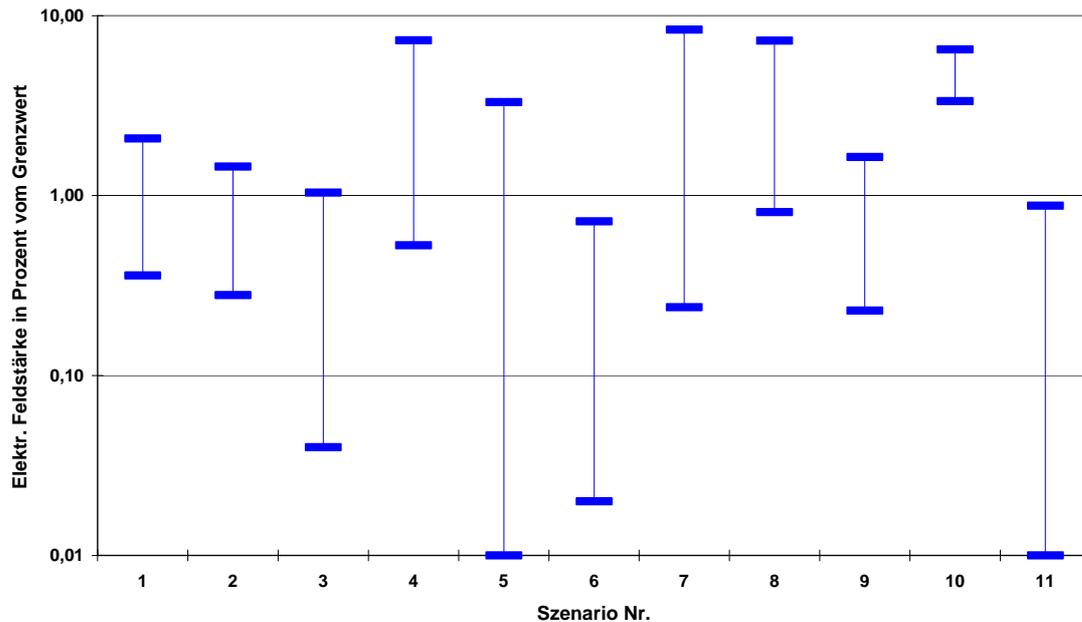


Bild 2: Spannwerte der an den elf untersuchten Szenarien gemessenen Expositionswerte (Elektrische Feldstärke in Prozent vom Grenzwert der 26. BImSchV)

Innerhalb der Szenarien und auch beim Vergleich der Szenarien untereinander wurden sehr unterschiedliche Expositionswerte gefunden. Der überwiegende Teil der Messergebnisse lag bei weniger als einem Prozent vom Grenzwert, bezogen auf die elektrische Feldstärke. Maximal wurden etwa 8,4 % (entsprechend 5,1 V/m bzw. 69,3 mW/m<sup>2</sup>) gemessen; der kleinste Messwert beträgt etwa 0,01 % (entsprechend 0,006 V/m bzw. 0,1 µW/m<sup>2</sup>). Die Spannwerte der Exposition über alle Szenarien ist mit etwa 60 dB sehr groß. Untersuchungen zur Ermittlung von örtlich und zeitlichen Mittelwerte haben ergeben, dass die „aktuellen“, d.h. raum- und zeitgemittelten Immissionen beim derzeitigen Ausbaustand der Anlagen je nach Szenario und Sichtbedingungen feldstärkebezogen um den Faktor 5 bis 8 kleiner als die oben angegebenen Werte sind.

Obige Bilder zeigen deutlich, dass aus der Größe der Versorgungszelle und der damit verbundenen Sendeleistung keinesfalls Rückschlüsse auf die entstehende Exposition gezogen werden können. Die größten Messwerte ergaben sich in kleinzelligen Szenarien, die zwar mit geringerer Sendeleistung als typische Dach- und Maststandorte betrieben werden (Indoorversorgungen: Szenarien 7 und 8), bei denen allerdings an Decken montierte Antennen eingesetzt werden, was einen geringen Abstand zu Aufenthaltsbereichen von Personen bewirkt. Ähnliches beobachtet man bei Zellen mit niedrig montierten Antennen (Szenarien 4 und 10).

Sind die Antennen im Vergleich zur Umgebung sehr hoch montiert, ergeben sich meist geringere Expositionswerte. Besonders auffällig ist dieser Effekt bei UHS-Standorten (Szenario 6), die zwar eine sehr große Versorgungsfläche abdecken und dafür auch eine größere Summenleistung abstrahlen, im Rahmen dieser Untersuchung dennoch die niedrigsten Expositionswerte liefern. Vom Standpunkt der Immissionsminimierung aus gesehen sind also derartige Standortkonzepte durchaus zu begrüßen. Allerdings muss angemerkt werden, dass im Rahmen dieses Projektes keine Bewertung des UHS-Konzeptes bezüglich der Versorgungsgüte im Vergleich zu konventionellen Standortkonzepten durchgeführt wurde.

Ebenfalls vergleichsweise sehr niedrige Expositionswerte fanden sich im Inneren eines Gebäudes, auf dessen Dach Sendeantennen montiert waren (Szenario 11). Hier wurde offensichtlich das vertikale Bündelungsverhalten der Antennen sowie die starke Dämpfungswirkung der Betondecken (es handelte sich bei dem Gebäude um ein Parkhaus) wirksam. Eine grundsätzliche Verallgemeinerung dieses Ergebnisses auf alle Arten von Gebäuden sollte allerdings unterbleiben, da nicht alle Dächer gute Schirmdämpfungswerte besitzen (stark abhängig vom Baumaterial und vorhandenen Öffnungen, wie z.B. Dachfenster oder Lichtschächte). Übertragbar erscheint uns allerdings das hier gefundene Ergebnis auf Hochhäuser mit Mobilfunkantennen auf dem Dach zumindest für alle Stockwerke außer dem obersten Geschoss, bei dem im Fall einer gut dämpfenden Deckenstruktur ebenfalls sehr niedrige Messwerte auftreten können (in der Größenordnung von ein Prozent des Feldstärke-Grenzwertes oder weniger), in anderen Fällen jedoch auch etwas höhere bis in den Bereich von etwa fünf bis zehn Prozent vom Grenzwert.

Bei der Untersuchung von Einflussfaktoren für die Größe der Immission hat sich herausgestellt, dass der *Abstand* im unmittelbaren Umfeld der Anlage (bis zu einigen hundert Meter, abhängig von Montagehöhe und Downtilt) in Outdoor-Szenarien offenbar als Maß zur Quantifizierung der entstehenden UMTS-Exposition wenig geeignet ist. Grund dafür ist, dass in diesem Entfernungsbereich die Immission sehr stark durch die Nebenzipfel und Einzüge des stark bündelnden vertikalen Antennendiagramms geprägt ist und daher einen sehr unregelmäßigen Charakter aufweist. Bei Gebäuden mit Indoorversorgung ist hingegen eher eine Tendenz zur stetigen Abnahme der Exposition mit dem Abstand zu beobachten, da hier das Antennendiagramm weniger stark gebündelt ist und geringere Unterschiede im Vertikalwinkel zwischen Antenne und Expositionsort auftreten.

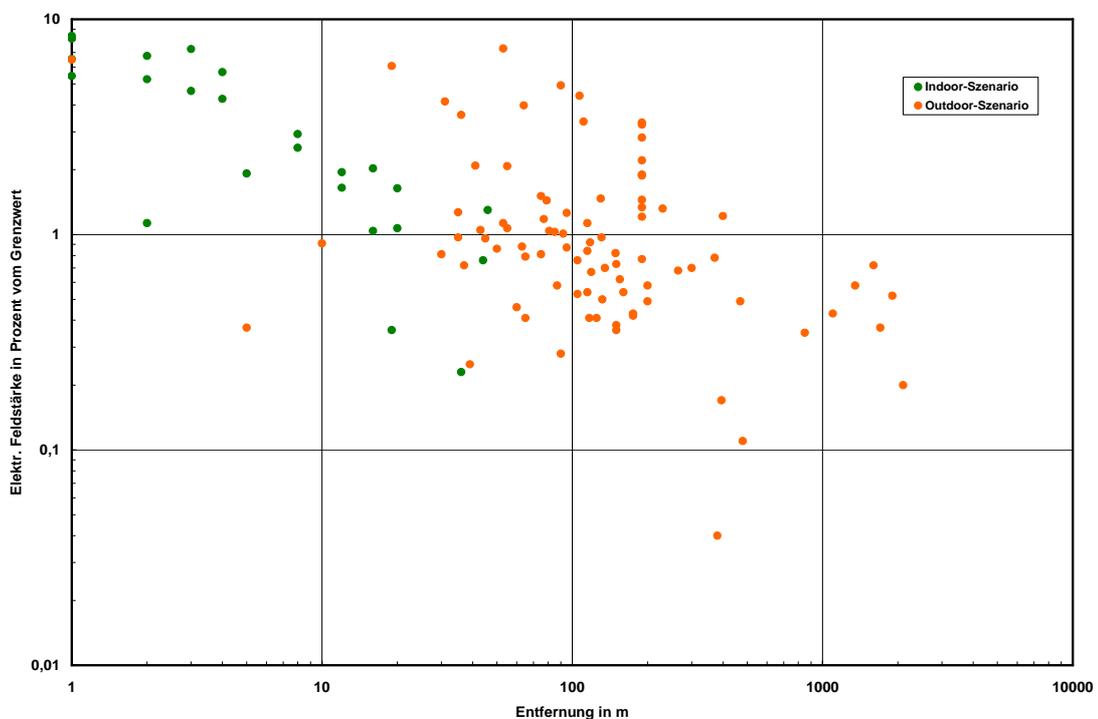


Bild 3: Immission als Funktion des Abstandes

Einen deutlichen Einfluss üben hingegen die Sichtverhältnisse aus: Objekte wie Gebäude, aber auch Bäume und Sträucher, bzw. Wände im Indoorbereich zwischen Messpunkt und Sendeanlage haben einen dämpfenden Einfluss, der sich erheblich in den Messergebnissen widerspiegelt. Die Immissionsreduzierung ist dabei abhängig von der Dämpfungswirkung des Objektes, aber auch von der Frage, inwieweit die Signale der Basisstation auch über Reflexionen z.B. an benachbarten Gebäuden oder Wänden zum Messpunkt gelangen können.

Der Einfluss des Vertikalwinkels konnte im Rahmen dieser Untersuchung nicht sehr deutlich herausgearbeitet werden, da die Anzahl und die Entfernungsstaffelung der Punkte dafür nicht ausreichend war. Bei Aussparung des Szenarios „Pikozelle“ ist jedoch deutlich zu erkennen, dass im hier betrachteten Entfernungsbereich an Messpunkten mit kleinem Vertikalwinkel (zwischen -6 und 10 Grad) im Mittel (trotz größerer Entfernung) höhere Messwerte auftreten, als an Punkten mit größerem Vertikalwinkel.

Parallel zu den UMTS-Immissionen wurden in 9 Szenarien auch die GSM-Immissionen an den Messpunkten mit erfasst. Für die Messungen wurden speziell solche Anlagen ausgewählt, bei denen neben einem UMTS-System auch ein GSM-System installiert war. Dadurch war es möglich, die UMTS-Expositionssituation mit der GSM-Expositionssituation *an identischen Anlagen* zu vergleichen. Über alle Messpunkte gesehen ergibt sich eine deutliche Dominanz der GSM-Immissionen im Vergleich zu UMTS. Grenzwertbezogen dominieren an etwa 85 % der Messpunkte die durch GSM-Systeme hervorgerufenen Immissionen.

Bei der Fragestellung der Dominanz von GSM- oder UMTS-Immissionsanteilen an konkreten Messpunkten spielen mehrere Einflussfaktoren eine Rolle. Zu diesen Faktoren gehören die installierte Sendeleistung und insbesondere auch die Orientierung zur Hauptstrahlrichtung der Antennen. Die gegenüber UMTS deutlich breitere Hauptkeule von GSM 900 führt dazu, dass im Umfeld von GSM 900-Anlagen wesentlich mehr Punkte in oder nahe der Hauptstrahlrichtung liegen als bei UMTS und somit eine höhere Immission erfahren. Letztlich sorgt auch der niedrigere Grenzwert für GSM 900-Immissionen dafür, dass bei einer grenzwertbezogenen Betrachtung oftmals die Immissionen durch GSM 900 dominieren, wohingegen sich GSM 1800 und UMTS ähnlich verhalten.

Drei durchgeführte Langzeitmessungen über einen Zeitraum von mindestens 24 Stunden sowie vier Profile über einen Zeitraum von mehreren Minuten dokumentieren den zeitlichen Verlauf der Immission. Die größte Schwankungsbreite mit ca. 4 dB ergibt sich dabei in zwei Szenarien durch die Bewegung von Personen im Umfeld der Messeinrichtung. Demgegenüber war die Schwankungsbreite an einer innerstädtischen Anlage, die zum Zeitpunkt der Übertragung von Spielen der Fußballweltmeisterschaft 2006 unter dem Hinblick einer zu erwartenden deutlichen Verkehrsauslastung gemessen wurde, mit ca. 2,1 dB geringer. Bei „Provozierung“ einer Verkehrsauslastung durch eine 384 kBit/s-Datenkarte konnte an einer Station eine Erhöhung der Immission um max. 3,4 dB erreicht werden. Offensichtlich sind im Vergleich zu typischen tageszeitlichen Schwankungen bei GSM-Basisstationen bei einer Vielzahl von UMTS-Anlagen verkehrsbedingte Immissionsschwankungen derzeit nur wenig ausgeprägt. Dies liegt sicherlich einerseits daran, dass die UMTS-Netze derzeit noch nicht die Verkehrsmengen transportieren, wie die GSM-Netze. Andererseits ist zu beachten, dass bei GSM im Falle zunehmender Verkehrslast abrupt weitere Trägerfrequenzen zugeschaltet werden, was insgesamt zu einem sprunghafteren Zeitverlauf der Exposition führt als bei UMTS, wo die Verbindungen alle auf einer Frequenz abgewickelt werden und die Leistungs-

Veränderung pro Verbindung insgesamt moderater ausfällt. Durch diese Tatsache ist der gleichmäßigere Messwerteverlauf über der Zeit bei UMTS im Gegensatz zu GSM erklärbar. Eine durch variierende Verkehrslast sich verändernde Ausdehnungen der Funkzelle („Zellatmung“) ist hingegen von untergeordneter Bedeutung für die Exposition, da die Veränderung der Zellgröße nicht durch unterschiedliche Sendeleistungen der Basisstation und damit einer Veränderung der Exposition der Bevölkerung in der Umgebung eines Standortes verursacht wird, sondern durch Variationen der Störleistung innerhalb einer Zelle. Die zeitlichen Immissionsvariationen an Anlagen *ohne* Verkehr bzw. Personeneinfluss ist mit Werten im Bereich von typ. 1,5 dB am geringsten und unterstreicht, dass die Immissionen durch Signalisierungskanäle zeitlich nahezu konstant ist.

Bezüglich *Berechnungsverfahren* wurden für diese Studie verschiedene kommerziell verfügbare 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. In den Vergleich wurden die Programmpakete *Winprop*, *Wireless Insite* und *EFC-400* einbezogen. Zusätzlich erfolgten grundsätzliche Untersuchungen am Paket *Quickplan*; weiterhin wurde als Vertreter der Methode „Freiraumausbreitung“ das Programm *FieldView* berücksichtigt.

Anhand eines Kataloges von verschiedenen praxisrelevanten Konfigurationen wurde ein Vergleich von berechneten Feldstärkewerten und entsprechend messtechnisch bestimmten Immissionen durchgeführt und somit die Eignung der jeweiligen Software untersucht. Hierbei wurden verschiedene UMTS-Zelltypen, Indoor- und Outdoor-Szenarien, differierende Sichtbedingungen und unterschiedliche Abstände zur Basisstation berücksichtigt. Dabei konnten folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

Eine *multifrequenzielle Nachbildung* der Feldquelle aufgrund der großen Signalbandbreite von UMTS ist aufgrund des enormen Mehraufwandes nicht zu empfehlen. Von den hier verwendeten Softwarepaketen wäre eine Realisierung nur mit dem Programm *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 zeigen die Simulationen einen gewissen homogenisierenden Einfluss auf die Feldverteilung durch die Bandbreite von 5 MHz, 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.

Bezüglich der *Eingabeparameter* kann zusammenfassend festgehalten werden, dass die Kompensation der Abhängigkeit von Frequenz, Downtilt und Montageumgebung am besten mit einer *Synthese eines Antennendiagramms* erfolgt. Da das Simulationsgebiet nicht nur die direkte Senderumgebung, sondern eine gesamte Versorgungszelle umfasst, muss der *Geländeverlauf* auf jeden Fall in der Berechnung berücksichtigt werden. Außerdem wurden Methoden vorgestellt, die es ermöglichen, auch die Vielzahl von *Gebäuden* in den betrachteten Softwarepaketen berücksichtigen zu können.

Insgesamt hat sich gezeigt, dass in Situationen mit direkter Sicht zur Sendeanenne (LOS) alle Programme die Immission an der Mehrzahl der Vergleichsgebiete vor dem Hintergrund der Messunsicherheit gut prognostizieren. Dennoch sollten bei derartigen Konfigurationen aber folgende Aspekte berücksichtigt werden: Befinden sich z.B. Bäume in der Sichtverbindung, die in den Simulationen außer Acht gelassen wurden, überschätzen die Programme die Immission im Vergleich zur Messung. Die Größenordnung der Überschätzung kann durchaus im Bereich von 6 bis 10 dB liegen. Darüber hinaus sollten auch „schwebende“ Objekte, wie z.B. Fußgängerbrücken, in der Simulation berücksichtigt werden, da bei deren Vernachlässigung unter Umständen mit Unterschätzungen gerechnet werden muss. Ein Vergleich der Messresultate mit den Ergebnissen der Berechnungsmethode „Freiraum + 3 dB“ hat gezeigt, dass auch diese Methode für Konfigurationen mit direkter Sicht zur Anlage als geeignet angesehen werden kann.

Im Gegensatz dazu ist die Methode „Freiraum + 3 dB“ für Situationen ohne direkte Sicht zur Sendeanlage nicht geeignet, die realen Immissionen zu prognostizieren. In den betrachteten Szenarien traten hierbei Überschätzungen mit einer Schwankungsbreite von 10-60 dB auf. Die Einbeziehung von Gebäuden in die Simulation ist dementsprechend zwingend erforderlich. Bei dem Softwarepaket *EFC-400* haben sich in den betrachteten Szenarien Gebäudedämpfungen von etwa 15 dB als geeignet erwiesen, die reale Immissionssituation widerspiegeln zu können. Darüber hinaus hat sich gezeigt, dass die *Gebäudetransmissionen* für die Immissionsverteilung in Outdoor-Szenarien eher eine untergeordnete Rolle spielen und somit in einer Simulation nicht notwendigerweise Berücksichtigung finden müssen. Dennoch kann es unter Umständen, wie z.B. bei Gebäuden aus gering dämpfenden Materialien, zu einer Unterschätzung der Immission im Vergleich zur Messung kommen. Der Vergleich von Berechnung und Messung bei Szenarien ohne direkte Sicht auf die Basisstation hat darüber hinaus gezeigt, dass die Simulationen teilweise auch noch in großer Entfernung bis zum Rand der Versorgungszelle eine gute Immissionsprognose liefern.

Da es aufgrund der Anzahl von Gebäuden im gesamten Versorgungsgebiet einer UMTS-Zelle viel zu aufwändig wäre, diese alle durch einzelne Wände inklusive Innenwände zu modellieren und somit auch Immissionswerte innerhalb von Gebäuden prognostizieren zu können, wurde untersucht, in wie weit unter Berücksichtigung eines geeignet gewählten Reduktionsfaktors die berechneten Immissionswerte außerhalb eines Gebäudes die Immission innerhalb eines Gebäudes widerspiegeln können. Hierbei hat sich gezeigt, dass derartige Abschlagswerte einer großen Schwankungsbreite unterliegen. Da diese darüber hinaus stark abhängig von der Sichtverbindung und den verwendeten Materialien ist, wird ein solcher allgemeingültiger Faktor immer mit einer großen Unsicherheit behaftet sein.

## Summary

The aim of the presented research project was to develop measurement and calculation methods as well as to modify existing ones. These methods were applied for a determination of the actual field distribution of RF electromagnetic fields around UMTS base stations.

Fixed UMTS base stations in Germany underlie a site certification program performed by the German Federal Network Agency (Bundesnetzagentur). This ensures that safety levels of exposure of the general public to electromagnetic fields (German 26. Ordinance implementing the Federal Immission Control Act - 26. BImSchV, Council Recommendation 1999/519/EC, ICNIRP 98) are met. In addition to that only few information is available about typical exposure levels and exposure distribution around the transmitters of the new UMTS system. In particular UMTS uses modulation and multiple access techniques, which are basically different from those of the GSM system. Insofar fundamental differences in the exposure measurement methods result.

For a measurement of RF exposure around UMTS base stations broadband, frequency selective (spectral) and code selective methods exist, which use completely different measurement principles. In the present study the three methods were investigated in detail.

For measurements used to prove that the *exposure limits of the German 26. BImSchV* are met, the following results can be drawn:

- Because of the large uncertainties concerning the extrapolation on the highest operational state of the station, broadband methods are less suited.
- The frequency selective measurement also exhibits relatively large uncertainties concerning the extrapolation on the highest operational state of the station. Especially the influence of traffic leads to an overestimation of the actual exposure. Taking these overestimation in mind, with broadband and frequency selective measurements it is possible to prove that exposure limits are met, but an exceeding of the limits can not be proven.
- The most reliable measurement results gives a code selective measurement. An extrapolation on the highest operational state of the station is possible easily with relatively small effort. Existing traffic does not restrict the extrapolation.

Concerning the maximum search in a measurement volume, the “sweeping method” has proven to be a very efficient method. A maximum search with the point raster method regularly leads to an underestimation if a practicable number of points is measured. Also a two-step procedure (prescan and precision measurement at the maximum point) may lead to a wrong assessment due to the influence of the measurement person.

As measurement antennas for the “sweeping method” logarithmic periodical antennas, dipole like antennas or isotropic probes can be used. Logarithmic periodical antennas show a very small influence by the measurement person compared to less directive antennas. Code selective equipment with a very low measurement rate should be swept very slowly through

the volume. If the equipment exhibits a “fast” and a “slow” operation mode, then the slow mode should be used because of its higher accuracy.

The reproducibility of the code selective measurement method using the “sweeping method” can be judged as good. The confidence limit as a measure for repeatability can be estimated to  $\pm 1,8$  dB.

The absolute sensitivity of code selective measurements is in the range of the minimal field strength necessary for UMTS coverage. If several UMTS signals are present, the relative dynamic of the equipment is reduced to typically 20 dB, i.e. signals at the same carrier frequency, which are more than approx. 20 dB below the strongest signal, may not be measured reliably.

For measurements of *space and time averages or time characteristics*, frequency selective methods with isotropic field probes have to be used. Here, it is of utmost importance to use the right spectrum analyzer settings; otherwise measurement errors of several dB are possible: For the measurements an RMS detector has to be used. Depending on the sampling rate of the analyzer, the sweep time must be large enough. The resolution bandwidth has to be as large as the signal bandwidth at least, although there exist alternatives with channel power measurement or bandwidth correction. In live measurements both alternatives tend to higher deviations to the reference measurement most of all in NLOS scenarios.

2D scan measurements for characterization of the small scale variations (fast fading) in the vicinity of a GSM 900 / UMTS station show, that different from our expectations (larger spectral bandwidth of UMTS) the fast fading variations were not reduced significantly at UMTS. Although this result may be influenced by the code selective algorithm, it must be concluded, that the “sweeping procedure” at code selective UMTS measurements must be performed as carefully as at GSM measurements.

Using the code selective measurement method with “sweeping method” and extrapolation on maximal operational state, the exposure distribution was measured in the vicinity of UMTS stations in 11 different scenarios. These scenarios represent the present available network structure and cell types of the UMTS network:

1. Low mounted station in a rural environment
2. High mounted station in a rural environment (i.e. mast installation)
3. Base station in a commercial area
4. Low mounted station in an urban environment
5. High mounted station in an urban environment
6. UHS-Station (Ultra High Site)
7. Station for indoor coverage

8. Station for coverage of a football stadium
9. Station for coverage of an exhibition hall
10. Station for coverage of a pico cell
11. Station on a roof of a building and exposure measurement inside the building

The measurements were performed at different distances, sight conditions, orientations and vertical angles to the base stations and can be transferred to similar scenarios within certain limits. The exposure at overall 163 measurement points can be characterized as follows:

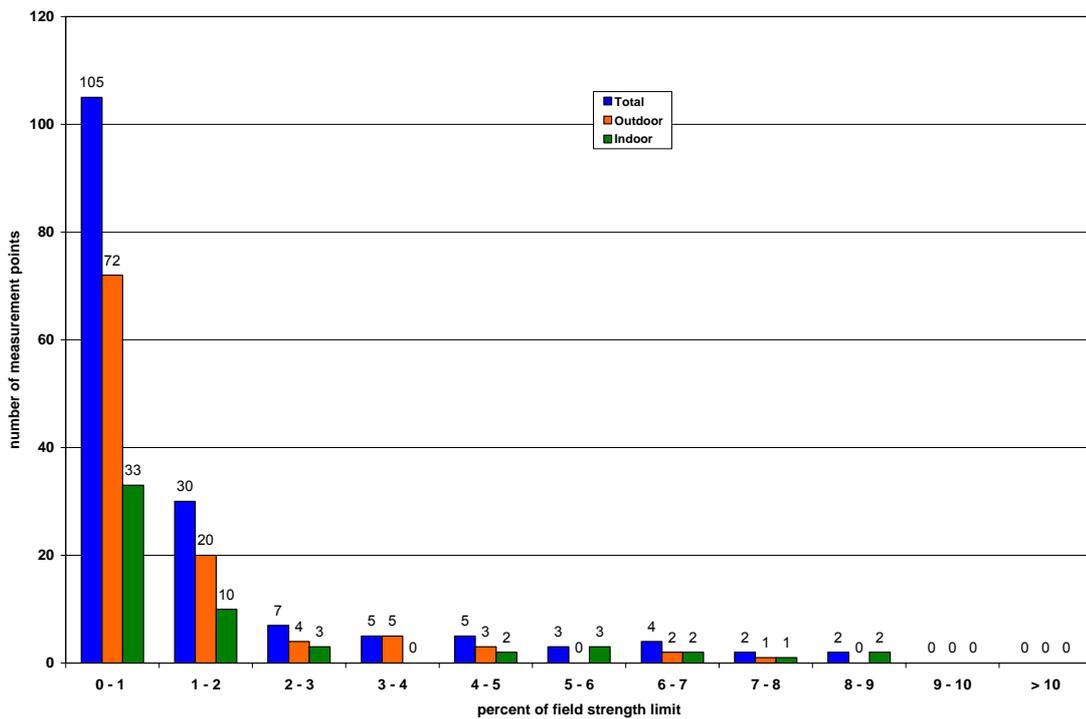


Fig. 1: Distribution of measurement results; electric field strength in percent of 26. BlmSchV limit (equivalent to ICNIRP 98 reference level)

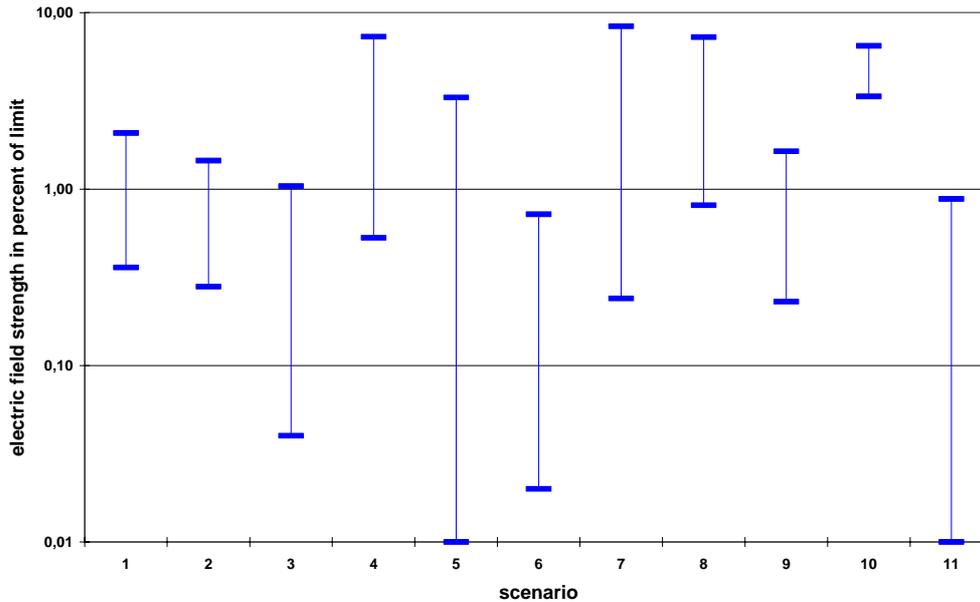


Fig. 2: Ranges of measured exposures at the 11 scenarios investigated (electric field strength in percent of 26. BlmSchV limit, equivalent to ICNIRP 98 reference level)

In each scenario as well as between the scenarios different exposures have been found. The majority of the measurement results is below 1 % of the field strength limit. The highest value was found to be 8,4 % (corresponding to 5.1 V/m and 69.3 mW/m<sup>2</sup>), the smallest value was about 0.01 % (corresponding to 0.006 V/m and 0.1 µW/m<sup>2</sup>). The exposure range over all scenarios is very large with about 60 dB. Investigations about a determination of time and space averaged values have shown “present” (i.e. time and space averaged) exposures to be a factor of 5 to 8 smaller than the exposures given above with regard to field strengths.

The figures above show clearly, that from the cell size and the corresponding transmit power no conclusions can be drawn on the resulting exposure. The highest exposures were measured in micro cell scenarios, which were operated with smaller transmit powers than typical roof or mast installations (indoor coverage, scenarios 7 and 8), but use antennas mounted under the ceiling, that result in small distances to persons. Similar effects can be observed in cells with low mounted antennas (scenarios 4 and 10).

Very high mounted antennas often result in low exposures. This can be observed at Ultra High Sites (scenario 6), which cover a large area with a larger transmit power, but gave the lowest exposures in the here presented project. With regard to an exposure minimization these site concepts can be rated positive. But one has to keep in mind that in this project no assessment of the UHS concept with regard to radio quality of service in comparison with conventional concept has been done.

Comparably low exposures have also been found inside a building with a roof mounted base station (scenario 11). This was probably due to the radiation pattern of the antenna and the strong attenuation of the concrete ceiling (the building was a multi-storey car park). A generalization of this finding to all kinds of buildings should not be done, because not all roofs

exhibit good attenuation characteristics (strongly dependent on building material and openings like roof windows or light shafts). Transferable seems to be the here found result to high-rise buildings with base station antennas on the roof for all floors except the highest one. On the highest floor very low exposures in the range of one percent of the field strength limit or less may be possible especially in the case of ceilings with high attenuation, but in some cases exposures up to five or ten percent of the limits can be found as well.

Concerning factors which influence the exposure it has been found, that the *distance* in the direct surrounding of the station (up to several 100 meters, depending on height and downtilt) in outdoor scenarios is not suited as a measure for quantifying the UMTS exposure. The reason is, that in this distance range the exposure is strongly influenced by the side lobes and nulls of the vertical antenna diagram and therefore exhibits an irregular character. Inside buildings with indoor coverage, however, a tendency of exposure decrease with distance can be observed, because the antenna diagram is less directive and only small differences in vertical angles between antenna and exposure point occur.

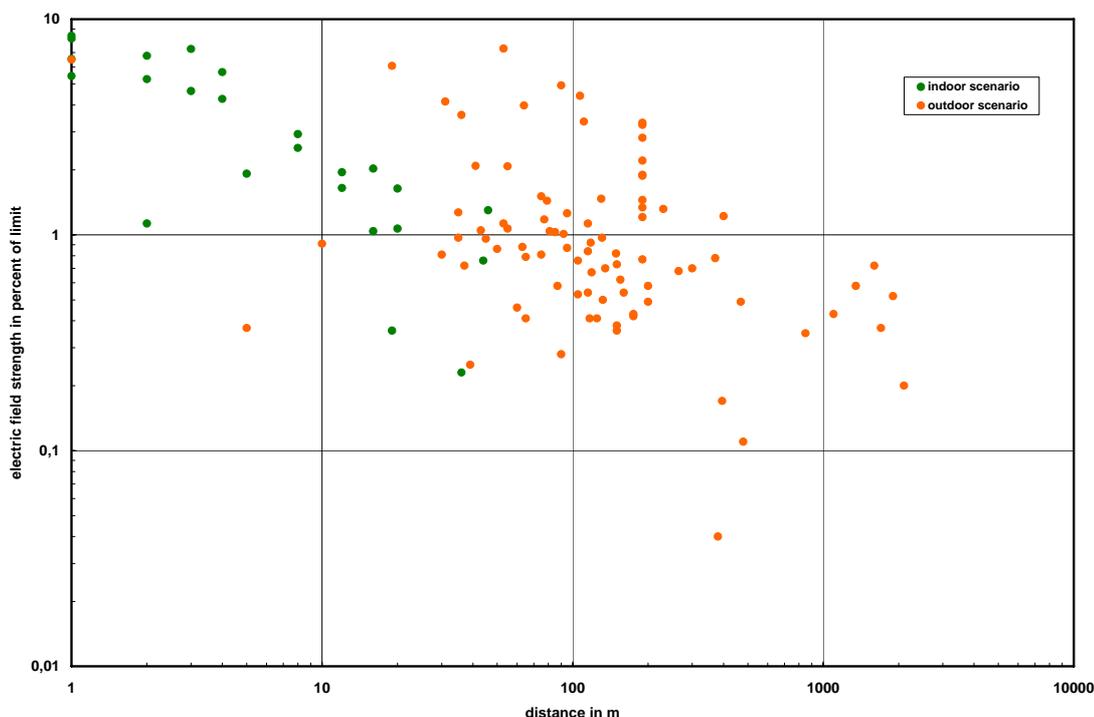


Fig. 3: Exposure as a function of distance, electric field strength in percent of 26. BlmSchV limit (equivalent to ICNIRP 98 reference level)

Also the sight conditions have a strong influence on exposure: Objects like buildings, but also trees and shrub, as well as walls in indoor areas between measurement point and base station have an attenuating influence, which can be found in the measurement results. The exposure reduction is dependent on the attenuation characteristics of the object, but also from the question, onto whether signals of the base station may reach the measurement point also over reflections on nearby buildings or walls.

It was not possible to bring out the influence of the vertical angle very clearly in this project, because the number and distance classification of the points was too small. By neglecting the scenario “pico cell”, however, it can be clearly seen, that in the here investigated distance range at points with small vertical angles (between  $-6^\circ$  and  $10^\circ$ ) on average (despite their higher distance) higher exposures were found than at points with larger vertical angles.

Parallel to the UMTS exposure also the GSM exposure was measured in 9 scenarios. For the measurements especially those sites were chosen, where additionally to an UMTS system also a GSM system was operated. This allows a comparison of UMTS and GSM exposure situation *at identical sites*. Overall a clear dominance of the GSM exposure has been found. Concerning the limit consumption, at 85 % of all measurement points the GSM exposures were higher than the UMTS exposures.

For answering the question about GSM or UMTS dominance at separate measurement points, several factors are important. These factors cover installed transmit power and orientation to the main lobe of the antenna. The much broader vertical main lobe of GSM 900 antennas leads to the fact, that in the vicinity of GSM 900 sites much more points are near to or even in the main lobe than at UMTS sites, resulting in an higher exposure. Also the exposure limits, which are lower for GSM 900 than for UMTS, often lead to a dominance of GSM 900 exposures, whereas GSM 1800 and UMTS behave similar.

Three long term measurements over at least 24 hours as well as four profiles over several minutes characterize the time behavior of the exposure. The largest variations with approx. 4 dB have been found due to moving persons in the vicinity of the measurement antenna. In contrast to this, the exposure variation to a base station in a city center, measured during games of the football world championship 2006 (because a strong traffic load was to be expected), was lower with approx. 2.1 dB. By provoking traffic with a 384 kbit/s data card an exposure increase of max. 3.4 dB was measured. Obviously daily variations on UMTS stations are less present on many sites in comparison to GSM stations. This may be due to the fact, that UMTS networks do not transport the same traffic like GSM networks. On the other side it has to be taken into account, that at GSM in the case of increasing traffic more carrier frequencies are switched abruptly, which results in more rapid exposure changes than with UMTS, where all traffic runs at the same frequency and the power changes are more moderate. So, the more regular time characteristic of UMTS may be explained. A changing cell size due to traffic variations (“cell breathing”), however, is of secondary importance for the exposure, because the changes in cell size are not caused by changes in the transmitted power (which would cause changes in exposure), but is caused by changes in the interference power level in the cell. The time variations in exposure around sites *without* traffic or moving persons is small with values of approx. 1.5 dB and underlines, that exposure due to signaling is nearly constant in time.

Concerning *calculation methods* commercially available software packages were used in this study to investigate, if they are suited for the determination of the real RF field distribution in the vicinity of UMTS base stations. The term “vicinity” covers the whole cell size excluding

the safety distance. In the comparison the software packages *Winprop*, *Wireless Insite* and *EFC-400* were included. In addition general investigations with the software *Quickplan* were performed; as „free space method“ also the software *FieldView* was included.

The calculated results were compared to corresponding measurements in a variety of configurations found in practice. In this context different UMTS cell types, indoor and outdoor scenarios, different sight conditions and variable distances to the transmitter were considered.

The modelling of the base transceiver station as a *multi-frequency source* is not recommended because of the higher complexity. From all considered programs only *Wireless Insite* provides the necessary information about magnitude and phase from all calculated frequencies at the receiver. All single results have to be overlaid by the user himself to get a coherent superposition. Overall the simulations show some homogenizing effect in the field distribution due to the large spectral bandwidth of 5 MHz in that way, that the field strength variations decrease in a considered volume in contrast to simulations with only one single frequency. Keeping in mind the high complexity of the calculation and the post processing effort, a multi-frequency simulation is regarded to be not necessary for cases, where the meeting of the exposure limits with maximum search in a given volume shall be checked, because the maximal exposure calculated with one frequency is always higher than the one with superposition of many frequencies.

Concerning *input parameters*, the exposure dependency on downtilt angle, frequency and influence of the installation vicinity is taken into account by a synthesized antenna radiation pattern. Due to the fact, that not only the direct vicinity of the UMTS base transceiver station has to be considered, but rather the whole coverage area, the terrain height has to be used in a calculation too. Furthermore methods have been developed to integrate a huge amount of buildings into the used software packages in a more or less automatically manner.

Overall it was shown, that in scenarios with direct sight to the base station all programs gave a good exposure forecast for the majority of the investigated areas by taking the measurement uncertainty into account. Nevertheless the following aspects have to be kept in mind in this context: If for example trees are in the line of sight which are neglected during the simulation, the programs overestimate the field strength compared to the measurement. The dimension can be quoted with 6-10 dB. Furthermore „floating“ objects like sky walks should not be neglected during the simulation, because underestimations of the exposure compared to the measurement may occur in that case. A comparison of the measurement results with the output of the calculation method „Free Space plus 3 dB“ has shown, that even this simple method fits well in scenarios with line of sight situations to the base station antenna.

In contrast to that the method „Free Space plus 3 dB“ does not fit in situations without direct sight to the base station. In the considered configurations underestimations of 10-60 dB of the measured exposure has been found. The consideration of buildings is therefore mandatory necessary. In this NLOS case it was shown, that the transmission through buildings plays a secondary role and therefore can be neglected in many simulations. Nevertheless one has to face an underestimation of the measured electrical field strength under certain circumstances (e.g. buildings with low attenuating materials). In calculations with the *EFC-400* software, building attenuations of 15 dB seems to fit well to forecast the exposure

situation. The comparison of simulated and measured NLOS scenarios has also shown, that the programs very often exhibit a good exposure forecast at high distances up to the end of the coverage area.

The large number of buildings in the whole coverage area of a UMTS cell requires a large effort in modeling each outer and inner wall to predict exposure inside buildings. Because this effort makes no sense in much cases it was investigated, if a typical “reduction factor” can be determined to represent the indoor exposure from calculated outdoor exposures. Here it was shown, that this reduction factor exhibits large variations. Because the variation strongly depends on sight conditions and used materials, the determination of a general reduction factor is connected with a large uncertainty.

## Zielsetzung des Forschungsvorhabens

Der flächendeckende Ausbau der Mobilfunknetze, der Aufbau der modernen breitbandigen Multimedianeetze (UMTS) sowie der Aufbau des terrestrischen digitalen Rundfunks führt insgesamt zu einer Erhöhung der elektromagnetischen Feldexposition der Bevölkerung.

Die ortsfesten Sendeanlagen dieser Funkdienste unterliegen dem Standortbescheinigungsverfahren der Bundesnetzagentur (BNetzA). Damit ist gewährleistet, dass in allgemein zugänglichen Aufenthaltsbereichen die Grenzwerte zum Schutz der Bevölkerung vor elektromagnetischen Feldern eingehalten werden [99/519/EG, 26.BImSchV]. Über diese Feststellung hinaus liegen aber zum Beispiel bezüglich der Sender des noch jungen Mobilfunksystems UMTS nur wenig belastbare Informationen über die Größe der elektromagnetischen Immissionen in allgemein zugänglichen Aufenthaltsbereichen vor.

Für den Strahlenschutz ist es deshalb dringlicher denn je, verlässliche Daten über die elektromagnetische Immission im Umfeld dieser Funksendeanlagen zu erhalten. Hierzu sind neben modellmäßigen Berechnungen vor allem Messungen erforderlich. Aufgrund der spezifischen Unterschiede der genannten Funkdienste sind unterschiedliche Untersuchungsverfahren erforderlich.

Ziel des Vorhabens ist es, Mess- und Berechnungsverfahren zu entwickeln bzw. bestehende Verfahren zu modifizieren, die geeignet sind, die reale Feldverteilung von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern in der Umgebung von UMTS-Sendeanlagen zu ermitteln und die tatsächliche Exposition von Personen im Umfeld dieser Anlagen abzuschätzen.

Hierbei wird der durch die BNetzA festgelegte Sicherheitsabstand ausdrücklich ausgeklammert, d.h. die Untersuchungen erstrecken sich auf den Entfernungsbereich jenseits des Sicherheitsabstandes bis zur Grenze des Versorgungsbereiches.

## Hintergrund des Forschungsvorhabens

Die wirkliche Exposition der Bevölkerung in der Umgebung von UMTS-Funksendeanlagen ist bislang nicht bekannt. Die im Rahmen der immissionsschutzrechtlichen Prüfung zugrunde gelegte Standortbescheinigung macht keine Aussagen hierzu, sondern bestätigt anhand einer sehr konservativen Abschätzung die Einhaltung der Grenzwerte. Die zahlreichen Einzelmessungen, z.B. durch die BNetzA, geben zwar erste Anhaltspunkte; konkrete Aussagen zur Exposition der Bevölkerung können aber auch hieraus nicht unmittelbar abgeleitet werden. Zudem sind die UMTS-Netze noch nicht flächendeckend ausgebaut und bestehende Sendeanlagen noch im Übergang zum operationellen Betrieb.

Bezüglich einer *Berechnung* sind die physikalischen Gesetzmäßigkeiten der Ausbreitung elektromagnetischer Felder unter Berücksichtigung von Reflexions-, Streu- und Dämpfungsmechanismen seit längerem bekannt und wissenschaftlich umfassend erforscht. Danach lässt sich die Feldverteilung im Raum mit Hilfe bekannter physikalischer Zusammenhänge vollständig beschreiben. In der Praxis scheitert eine analytische oder numerische Lösung aber an den komplexen, zum Teil nicht ausreichend erfassbaren Parametern. Aus diesem Grunde sind Berechnungen in der Praxis meist ungenau. Es müssen je nach Anwendungs-

fall Vereinfachungen gemacht werden, die den tatsächlichen Immissionswert überschätzen (z.B. zur Sicherstellung der Einhaltung der Grenzwerte auch unter ungünstigen Randbedingungen im Rahmen der BNetzA-Standortbescheinigung) oder unterschätzen (z.B. zur Sicherstellung einer Mindestfeldstärke in einem bestimmten Bereich im Rahmen der Funknetzplanung).

Die Hochfrequenzmesstechnik ist prinzipiell ebenfalls gut entwickelt. Dabei stehen zwar für den gesamten Frequenzbereich Verfahren zur Verfügung, die jedoch unspezifisch bezüglich des zu untersuchenden Funkdienstes formuliert und nicht für ein spezifisches Anwendungsgebiet, wie etwa die Bestimmung der Immissionen durch UMTS-Sendeanlagen in Innenräumen, angepasst sind. Außerdem sind die zur Verfügung stehenden Verfahren bei entsprechender Empfindlichkeit oft sehr aufwändig. Die erzielbaren Genauigkeiten hängen auch hier von zahlreichen Randbedingungen ab. Oftmals sind die Messverfahren primär für Laboranwendungen (z.B. EMV- oder Antennenmesstechnik in künstlichen, reflexionsarmen Umgebungen) oder Anwendungen unter definierten Randbedingungen entwickelt und kalibriert. Für die Anwendung im vorliegenden Zusammenhang sind zudem die spezifischen Signalparameter der Sendeanlagen zu berücksichtigen.

Ein weiterer Problempunkt bei der Erhebung realer Immissionen in der Praxis stellt die Feldverteilung selbst mit ihren erheblichen zeitlichen und räumlichen Schwankungen dar. Verlässliche und gut definierte Verfahren zur Erfassung der wahren Immissionen, denen die Bevölkerung in Deutschland ausgesetzt ist, existieren derzeit nur ansatzweise

## **Gliederung des Berichtes**

Vorliegender Abschlussbericht ist entsprechend der zeitlichen bzw. inhaltlichen Bearbeitung des Gesamtvorhabens in drei Berichtsteile gegliedert:

*Im ersten Berichtsteil „Literaturstudie“* werden im Sinne einer *Bestandsaufnahme* die im folgenden beschriebenen Punkte bearbeitet:

Zunächst wird die Übertragungstechnik des Mobilfunkstandards UMTS dargestellt. Besondere Berücksichtigung wird auf die spezifischen hochfrequenztechnischen Eigenschaften der UMTS-Netze (CDMA-Verfahren, Schwankung der Sendeleistung usw.) gelegt. Darauf basierend werden unterschiedliche Anforderungen an die Messtechnik zur Erfassung von UMTS-Signalen herausgearbeitet, die in den folgenden Projektteilen für die Entwicklung eines Messverfahrens für UMTS-Immissionen verwendet werden.

Anschließend erfolgt eine Übersicht über den aktuellen Stand der zur Zeit zur Verfügung stehenden Mess- und Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Immission in der Umgebung von UMTS-Sendeanlagen. Es wird insbesondere diskutiert, in wieweit derzeit verfügbare Verfahren für eine Erhebung der tatsächlich vorliegenden Immissionen geeignet sind. Ausgangspunkt der Diskussion ist die Definition der Anforderungen, die sich aus den spezifischen Betriebsbedingungen der Sendeanlagen ergeben.

Im Rahmen einer Literaturstudie wird daran anschließend auf abgeschlossene und noch laufende Projekte (national und international) zum Thema des hier vorliegenden Forschungsprojektes eingegangen.

*Im zweiten Berichtsteil „Entwicklung geeigneter Mess- und Berechnungsverfahren“* werden sowohl Mess-, als auch Berechnungsverfahren entwickelt bzw. bestehende Verfahren modifiziert, die im dritten Berichtsteil 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 Netzregelungsmechanismen. In einem Ausblick wird jedoch auch die Übertragbarkeit hinsichtlich neuer Entwicklungen diskutiert.

*Im dritten Berichtsteil „Analyse der Immissionsverteilung“* wird die Immissionsverteilung in der Umgebung von UMTS-Mobilfunkanlagen eingehend analysiert. Dazu werden die Ergebnisse umfangreicher Messungen an insgesamt 11 unterschiedlichen, für UMTS-Netze typischen Zellen vorgestellt. Die Auswahl der Messpunkte erfolgt dabei nach systematischen Gesichtspunkten, d.h. sie weisen verschiedene Abstände, Orientierungen, Höhenunterschiede, Sichtverbindungen usw. zur Sendeanlage auf. Aus den Ergebnissen wird die Spannweite der praktisch auftretenden Immissionen bestimmt.

Anschließend wird anhand der Messergebnisse der Einfluss verschiedener immissionsbestimmender Faktoren auf die Größe der Exposition untersucht.

Parallel zu den UMTS-Immissionen werden in 9 der 11 Szenarien auch GSM-Immissionen an den ausgewählten Messpunkten mit erfasst. Für die Messungen wurden speziell solche Anlagen ausgewählt, bei denen neben einem UMTS-System auch ein GSM-System instal-

liert war. Dadurch ist es möglich, die UMTS-Expositionssituation mit der GSM-Expositionssituation *an identischen Anlagen* zu vergleichen.

Weitere Messungen charakterisieren sowohl den zeitlichen Verlauf der Immission über einen Zeitraum von 24 Stunden, als auch die kleinskalige örtliche Schwankungsbreite in Innenräumen. Hierbei wird überprüft, ob die theoretisch zu erwartende Abschwächung des „fast fadings“ durch den Breitbandcharakter von UMTS-Signalen bei einer Messung mit der Schwenkmethode zu einer Vereinfachung des Schwenkvorganges führt. Parallel erfolgt der Vergleich mit GSM 900-Immissionen am identischen Standort.

Abschließend erfolgt eine Anwendung der im zweiten Berichtsteil vorgestellten Berechnungsverfahren auf ausgewählte Teile der messtechnisch untersuchten Szenarien. Mittels eines Vergleiches mit den Messergebnissen wird die Eignung der Berechnungsprogramme auf Problemstellungen der vorliegenden Art bewertet.

# **I. Literaturstudie**

**Bearbeitungszeitraum**  
**1. Dezember 2004 – 28. Februar 2005**

# Inhaltsverzeichnis

<b>I.1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>5</b>
<b>I.2</b>	<b>Übertragungstechnik des UMTS-Mobilfunkstandards.....</b>	<b>6</b>
<b>I.2.1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>6</b>
<b>I.2.2</b>	<b>Wichtige Eigenschaften der UMTS-Luftschnittstelle .....</b>	<b>6</b>
<b>I.2.3</b>	<b>Spektrum eines UMTS-Signals .....</b>	<b>10</b>
<b>I.2.4</b>	<b>Wichtige Signalisierungskanäle bei UMTS.....</b>	<b>11</b>
<b>I.2.5</b>	<b>UMTS-Signal im Zeitbereich.....</b>	<b>12</b>
<b>I.2.6</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>14</b>
<b>I.3</b>	<b>Berechnungsverfahren für UMTS .....</b>	<b>15</b>
<b>I.3.1</b>	<b>Grundlagen der Funkwellenausbreitung .....</b>	<b>15</b>
<i>I.3.1.1</i>	<i>Ausbreitungserscheinungen.....</i>	<i>15</i>
<i>I.3.1.2</i>	<i>Mehrwegeausbreitung .....</i>	<i>16</i>
<i>I.3.1.3</i>	<i>Wellenausbreitung innerhalb von Gebäuden .....</i>	<i>17</i>
<b>I.3.2</b>	<b>Anforderungen an Berechnungsverfahren.....</b>	<b>17</b>
<b>I.3.3</b>	<b>Wellenausbreitungsmodelle .....</b>	<b>18</b>
<i>I.3.3.1</i>	<i>Empirische und semi-empirische Modelle.....</i>	<i>20</i>
<i>I.3.3.1.1</i>	<i>COST-Hata-Modell [COS 99] .....</i>	<i>21</i>
<i>I.3.3.1.2</i>	<i>COST-Walfisch-Ikegami-Modell .....</i>	<i>22</i>
<i>I.3.3.2</i>	<i>Analytische Modelle.....</i>	<i>24</i>
<i>I.3.3.2.1</i>	<i>Strahlenoptische Ausbreitungsmodelle .....</i>	<i>24</i>
<i>I.3.3.2.2</i>	<i>Feldtheoretische Modellierung .....</i>	<i>26</i>
<b>I.3.4</b>	<b>Beurteilung der Eignung der verschiedenen Verfahren.....</b>	<b>27</b>
<i>I.3.4.1</i>	<i>Zu erwartende Genauigkeiten .....</i>	<i>27</i>
<i>I.3.4.2</i>	<i>Voraussetzungen für die Anwendung analytischer Modelle.....</i>	<i>28</i>
<i>I.3.4.3</i>	<i>Grenzen der analytischen Modellierung .....</i>	<i>28</i>
<i>I.3.4.4</i>	<i>Multifrequenzielle Nachbildung der Feldquelle.....</i>	<i>29</i>
<b>I.3.5</b>	<b>Erfahrungen aus dem vorangegangenen GSM-Projekt.....</b>	<b>30</b>
<b>I.3.6</b>	<b>Fazit.....</b>	<b>31</b>
<b>I.4</b>	<b>Messverfahren für UMTS .....</b>	<b>32</b>
<b>I.4.1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>32</b>
<i>I.4.1.1</i>	<i>Grundsätzliche Einteilung von Messaufgabenstellungen.....</i>	<i>32</i>

<b>I.4.1.2</b>	<b><i>Vorgehensweise bei der Untersuchung der Messverfahren</i></b> .....	<b>33</b>
<b>I.4.2</b>	<b>Anforderungen an Messverfahren</b> .....	<b>33</b>
<b>I.4.3</b>	<b>Überblick über die Normungssituation</b> .....	<b>35</b>
<b>I.4.3.1</b>	<b><i>Einleitung</i></b> .....	<b>35</b>
<b>I.4.3.2</b>	<b><i>Normungssituation in Deutschland</i></b> .....	<b>36</b>
<b>I.4.3.3</b>	<b><i>Normungssituation in Europa</i></b> .....	<b>39</b>
I.4.3.3.1	Gesamteuropäische Normung .....	39
I.4.3.3.2	Normung in der Schweiz .....	42
<b>I.4.3.4</b>	<b><i>Normungssituation in den USA</i></b> .....	<b>44</b>
<b>I.4.4</b>	<b>Beschreibung der vorhandenen Messverfahren</b> .....	<b>44</b>
<b>I.4.4.1</b>	<b><i>Grundsätzliche Messverfahren</i></b> .....	<b>44</b>
<b>I.4.4.2</b>	<b><i>Auswahl der Messpunkte</i></b> .....	<b>46</b>
<b>I.4.4.3</b>	<b><i>Messgeräte und Hilfsmittel</i></b> .....	<b>47</b>
I.4.4.3.1	Breitbandiges Messverfahren .....	47
I.4.4.3.2	Frequenzselektives Messverfahren .....	48
I.4.4.3.3	Codeselektives Messverfahren .....	49
I.4.4.3.4	Kalibrierung der Messgeräte .....	51
I.4.4.3.5	Nahfeld-Fernfeld Problematik .....	51
<b>I.4.4.4</b>	<b><i>Wahl der Messparameter</i></b> .....	<b>52</b>
<b>I.4.4.5</b>	<b><i>Messdurchführung</i></b> .....	<b>53</b>
<b>I.4.4.6</b>	<b><i>Auswertung</i></b> .....	<b>55</b>
I.4.4.6.1	Umrechnung der Messwerte auf Leistungsflussdichten bzw. Feldstärken .....	55
I.4.4.6.2	Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung .....	56
<b>I.4.4.7</b>	<b><i>Dokumentation</i></b> .....	<b>57</b>
<b>I.4.5</b>	<b>Eignung der verschiedenen Messverfahren</b> .....	<b>58</b>
<b>I.5</b>	<b>Literaturstudie zu ähnlichen Projekten</b> .....	<b>61</b>
<b>I.5.1</b>	<b>Projekte im Ausland</b> .....	<b>61</b>
<b>I.5.1.1</b>	<b><i>Projekt BASEXPO</i></b> .....	<b>61</b>
<b>I.5.1.2</b>	<b><i>Untersuchungen der Fachhochschule Südschweiz</i></b> .....	<b>62</b>
<b>I.5.1.3</b>	<b><i>Expositionsmessungen in der Schweiz</i></b> .....	<b>63</b>
<b>I.5.1.4</b>	<b><i>Immissionskataster Hochfrequenzstrahlung in Basel</i></b> .....	<b>64</b>
<b>I.5.2</b>	<b>Projekte in Deutschland</b> .....	<b>65</b>
<b>I.5.2.1</b>	<b><i>Feldstärkemonitoring der BNetzA (EMF-Datenbank)</i></b> .....	<b>65</b>
<b>I.5.2.2</b>	<b><i>EMF-Messkampagne des IZMF in Hessen</i></b> .....	<b>65</b>
<b>I.5.2.3</b>	<b><i>EMF-Monitoring Bayern</i></b> .....	<b>66</b>
<b>I.5.2.4</b>	<b><i>EMF-Messprojekt Berlin</i></b> .....	<b>67</b>

<b>I.5.2.5</b>	<b><i>Immissionsdatenbank Bayern</i></b> .....	<b>68</b>
<b>I.5.2.6</b>	<b><i>UMTS-Feldmessungen in Nordrhein-Westfalen</i></b> .....	<b>69</b>
<b>I.5.3</b>	<b>Einzelveröffentlichungen zur Messtechnik von UMTS-Signalen</b> ....	<b>69</b>
<b>I.5.4</b>	<b>Fazit</b> .....	<b>70</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>71</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>78</b>
	<b>Verzeichnis häufig verwendeter Symbole</b> .....	<b>80</b>

## I.1 Einleitung

Im ersten Berichtsteil des Untersuchungsvorhabens werden im Sinne einer *Bestandsaufnahme* die im folgenden beschriebenen Punkte bearbeitet:

Zunächst wird die Übertragungstechnik des Mobilfunkstandards UMTS dargestellt. Besondere Berücksichtigung wird auf die spezifischen hochfrequenztechnischen Eigenschaften der UMTS-Netze (CDMA-Verfahren, Schwankung der Sendeleistung usw.) gelegt. Darauf basierend werden unterschiedliche Anforderungen an die Messtechnik zur Erfassung von UMTS-Signalen herausgearbeitet, die in den folgenden Projektteilen für die Entwicklung eines Messverfahrens für UMTS-Immissionen verwendet werden.

Anschließend erfolgt eine Übersicht über den aktuellen Stand der zur Zeit zur Verfügung stehenden Mess- und Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Immission in der Umgebung von UMTS-Sendeanlagen. Es wird insbesondere diskutiert, in wieweit derzeit verfügbare Verfahren für eine Erhebung der tatsächlich vorliegenden Immissionen geeignet sind. Ausgangspunkt der Diskussion ist die Definition der Anforderungen, die sich aus den spezifischen Betriebsbedingungen der Sendeanlagen ergeben.

Im Rahmen einer Literaturstudie wird daran anschließend auf abgeschlossene und noch laufende Projekte (national und international) zum Thema des hier vorliegenden Forschungsprojektes eingegangen.

## I.2 Übertragungstechnik des UMTS-Mobilfunkstandards

### I.2.1 Einleitung

Derzeit entstehen in den meisten europäischen Ländern die Netze der dritten Mobilfunkgeneration (UMTS). Mobilfunknetze der dritten Generation verwenden Modulations- bzw. Vielfachzugriffsverfahren, die sich grundsätzlich von den bei GSM üblichen Prinzipien unterscheiden. Dadurch ergeben sich wesentliche Unterschiede bei der Messtechnik derartiger Signale, was sich erheblich auf die notwendigen Eigenschaften der einsetzbaren Messgeräte auswirkt. Im folgenden werden die beim UMTS-Mobilfunk verwendeten Übertragungsverfahren kurz vorgestellt und möglichst allgemein verständlich erläutert. Dabei wird insbesondere auf die Eigenschaften der hochfrequenten Sendesignale im Downlink eingegangen, so weit dies für die messtechnische Ermittlung der Exposition bei UMTS-Basisstationen von Bedeutung ist. Als allgemeine Einführungen in die UMTS-Systemtechnik sei auf [WAL 01] und [LES 02] verwiesen.

### I.2.2 Wichtige Eigenschaften der UMTS-Luftschnittstelle

Folgende Beschreibung der UMTS-Luftschnittstelle beschränkt sich auf wesentliche, für die Expositionsmesstechnik bei Basisstationen relevante Punkte. Es werden dabei einige, im Detail deutlich komplexere Zusammenhänge stark vereinfacht dargestellt, um den Umfang dieses Kapitels in einem vernünftigen Rahmen zu halten. Eine ausführliche Darstellung der UMTS-Luftschnittstelle findet sich beispielsweise in [KRÜ 03].

UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) ermöglicht wesentlich höhere Datenraten als die bisher angewendete GSM-Technik. Derzeit bieten die Netzbetreiber Übertragungsraten von bis zu 384 kbit/s an, höhere Datenraten bis zu 2 Mbit/s sind möglich. Derzeit werden allerdings bereits Weiterentwicklungen der Übertragungstechniken (z.B. HSDPA mit einer Datenrate im Downlink von bis zu 14,4 Mbit/s) erprobt.

Der UMTS-Standard kennt zwei Verfahren zur Trennung von Up- und Downlink:

- Im **FDD-Mode** (FDD = Frequency Division Duplex) werden die Signale für Up- und Downlink auf unterschiedlichen Trägerfrequenzen gesendet, die einen festen Duplexabstand von 190 MHz besitzen.
- Im **TDD-Mode** (TDD = Time Division Duplex) wird Up- und Downlink auf der gleichen Trägerfrequenz abgewickelt. Die Signale für Up- und Downlink werden dazu zeitlich getrennt.

Unter „Uplink“ versteht man die Kommunikationsverbindung vom Teilnehmer zur Basisstation, der umgekehrte Weg wird als „Downlink“ bezeichnet.

Die momentan im Aufbau befindlichen Netze arbeiten im FDD-Mode, daher wird im folgenden ausschließlich die Messung an Stationen, die im FDD-Mode senden, behandelt. Zu einem späteren Zeitpunkt sind auch Übertragungen im TDD-Mode vorgesehen, wobei dies insbesondere für Bereiche interessant ist, an denen ein besonders hohes Datenübertragungsaufkommen erwartet wird. Der TDD-Mode unterstützt speziell schnelle, asymmetrische Datendienste, wie beispielsweise das Surfen im Internet oder den Download großer Daten-

mengen. Jedoch ist dieser Mode für Dienste im Vollduplexbetrieb ungeeignet, er erlaubt z.B. kein „normales“ Telefongespräch. Somit ist die Inbetriebnahme von TDD-Systemen als Erweiterung der UMTS-Luftschnittstellentechnologie erst nach erfolgter Einführung des FDD sinnvoll [KRÜ 03]. Im II. Teilbericht, Abschnitt II.4.14.1 wird jedoch zumindest kurz diskutiert, in wieweit Messverfahren, die für den FDD-Mode entwickelt wurden, auch für den TDD-Mode geeignet sind.

Die Kommunikation beim UMTS-Mobilfunk wird auf Frequenzen im Bereich zwischen 1.910 und 2.170 MHz durchgeführt. Tabelle I.2.1 zeigt die den deutschen Netzbetreibern von der BNetzA zugeteilten Frequenzbänder. Man erkennt, dass jeder Betreiber im FDD-Mode ein Band von 10 MHz zur Verfügung hat. Da ein UMTS-Kanal eine Breite von 5 MHz besitzt, verfügt jeder Betreiber somit über zwei UMTS-Kanäle. Ein UMTS-Netz lässt sich prinzipiell bereits mit nur einem FDD-Kanal je Betreiber aufbauen, was zunächst auch so realisiert wird. In der Zukunft wird dann der zweite Kanal zur Kapazitätssteigerung des Netzes ergänzend eingesetzt, was in Ballungsräumen heute bereits teilweise vorgenommen wird.

Betreiber	FDD-Mode	TDD-Mode
Vodafone	UL: 1.920,3 - 1.930,2 MHz DL: 2.110,3 - 2.120,2 MHz	1.915,1 - 1.920,1 MHz
E-Plus	UL: 1.940,1 - 1.950,0 MHz DL: 2.130,1 - 2.140,0 MHz	2.019,7 - 2.024,7 MHz
O <sub>2</sub>	UL: 1.959,9 - 1.969,8 MHz DL: 2.149,9 - 2.159,8 MHz	-
T-Mobile	UL: 1.969,8 - 1.979,7 MHz DL: 2.159,8 - 2.169,7 MHz	1.910,1 - 1.915,1 MHz

Tab. I.2.1: UMTS-Frequenzbänder in Deutschland (UL: Uplink; DL: Downlink)

Die Firmen QUAM und MobilCom, die ebenfalls UMTS-Lizenzen für Deutschland erworben hatten, haben inzwischen aus Kostengründen den Netzaufbau eingestellt.

Im Unterschied zu GSM, bei dem die Signale der einzelnen Basisstationen aufgrund unterschiedlicher Trägerfrequenzen unterscheidbar sind, wird bei UMTS mit CDMA ein völlig anderes Verfahren der Unterscheidung von Signalen einzelner Basisstationen angewendet, das vereinfacht dargestellt folgendermaßen arbeitet:

Im Minimalausbau senden alle Antennen eines Betreibers ein Signal mit der gleichen Trägerfrequenz, es handelt sich also bei UMTS um ein „Gleichwellennetz“. Allerdings wird der Bitstrom, der von einer bestimmten Antenne abgestrahlt werden soll, vor dem HF-Modulator mit einem individuellen „Verwürfelungscode“ („Scramblingcode“) verwürfelt, so dass ein Endgerät (Telefon) in der Lage ist, im Empfangssignal die Anteile der unterschiedlichen Stationen zu unterscheiden. Bei der im Moment angewendeten Netzstruktur stehen dafür insgesamt 512 so genannte „Primary Scrambling Codes“ zur Verfügung.

Ähnlich wie bei GSM werden an einem Standort je Betreiber meist drei Sektorantennen aufgebaut, die jeweils einen etwa 120° breiten Sektor versorgen. Jede Antenne repräsentiert üblicherweise eine Basisstation (bei UMTS als „NODE-B“ bezeichnet).

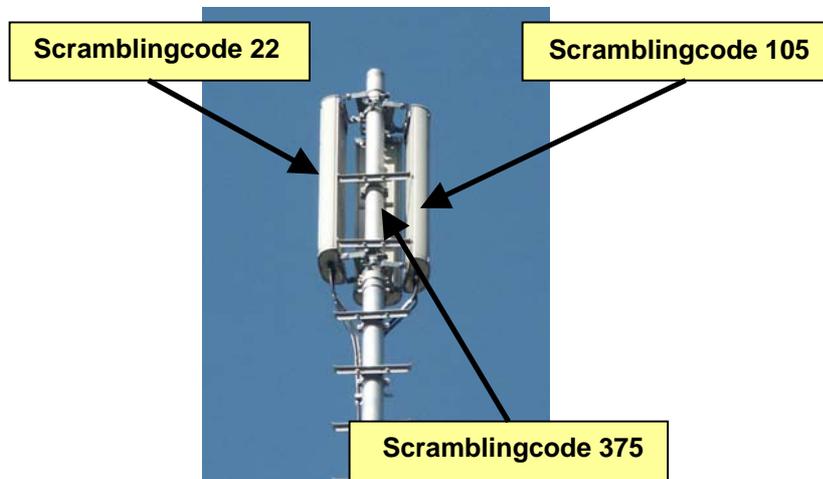


Bild I.2.1: Primary-Scrambling-Codes zur Zellenkennzeichnung (Beispiel)

Das Signal einer Antenne beinhaltet eine Vielzahl von „Teilsignalen“ (Physikalische Kanäle), die zum einen der Datenübertragung zu den einzelnen Endgeräten dienen („Daten-“ oder „Verkehrskanäle“), andererseits auch Signalisierungs- und Synchronisationsaufgaben erfüllen („Signalisierungskanäle“). Damit diese einzelnen Kanäle ebenfalls vom Endgerät unterschieden werden können, sind sie jeweils mit einem individuellen „Spreizcode“ verwürfelt. In Bild I.2.2 ist das Prinzip der Kanalbildung bei UMTS stark vereinfacht in einem Blockdiagramm dargestellt, so dass daraus die für die Expositionsmesstechnik wichtigen Zusammenhänge ersichtlich werden.

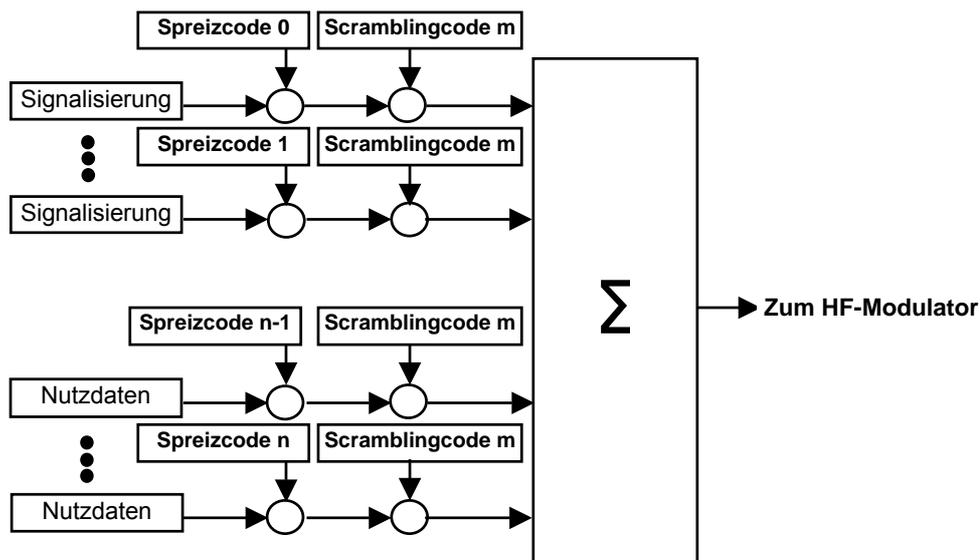


Bild I.2.2: Prinzip der Kanalbildung bei einer UMTS-Basisstation

Die Spreizcodes trennen also die verschiedenen physikalischen Kanäle einer Station (Zelle), während der Verwürfelungscode (Scramblingcode) der Identifikation der jeweiligen Station dient.

Einige der Signalisierungskanäle einer Station werden permanent mit definierter Sendeleistung abgegeben, während manche Signalisierungskanäle und insbesondere die Datenkanäle nur nach Bedarf (Verkehrsaufkommen) aktiviert und, zum Zweck der Sicherstellung einer optimalen Übertragungsqualität, in ihrer Leistung permanent verändert werden.

An dieser Stelle soll noch kurz auf einen Begriff, der sich bei UMTS-Netzen eingebürgert hat, eingegangen und dieser im Zusammenhang mit der Bevölkerungsexposition näher erläutert werden, nämlich die „Zellatmung“: Darunter versteht man, dass, im Gegensatz zu GSM-Netzen, bei UMTS die Größe einer Versorgungszelle nicht konstant ist, sondern je nach momentaner Auslastung der Zelle bzw. der von einem Endgerät angeforderten Datenrate schwankt. Grund dafür ist die Tatsache, dass bei UMTS alle Verbindungen auf der gleichen Frequenz abgewickelt werden, so dass jeder Teilnehmer die anderen momentan aktiven Verbindungen als Störsignal wahrnimmt. Nimmt also die Teilnehmerzahl innerhalb einer Zelle zu, erhöht sich die Gesamtstörleistung, was bei konstanter Nutzleistung zu einem geringeren Störabstand und damit zu einer Abnahme der Maximalreichweite der Verbindung führt, die Versorgungszelle schrumpft also mit zunehmender Auslastung. Das gleiche passiert, wenn ein Endgerät einen Dienst mit höherer Datenrate (z.B. 384 kbit/s) statt eines einfachen Telefongesprächs anfordert. Für die störungsfreie Übertragung von höherratigen Verbindungen ist immer ein größerer Störabstand notwendig, als bei niederratigen Verbindungen, so dass auch in diesem Fall eine Verkleinerung des Zellradius zu beobachten ist. Festzuhalten ist also, dass die Veränderung der Zellgröße nicht durch unterschiedliche Sendeleistungen und damit einer Veränderung der Exposition der Bevölkerung in der Umgebung eines Standortes verursacht wird, sondern durch Variationen der Störleistung innerhalb einer Zelle. Der Effekt der "Zellatmung" ist also für die Analyse der Exposition der Bevölkerung in der Umgebung von UMTS-Basisstationen von untergeordneter Bedeutung.

### I.2.3 Spektrum eines UMTS-Signals

Misst man das Signal einer UMTS-Basisstation mit einem Spektrumanalysator, ergibt sich ein Spektrum, das dem von bandbegrenztem weißen Rauschen sehr ähnelt (Bild I.2.3). Die 10 dB-Bandbreite beträgt hier etwa 4,3 MHz, in der Literatur werden meist 4,6 MHz angegeben [KRÜ 03].

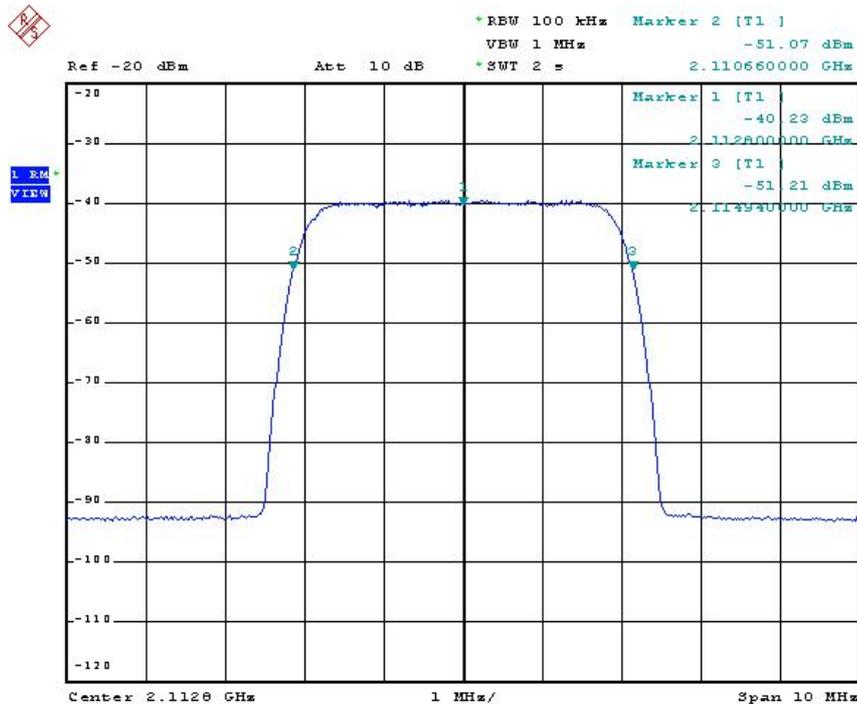


Bild I.2.3: Spektrum eines UMTS-Signals

Die Breite des 5-MHz-Kanals wird also nicht vollständig belegt, um einen gewissen „Sicherheitsabstand“ zu den benachbarten UMTS-Kanälen zu gewährleisten. Der Pegel des Signals schwankt je nach momentaner Auslastung der Station.

Da die abgegebene Leistung bei UMTS-Basisstationen hauptsächlich von der momentan zu übertragenden Datenmenge und der Verbindungsqualität zu den Teilnehmern abhängt, ist der spektral gemessene Leistungswert zeitabhängig. Die minimale Sendeleistung ergibt sich aus den von der Station permanent emittierten Signalisierungssignalen. Derzeit werden die Anlagen so eingestellt, dass etwa 15 bis 20 Prozent der maximalen Sendeleistung von den permanent gesendeten Signalisierungssignalen benötigt wird. Der Rest der Leistung steht zum größten Teil den Datenkanälen zur Verfügung. In der Praxis wird allerdings vermieden, dass eine Station beispielsweise bei hohem Datenverkehr sich zu nahe ihrer maximalen Leistung nähert, meist wird ab etwa 50 bis 75 Prozent der Maximalleistung der weitere Anstieg durch softwaregesteuerte Regelung verhindert. Aus Sichtweise des Strahlenschutzes ist dieser Regelmechanismus allerdings wenig relevant, da dieser auch deaktiviert sein kann, so dass Anlagen dann doch mit ihrer maximalen Leistung senden.

Eine spektrale Messung liefert also immer nur einen Augenblickswert der Exposition, da meist nicht bekannt ist, welchen Grad der Auslastung die verursachenden Stationen gerade besitzen.

## I.2.4 Wichtige Signalisierungskanäle bei UMTS

In Tabelle I.2.2 sind alle UMTS-Signalisierungskanäle aufgelistet, die permanent gesendet werden. Beispielhaft sind Leistungen angeführt, so wie sie derzeit von den Betreibern typisch verwendet werden.

Abkürzung	Name	Leistung (typ. Beispiel)	Besonderheit
P-CPICH	Common pilot channel	33 dBm	permanent on
P-CCPCH	Primary common control physical channel	28 dBm	600 µs on, 67 µs off
P-SCH	Primary synchronization channel	30 dBm	67 µs on, 600 µs off
S-SCH	Secondary synchronization channel	30 dBm	67 µs on, 600 µs off

Tab. I.2.2: 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 2/3 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. 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 Tabelle I.2.2 angegebenen Kanäle gebildet werden.

Der P-SCH ermöglicht einem neu eingeschalteten Teilnehmerendgerät die genaue Zeitschlitzsynchronisation, mit Hilfe des S-SCH wird anschließend eine Synchronisation auf die darüber liegende Ebene eines Funkrahmens (der aus 15 Zeitschlitzes besteht und somit 10 ms dauert) durchgeführt. Nun ist es dem Endgerät möglich, den individuellen Scramblingcode der Basisstation aus dem P-CPICH auszulesen. Das Lesen des P-CPICH ist für das Endgerät unproblematisch, da dieser von allen Stationen mit dem gleichen Spreizcode verwürfelt wird (Spreizcode Nr. 0).

Die notwendige Information zum Netzbetreiber und Zellenstandort, sowie natürlich weitere wesentliche Parameter werden als Systeminformationen über den P-CCPCH ausgesendet, welcher nach Auslesen des Verwürfelungscodes ebenfalls leicht vom Endgerät gelesen werden kann, denn auch der P-CCPCH wird von allen Stationen mit einem festen Spreizcode verwürfelt (Spreizcode Nr. 1).

Dem P-CPICH kommt in einem UMTS-Netz große Bedeutung zu. Er dient nicht nur als Träger der Scramblingcodeinformation (quasi die Individualkennung jeder Node B), sondern er ist auch verantwortlich für die Definition des Zellradius. Die Endgeräte messen permanent

die Pegel der stärksten empfangbaren CPICH-Signale, um beispielsweise aus diesen Messresultaten bei Bedarf einen Handover zu einer Nachbarstation einzuleiten. Verringert der Betreiber bei einer Station die Leistung des P-CPICH, so schrumpft ihr Versorgungsradius, da nun aufgrund der schwächeren Empfangsleistung am Endgerät ein Handover zur Nachbarzelle bereits bei geringeren Entfernungen zur Station eingeleitet wird, als vorher. Derzeit sind die P-CPICH-Leistungen der einzelnen Stationen noch weitgehend gleich eingestellt (in der Regel auf 10 Prozent der maximalen Sendeleistung). Allerdings wird sich dieser Zustand im Lauf der Zeit durch Netzoptimierungen verändern, später muss mit individuell unterschiedlichen Leistungen der einzelnen P-CPICH-Signale gerechnet werden. Da die aktuelle Systemarchitektur einen „sekundären CPICH“ (S-CPICH) nicht vorsieht, wird der P-CPICH manchmal auch einfach nur „CPICH“ genannt. Ein S-CPICH wird notwendig, wenn in der Zukunft Teilbereiche einer Funkzelle mit „intelligenten Antennen“ zusätzlich ausgeleuchtet werden sollen. Diese Funktionalität sieht der UMTS-Standard als Option bereits vor.

Neben diesen permanent abgestrahlten Signalisierungskanälen existieren noch einige Signalisierungssignale, die nur zeitweise bei Bedarf vorhanden sind. Beispielsweise dient der S-CCPCH als Paging-Signal der Einleitung einer Verbindung zu einem Teilnehmer bei einem ankommenden Ruf über die Luftschnittstelle.

### **I.2.5 UMTS-Signal im Zeitbereich**

Zusätzlich zur spektralen Darstellung ist es allerdings auch notwendig, das UMTS-Signal im Zeitbereich zu analysieren, da sich hier ebenfalls einige Besonderheiten ergeben, die von großer Wichtigkeit bei der messtechnischen Erfassung derartiger Signale sind.

Stellt man ein UMTS-Signal im Zeitbereich dar (beispielsweise mit einem schnellen Oszilloskop oder einem Spektrumanalysator im „Zero-Span-Betrieb“), so ergibt sich ein rauschähnlicher Signalverlauf (Bild I.2.4).

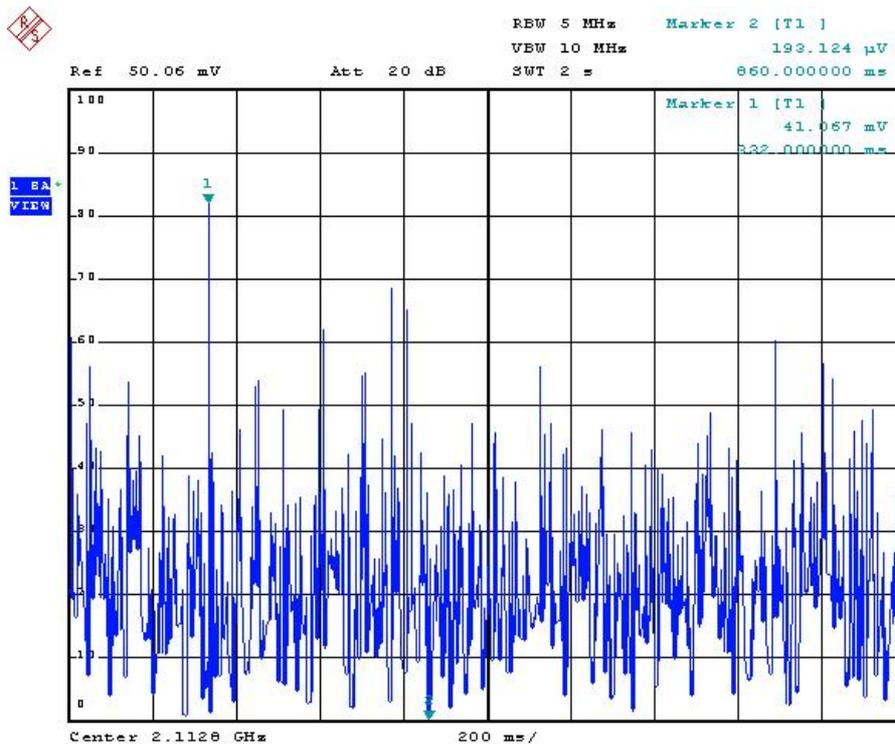


Bild I.2.4:      Prinzipieller Zeitverlauf eines UMTS-Signals (Momentanwert der Signalamplitude)

Typisch für rauschähnliche Signale ist der große Unterschied zwischen kurzfristig auftretenden Maxima  $U_{\text{Peak}}$  und dem Effektivwert  $U_{\text{RMS}}$  des Signals. Beschrieben wird dieser Unterschied durch den so genannten „Crestfaktor“  $C$ , der meist in dB angegeben wird und sich nach folgender Formel errechnet:

$$C = 20 \cdot \log (U_{\text{Peak}}/U_{\text{RMS}}) \quad (\text{I.2.1})$$

Zu hohe Crestfaktoren können die Senderendstufen allerdings nicht verarbeiten, denn dazu müssten sie für Spitzenleistungen ausgelegt werden, die mehr als das 10-fache der Durchschnittsleistung des Senders betragen. In der Praxis versucht man daher durch gezielte Auswahl der Spreizcodes und einen „Timing-offset“ bei den einzelnen Datenkanälen sowie durch Tolerierung eines gewissen Signalclipping zu hohe Crestfaktoren zu vermeiden [KRÜ 03]. Derzeit liegen realistische Werte etwa zwischen 8 und 10 dB [BAN 03]. Im Unterschied zu den ebenfalls rauschähnlichen Signalen bei DAB und DVB-T ist der Crestfaktor bei UMTS nicht zeitlich konstant, sondern er verändert sich mit der momentanen Auslastung der Station [NOKIA 05].

Für die Expositionsmesstechnik ist es allerdings von entscheidender Bedeutung, dass die mittlere Leistung gemessen wird, da diese aufgrund des thermischen Wirkungsmodells die korrekte Beurteilungsgröße für die Einhaltung der abgeleiteten Grenzwerte darstellt. Eine Messung der Spitzenleistung eines UMTS-Signals führt demnach zu einer deutlichen Überbewertung der Exposition. Näheres zur korrekten Expositionsmessung bei UMTS-Signalen findet sich in Kapitel I.4.

## I.2.6 Zusammenfassung

Folgende Eigenschaften des Signals einer UMTS-Basisstation sind für die korrekte Expositionsmessung von besonderer Bedeutung:

- Im Vergleich zu GSM besitzt ein UMTS-Signal eine deutlich höhere Bandbreite. Sie beträgt etwa 4,5 MHz.
- Das UMTS-Signal hat einen rauschähnlichen Zeitverlauf mit einem Crestfaktor, der von der momentanen Auslastung der Station abhängt und in der Praxis etwa 8 bis 10 dB betragen kann.
- Die abgestrahlte Sendeleistung schwankt mit der momentanen Auslastung der Station. Aufgrund der im Moment realisierten Einstellungen ergibt sich eine maximale Schwankungsbreite von typisch 6 bis 10 dB.
- Einer besonderen Bedeutung für die Expositionsmesstechnik kommt dem P-CPICH zu. Dieses Signal wird von jeder Basisstation mit konstanter, eindeutig definierter Leistung abgegeben. Ein Messgerät, das in der Lage ist - ähnlich wie die UMTS-Endgeräte - dieses Signal zu separieren und seinen individuellen Empfangspegel am Messort zu bestimmen („Codeselektive Messung“), eröffnet die Möglichkeit, bei bekanntem Leistungsverhältnis zwischen P-CPICH und der Maximalleistung der Station, eine auslastungsunabhängige Extrapolation der gemessenen Exposition auf höchste betriebliche Anlagenauslastung durchzuführen. Näheres zu den verschiedenen Messverfahren findet sich in Kapitel I.4 sowie im II. Teilbericht vorliegenden Untersuchungsvorhabens. Prinzipiell lässt der UMTS-Standard auch eine dynamische Regelung der P-CPICH-Leistung zum Zweck der Optimierung der Zellenausdehnung zu. In diesem Fall ist der Pegel des P-CPICH-Signals nicht mehr zeitlich konstant und daher nicht mehr als zuverlässige Referenz für eine Hochrechnung geeignet. Hierfür werden jedoch in Abschnitt II. 4.14.3 des II. Teilberichtes Lösungsmöglichkeiten vorgestellt.

## I.3 Berechnungsverfahren für UMTS

Das vorliegende Kapitel gibt einen Überblick über existierende Berechnungsmethoden für elektromagnetische Felder in der Umgebung von UMTS-Anlagen. Die vorgestellten Berechnungsmodelle wurden originär vorwiegend zur Funknetzplanung mit einem entsprechenden Anforderungsprofil entwickelt. Die Frage nach ihrer Tauglichkeit für die hier gegebene Problemstellung der Immissionsberechnung ist neu und wird im folgenden untersucht. In die Beurteilung der Tauglichkeit bestehender Modelle fließt dabei auch ein, welche Eingangsdaten benötigt werden. Außerdem ist die Genauigkeit der berechneten Daten und der Rechenaufwand mit zu berücksichtigen.

### I.3.1 Grundlagen der Funkwellenausbreitung

#### I.3.1.1 Ausbreitungserscheinungen

Die Wellenausbreitung bei den für UMTS verwendeten Frequenzen folgt ähnlichen Gesetzen wie die Ausbreitung von Licht.

Im Freiraum breitet sich eine ideale Funkwelle vom Sender gleichmäßig und geradlinig in alle Richtungen und ohne jede Beeinflussung durch die Umgebung aus. Dadurch verteilt sich die Sendeleistung mit zunehmendem Abstand zum Sender über immer größere (Kugelober-) Flächen; man spricht von der Übertragungs- oder Freiraumdämpfung zwischen Sender und Empfänger. In realen Funksystemen ist die Wellenausbreitung sehr viel komplizierter. Es ist normalerweise mit einer Zusatzdämpfung durch die Umgebungseinflüsse zu rechnen, d.h. die Freiraumdämpfung ist eine Art Mindestdämpfung, die alleine durch den räumlichen Abstand zwischen Sender und Empfänger hervorgerufen wird. Nur in sehr seltenen Fällen sind auch Feldstärken über dem Freiraumwert möglich.

In realem Gelände werden Funkwellen auf folgende unterschiedliche Art und Weise abgelenkt bzw. abgeschwächt:

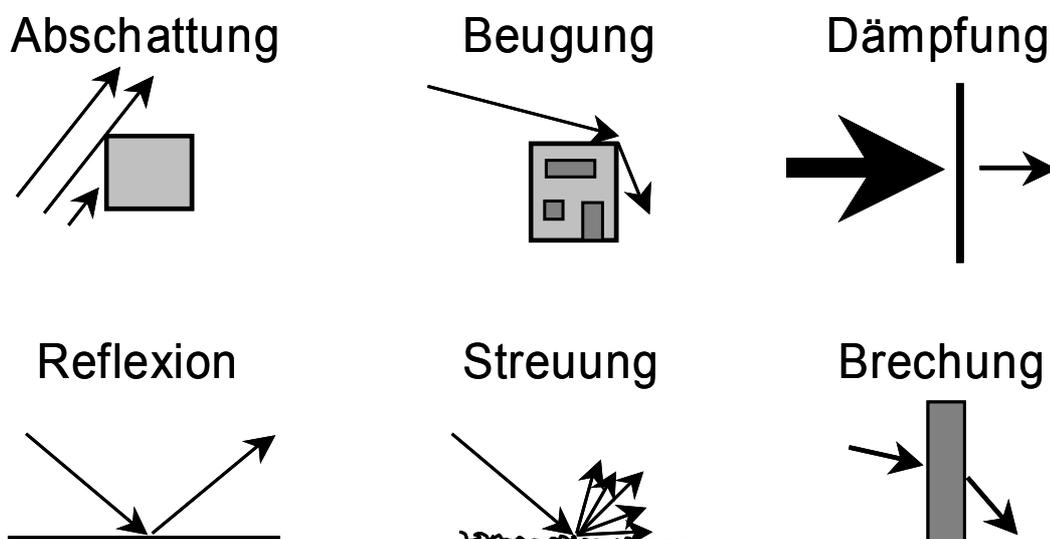


Bild I.3.1: Ausbreitungsmechanismen

**Abschattung** – tritt auf, wenn die Verbindungslinie zwischen Sender und Empfänger durch ein Hindernis unterbrochen wird. Bereiche im Funkschatten eines Hindernisses erreichen elektromagnetische Energie nur indirekt, z.B. über Reflexionen an anderen Hindernissen.

**Beugung** – tritt auf, wenn die Verbindungslinie zwischen Sender und Empfänger durch eine scharfe Kante (z.B. von Hauswänden oder -dächern) unterbrochen wird. Eine einfallende Funkwelle wird um die Kante herum gebeugt, d.h. die Welle ändert ihre Richtung und erreicht Bereiche, welche ohne Kantenbeugung vom Hindernis abgeschattet sind.

**Dämpfung** – tritt auf, wenn eine Funkwelle auf ein Hindernis trifft, welches für elektromagnetische Strahlung nur teilweise durchlässig ist. Die im Hindernis absorbierte Energie wird in Wärme umgewandelt. Trifft eine Funkwelle beispielsweise auf eine Wand, absorbiert und reflektiert sie Teile der einfallenden Energie. Die verbleibende Energie wird durch die Wand transmittiert. Auch Vegetation und Lebewesen absorbieren elektromagnetische Energie. Der Absorptionsgrad ist abhängig von den elektrischen Materialeigenschaften, der Dicke und dem inneren Aufbau des Hindernisses.

**Reflexion** – tritt auf, wenn eine Funkwelle auf ein glattes Hindernis trifft, welches sehr groß gegenüber ihrer Wellenlänge ist (z.B. Häuserwände). Der Reflexionsgrad ist abhängig von den elektrischen Materialeigenschaften, der Oberflächenrauigkeit des Hindernisses und dem Einfallswinkel der Funkwelle.

**Streuung** – tritt auf, wenn eine Funkwelle auf ein Hindernis trifft, welches kleiner als oder vergleichbar groß mit ihrer Wellenlänge ist (z.B. Laub, Laternenpfähle, Verkehrsschilder). Wellen werden auch an rauen bzw. ungleichmäßigen Oberflächen gestreut. Die Streuung kann ähnlich betrachtet werden wie die Reflexion, mit dem Unterschied, dass die einfallende Funkwelle nicht in eine, sondern in viele Richtungen zurückgeworfen wird. Die Streuung ist abhängig von den elektrischen Materialeigenschaften, der Oberflächenrauigkeit des Hindernisses und dem Einfallswinkel der Funkwelle.

**Brechung** – trifft eine Welle schräg auf die Grenzfläche zweier Medien unterschiedlicher Dichte, in denen die Welle verschiedene Ausbreitungsgeschwindigkeiten hat, tritt beim Übergang in das zweite Medium eine Änderung der Geschwindigkeit auf. Dies wiederum führt zu einer Richtungsänderung der Welle. Die Brechung einer elektromagnetischen Welle erfolgt beim Eintritt in ein optisch dichteres Medium stets zum Lot hin.

Regen oder Schnee, d.h. der Wassergehalt, können Materialeigenschaften und damit das Reflexions-, Beugungs- und Dämpfungsverhalten verändern.

### **I.3.1.2 Mehrwegeausbreitung**

Die Ausbreitung von Funkwellen insbesondere in städtischen Gebieten ist ein komplexes Phänomen. Eine vom Sender ausgestrahlte Welle breitet sich über verschiedene Pfade in der natürlichen Umgebung aus und erreicht den Empfänger u.U. aus mehreren verschiedenen Richtungen; man spricht von Mehrwegeausbreitung. Am Empfänger addieren sich die einzelnen Beiträge der Teilwellen vektoriell (nach Amplitude, Phase und Polarisation) zu einer Gesamtfeldstärke. Diese Überlagerung bewirkt eine sehr starke Veränderlichkeit der resultierenden Feldstärke mit lokalen Maxima und Minima, die räumlich nur wenige Wellen-

längen auseinander liegen. Dabei können sich Maximal- und Minimalwert leicht um mehr als 20 dB (Faktor 10 bezogen auf die Feldstärke) unterscheiden. Dieses Phänomen wird Schwund (engl. Fading) genannt.

Häufig verändern die die Mehrwegeausbreitung hervorrufenden Inhomogenitäten des Ausbreitungsmediums ihre Eigenschaften oder ihre räumliche Lage mit der Zeit. Die Kombination der Teilwellen und damit die resultierende Feldstärke am Beobachtungsort verändern sich dann auch mit der Zeit.

Entlang der Ausbreitungspfade spielen neben der Freiraumausbreitung die bereits erwähnten Ausbreitungserscheinungen eine im Hinblick auf die Berechnung der Immission unterschiedlich bedeutsame Rolle:

- Beobachtungspunkt mit Sichtverbindung zum Sender:

Als *Worst-Case* Betrachtung für eine Berechnung muss hier laut [BOR 05] zu dem Anteil der direkten Welle, d.h. der ungestörten Ausbreitung entlang der Sichtlinie zwischen Sender und Empfänger, ein Zuschlag von 3 dB zur Berücksichtigung der Bodenreflexion hinzu addiert werden.

- Beobachtungspunkt ohne Sichtverbindung zum Sender:

In diesem Bereich wird die Feldstärke durch die Überlagerung reflektierter und um die Hindernisse herum gebeugter Wellen im wesentlichen ohne den Anteil der direkten Welle bestimmt.

### **I.3.1.3 Wellenausbreitung innerhalb von Gebäuden**

Funkwellen werden durch Gebäudewände abhängig von den verwendeten Baumaterialien gedämpft. Die Transmissionsdämpfung ist auch vom Einfallswinkel der Wellen abhängig und kann zwischen streifendem und senkrechtem Einfall große Unterschiede aufweisen. Darüber hinaus dringen die Wellen bei UMTS-Frequenzen durch vorhandene Öffnungen wie Fenster und Türen ins Gebäude ein.

Die Wellenausbreitung im Inneren des Gebäudes wird dann im wesentlichen durch Mehrfachreflexionen an Wänden, Böden, Decken usw. bestimmt und führt zu örtlichen Schwankungen der Immission. Auch Personen oder die Inneneinrichtung beeinflussen die resultierenden Feldstärkewerte. Jegliche Umstellung von Mobiliar und sonstigen Gegenständen führt zu einer neuen Immissionslage.

## **I.3.2 Anforderungen an Berechnungsverfahren**

An Verfahren zur Berechnung der Immission im Umfeld von UMTS Basisstationen sind verschiedene Anforderungen zu stellen.

Manche Anforderungen sind eng miteinander verknüpft, d.h. sie können nicht unabhängig voneinander erfüllt werden; andere sind gegenläufig.

**Grenzwertüberprüfung:** Das Modell muss in der Lage sein *punktueller* Werte für z.B. die elektrische Feldstärke E (bzw. alternativ magnetische Feldstärke H oder Leistungsflussdichte

S) zu berechnen. *Mittelwerte* über größere Flächen- oder Volumenelemente (z.B. kompletter Spielplatz oder Zimmer) sind in der Regel nicht ausreichend. Es soll ein flächendeckendes, dreidimensionales Bild einer Immissionslage entstehen. Alternativ zu punktuellen Werten wäre auch die Berechnung von *Maximalwerten* über größere Flächen- oder Volumenelemente wünschenswert. Die kombinierte Berechnung der Beiträge mehrerer Basisstationen muss möglich sein.

**Frequenzbereich:** Der Gültigkeitsbereich des Modells muss mindestens den Bereich zwischen 2110 MHz und 2170 MHz (Downlink UMTS, FDD Mode) umfassen.

**Entfernungsbereich:** Der Gültigkeitsbereich des Modells muss den Versorgungsbereich einer Zelle ab einigen Metern (Sicherheitsabstand) umfassen.

**Anwendungsbereich:** Alle relevanten Umgebungen, also ländliche Gebiete, Vor- und Innenstädte, müssen mit einem Modell berechenbar sein. Wünschenswert sind auch Aussagen zu Feldstärken innerhalb von Gebäuden.

**Systematische Fehler:** Die Einschränkungen für die Verwendbarkeit aufgrund der jeweiligen Modellannahmen müssen bekannt und möglichst gering sein.

**Erforderliche Eingabedaten:** Das Modell sollte nur solche Daten benötigen, die in entsprechendem Detaillierungsgrad und Qualität auch verfügbar sind. Sonst ist in der Regel mit Einbußen in der Genauigkeit der Simulationsergebnisse zu rechnen.

**Genauigkeit:** Das Modell soll die Simulationsergebnisse mit möglichst großer Genauigkeit liefern.

**Auflösung:** Die Auflösung des Modells sollte genügend fein sein, um eine genaue Modellierung sicherzustellen, aber dabei grob genug bleiben, um den Rechenaufwand zu begrenzen.

### I.3.3 Wellenausbreitungsmodelle

Für eine allgemeine rechentechnische Erfassung der Immissionslage wäre es optimal, wenn es gelingen würde, die das Problem beschreibenden Maxwellschen Gleichungen unter Erfüllung aller Grenzbedingungen (z.B. Grenze Luft-Erdboden, Grenzflächen Luft-Hauswände) exakt zu lösen. Die hierfür notwendige feldtheoretische Lösung ist aber nur numerisch und mit immensem Aufwand möglich. Die Komplexität des Problems lässt sich unter gewissen vereinfachenden Voraussetzungen allerdings soweit reduzieren, dass eine feldtheoretische Lösung auch für die Praxis interessant wird. Ohne vereinfachende Annahmen ist eine feldtheoretische Lösung heute nur dann möglich, wenn das betrachtete Volumen bezogen auf die verwendete Wellenlänge recht klein ist. Dies ist bei nicht zu hohen Frequenzen innerhalb von Gebäuden der Fall.

Häufig genügt es jedoch bereits alle relevanten Übertragungswege zwischen Sender und Empfänger zu suchen und deren Zusammenwirken zu analysieren. Hierzu muss davon ausgegangen werden, dass die Ausbreitungsmechanismen getrennt voneinander betrachtet werden können. Dies ist nur der Fall, sofern die Abmessungen aller Hindernisse deutlich größer als die Wellenlänge sind. Die Felder können dann in Analogie zur Optik in Form von Strahlen beschrieben werden. Auf diesen Annahmen basierende strahlenoptische Modelle

lassen sich für die Ausbreitung in ländlichen und urbanen Gebieten sowie zur Ausbreitungsmodellierung innerhalb von Gebäuden einsetzen.

Vielen Anwendern sind aber auch die gegenüber feldtheoretischen Verfahren bereits deutlich einfacheren und erheblich schnelleren strahlenoptischen Modelle noch zu aufwändig, weshalb trotz der immensen Steigerung der verfügbaren Rechenleistung auch heute noch so genannte empirische und semi-empirische Verfahren eingesetzt werden. Rein empirische Verfahren basieren auf der statistischen Auswertung vieler Messungen und der Wahl geeigneter Näherungsfunktionen, um die Messwerte möglichst gut zu approximieren. Semi-empirische Verfahren verwenden hinzukommend noch einfache theoretische Ansätze, wie z.B. die Abschätzung der Beugungsdämpfung durch Multiple-knife-edge-Modelle (siehe [DEY 66, DEY 91, GIO 84]), oder die Zweistrahltheorie in Kombination mit empirischen Korrekturen. Damit ist zwar in begrenztem Maße eine Berücksichtigung der realen Ausbreitungsumgebung, d.h. von Geländehöhe oder Bebauung, möglich, jedoch werden die vielfältigen Möglichkeiten einer strahlenoptischen oder feldtheoretischen Lösung nicht erreicht.

Für die Planung von Funksystemen wurden derartige Modelle zur Ermittlung des Ausbreitungsverhaltens elektromagnetischer Wellen entwickelt. Die Umgebung, in der diese Ausbreitungsmodelle eingesetzt werden sollen, variiert sehr stark. So differieren die relevanten Einflussfaktoren in ausgedehnten ländlichen Gebieten, in urbanen (städtischen) Bereichen und bei der Ausbreitung innerhalb von Gebäuden (Inhaus, Indoor) erheblich.

Für UMTS wird die Umgebung vielfach durch die Begriffe Makro-, Mikro- und Piko-Zelle unterschieden (siehe Tab. I.3.1). Größen, die sich auf den Sender beziehen, werden häufig mit BS (Basisstation) indiziert und die für den Empfänger mit MS (Mobilstation).

Typ der Funkzelle	typischer Zellradius	Erläuterungen (Umgebung, Antennen etc.)
Makro-Zelle	1 km bis 30 km	außerhalb von Gebäuden (ländlich oder städtisch), BS-Antenne oberhalb aller Hindernisse
Mikro-Zelle	Bis zu ca. 1 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

Tab. I.3.1: Begriffsbestimmung zu Makro-, Mikro- und Piko-Zelle im Mobilfunk

Die Funknetzplanung von UMTS unterscheidet sich grundlegend von der für die zweite Generation der zellularen Mobilfunksysteme (GSM) [AMA 03a, AMA 03b, LUS 04]. Zunächst einfällt bei UMTS die Planung bzw. Zuweisung einer bestimmten Sendefrequenz an jede

einzelne Zelle, da die Basisstationen eines Betreibers auf der gleichen Frequenz (Downlink) senden.

Darüber hinaus sind die Flächenversorgungs- und die Interferenzanalyse nicht mehr separat zu betrachten, damit auch das Verkehrsaufkommen, Anforderungen an die Signalqualität und der Mechanismus der Leistungsregelung berücksichtigt werden können [AMA 03a].

Alle aktiven Verbindungen teilen sich bei UMTS die gleiche Bandbreite. Das Interferenzlevel ist eine Funktion der abgestrahlten Leistung und somit sowohl abhängig vom gerade in Anspruch genommenen Service (Sprache, Daten) als auch vom jeweiligen Benutzerstandort. Da die verfügbare abgestrahlte Leistung begrenzt ist, können mobile Stationen, die sich weit entfernt von der BS befinden das für eine Kommunikation minimale Verhältnis von Signalstärke zum Interferenzlevel (kurz SIR), nicht mehr erreichen, wenn die Interferenzen zu groß werden. Daher ist das Gebiet, das von einer BS versorgt wird, stark abhängig von der Auslastung (Service, Standort eines Benutzers) und seine Größe variiert sobald sich das Interferenzbild ändert. Dieses Phänomen wird Zellatmung genannt, das bei der UMTS-Funknetzplanung berücksichtigt werden muss. Hierfür werden z.B. Monte Carlo Simulatoren eingesetzt (vgl. [LUS 04]).

Es bleibt also zunächst fest zu halten, dass sich die Funknetzplanung von UMTS insgesamt betrachtet deutlich von der von GSM unterscheidet. Gemeinsam ist beiden allerdings weiterhin die Verwendung der gleichen Ausbreitungsmodelle für die Feldstärkevorhersage ([LUS 04, MAI 00]). Da nur diese für die hier vorliegende Aufgabe von Interesse sind, wird im folgenden auf die Ausbreitungsmodelle näher eingegangen, wie sie bei der Planung von UMTS-Systemen Anwendung finden (siehe z.B. [COI 01]).

### **1.3.3.1 Empirische und semi-empirische Modelle**

Die Prognose der mittleren elektrischen Feldstärke und Funkfelddämpfung wird aufgrund von wenigen benötigten Eingabeparametern und einfacher Handhabung vielfach mit Hilfe empirischer Modelle durchgeführt.

Der fundamentale Ausbreitungsmechanismus ist die reine Freiraumausbreitung, d.h. eine absolut ungestörte Übertragung zwischen einer isotropen Sende- und einer isotropen Empfangsantenne. Die Empfangsfeldstärke nimmt hier linear mit dem Abstand ab. Da eine reine Freiraumausbreitung in der Realität nicht auftritt, wurde ein sehr einfaches Ausbreitungsmodell, die sog. Zweistrahletheorie, entwickelt. Für Sende- und Empfangsantenne über einer ideal ebenen Grenzfläche überlagern sich die Anteile einer direkten und einer bodenreflektierten Teilwelle.

Durch die Verschmelzung von deterministischen Ansätzen (z.B. Multi-knife-edge Modelle), mit denen Gelände- oder Gebäudehöhen in die Berechnung einbezogen werden, und empirischen Methoden, die anhand von umfangreichen Messungen gewonnen wurden, ergeben sich semi-empirische Verfahren. Nahezu jeder Nutzer derartiger semi-empirischer Ausbreitung kalibriert ein eigenes oder erworbenes Modell anhand eigener Messungen innerhalb eines repräsentativen Gebietes. So werden z.B. Modelle, die für quasi-ebenes Gelände definiert sind, durch die Kombination mit einem Verfahren zur Beugungsberechnung auch auf hügeliges oder städtisches Gelände erweitert. Zur Verbesserung der Vorher-

sage werden dann noch geeignete, wiederum meist rein empirische Korrekturfaktoren definiert, um für den Fehler zwischen Rechnung und Messung einen möglichst verschwindenden Mittelwert und eine kleine Standardabweichung zu erhalten. Wie rein empirische Verfahren sind auch semi-empirische Modelle nur bedingt in der Lage, Bebauungsdaten detailliert in eine Analyse einzubeziehen. Aufgrund ihrer abstrakten Modellierung der Geländestructur bzw. durch die Einführung von empirischen Korrekturfaktoren besitzen diese Modelle nur eine eingeschränkte Gültigkeit bezüglich Topographie, Morphographie und Frequenz.

Da aus der ursprünglichen Entwicklung dieser Verfahren der von UMTS verwendete Frequenzbereich nicht abgedeckt war, wurde dieser im Rahmen des Projektes COST231 für die im folgenden beschriebenen gängigen empirischen bzw. semi-empirischen Modelle erweitert. Auf diese Weise sind die Modelle auch für UMTS geeignet.

### **1.3.3.1.1 COST-Hata-Modell [COS 99]**

Das ursprüngliche Okumura-Hata-Modell ist beschränkt auf Frequenzen zwischen 150 MHz und 1500 MHz. Daher war die Planung von z.B. GSM 1800 oder UMTS Systemen nicht möglich. Im Rahmen der europäischen Forschungskoooperation COST (European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research) wurden deshalb die Messungen von Okumura [OKU 68] für Frequenzen oberhalb von 1,5 GHz ausgewertet. Das hierauf basierende Modell wird als COST-Hata-Modell bezeichnet. Dessen Gültigkeitsbereich ist gegeben durch:

Frequenz	1500 .. 2000 MHz
Entfernung	1 .. 20 km
Höhe der Basisstationsantenne	30 .. 200 m
Höhe der Mobilstationsantenne	1 ..10 m

Tab. I.3.2: Gültigkeitsbereich des COST-Hata-Modells

Obwohl der Frequenzbereich für den Downlink bei UMTS oberhalb von 2 GHz liegt, wird das Modell in diesem Zusammenhang eingesetzt (vgl. hierzu [AMA 03a, AMA 03b, COI 01, MAI 00]). Ebenso wie beim ursprünglichen Okumura-Hata-Modell sind nur BS-Antennenhöhen größer als 30 m zugelassen, weshalb eine Anwendung auf Mikro-Zellen meist nicht möglich ist. Für Makro-Zellen in urbaner Umgebung ergibt sich analog zum ursprünglichen Modell ebenfalls eine Basisdämpfung und eine Korrektur zur Berücksichtigung der MS-Antennenhöhe. Für Großstadtzentren wird jedoch eine zusätzliche Dämpfung addiert, um den mittleren Fehler gegenüber den Messungen zu reduzieren.

Innerhalb von Ballungszentren zur Bereitstellung einer ausreichend hohen Kapazität, d.h. zur Versorgung einer großen Zahl von Teilnehmern auf einer relativ kleinen Fläche, müssen kleine Radien für die Versorgungsgebiete einzelner Basisstationen gewählt werden (< 1 km). Deshalb ist eine Anwendung des COST-Hata-Modells schwer möglich, auch deshalb, weil

die Höhe der Basisstation vielfach kleiner als 30 m über Grund ist. Außerdem ist es auch für die Feldstärkeberechnung in Städten, bei denen die BS-Antennenhöhe eine Anwendung des COST-Hata-Modells im Prinzip zulässt, häufig sinnvoller, Verfahren zu verwenden, welche den Ausbreitungseffekten innerhalb von bebauten Gebieten besser Rechnung tragen.

### **1.3.3.1.2 COST-Walfisch-Ikegami-Modell**

Um Bebauungsdaten besser berücksichtigen zu können, wurden diverse Modelle entwickelt, die gemittelte Werte für Gebäudehöhe, Straßenschluchtbreite und/oder Gebäudeabstand verarbeiten [COS 90, COS 91, IKE 84, WAL 88]. Damit ist zwar noch immer keine Modellierung der realen Umgebung möglich, die Ergebnisse sind aber bereits erheblich genauer. Im Gegensatz zum COST-Hata-Modell existieren hier empirische Lösungen auch für den Fall, dass sich die BS-Antenne unterhalb des mittleren Dachniveaus befindet. Viele dieser Modelle basieren auf Untersuchungen von Walfisch und Bertoni [WAL 88] zur Beugung über Gebäude hinweg. Auf das dort beschriebene Ausbreitungsmodell soll hier nicht eingegangen, sondern direkt eine Erweiterung für den UMTS Frequenzbereich vorgestellt werden.

Bild I.3.2 zeigt die Geometrie, die beim COST-Walfisch-Ikegami-Modell verwendet wird [COS 90, COS 91, IKE 84, WAL 88]. Die Ausbreitung und die urbane Umgebung werden lediglich durch die folgenden Parameter mit ihren jeweiligen Gültigkeitsgrenzen beschrieben:

Frequenz	800 .. 2000 MHz
Entfernung	20 m .. 5 km
Höhe der Basisstationsantenne	4 .. 50 m
Höhe der Mobilstationsantenne	1 .. 3 m
Mittlere Straßenbreite	10 .. 25 m
Mittlerer Gebäudeabstand	20 .. 50 m

Tab. I.3.3: Gültigkeitsbereich des COST-Walfisch-Ikegami-Modells

Obwohl der Frequenzbereich für den Downlink bei UMTS oberhalb von 2 GHz liegt, wird auch das vorliegende Modell wie schon das vorangegangene COST Hata Modell für die Berechnung eingesetzt. Auch das COST-Walfisch-Ikegami-Modell, nachfolgend kurz COST-WI-Modell, ist primär empirisch, da es ausschließlich auf diesen statistischen Parametern beruht und nicht wirklich detaillierte Geländehöhen- und/oder Bebauungsdaten berücksichtigt. Sofern Gebäudedaten verfügbar sind, lassen sich daraus aber zumindest die statistischen Parameter bestimmen.

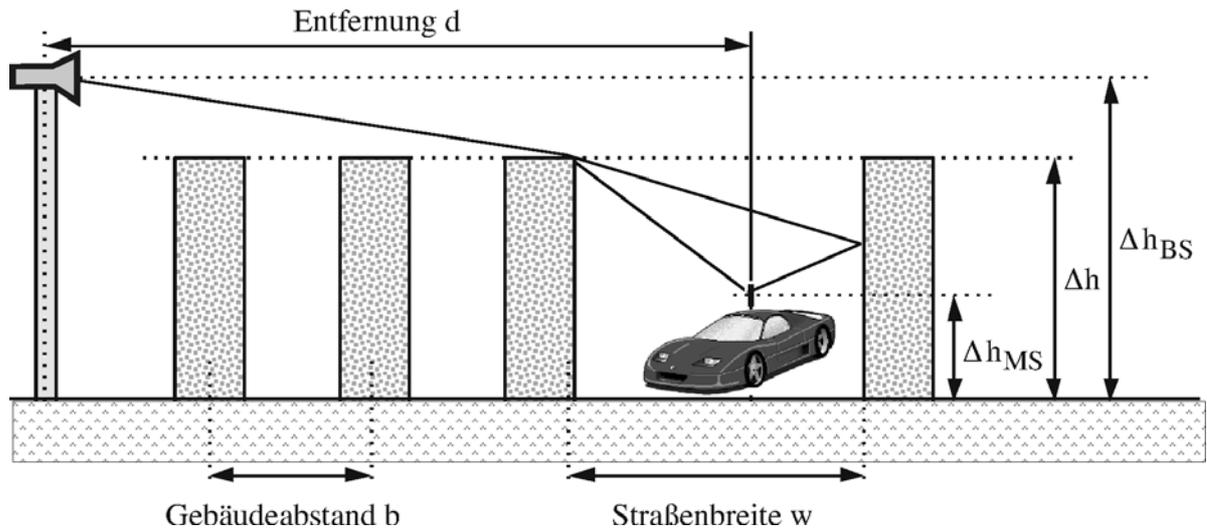


Bild I.3.2: Statistische Beschreibungsgrößen beim COST-Walfisch-Ikegami-Modell

Das COST-WI-Modell unterscheidet zwischen dem Fall, dass zwischen BS und MS eine Sichtverbindung besteht (LOS: Line-of-sight) und dem Fall, dass die direkte Verbindungslinie durch Hindernisse blockiert wird (NLOS: Non-line-of-sight). Für LOS mit BS und MS innerhalb einer Straßenschlucht (Street canyon) wird eine sehr einfache empirische Gleichung verwendet, die auf Messungen beruht. Die relativ langsame Abnahme mit der Entfernung resultiert aus Wellenleitereffekten innerhalb von Straßenschluchten, die durch Mehrfachreflexionen an den begrenzenden Hauswänden beschrieben werden können. Im COST-WI-Modell setzt sich die Funkfelddämpfung für NLOS (keine Sichtverbindung) aus der Grundübertragungsdämpfung, einer Zusatzdämpfung für die Beugung über die Gebäude hinweg (Multiple screen diffraction) und einer Dämpfung für die Ausbreitung zwischen der letzten beugenden Kante und der MS innerhalb einer Straßenschlucht (Roof-top-to-street diffraction and scatter loss) zusammen.

Für die Kopplung der Welle in die Straßenschlucht hinein, in der sich der mobile Teilnehmer befindet, wird eine empirische Näherung verwendet, welche auf der mittleren Straßenbreite und der Orientierung der Straße gegenüber der Ausbreitungsrichtung basiert.

Bei der detaillierten Behandlung der Beugung an mehreren Halbebenen ergibt sich analog zur Beugung an einer Halbebene ein Integral, für welches Walfisch und Bertoni [WAL 88] eine Näherungslösung für BS-Antennen oberhalb des mittleren Dachniveaus fanden. Im COST-WI-Modell wird diese Näherung durch eine empirische Korrektur auch auf BS unterhalb des mittleren Gebäudeniveaus erweitert, wobei die Basisstationshöhe stets größer als 4 m bleiben muss.

Obwohl das COST-WI-Modell gemäß dem oben angegebenen Gültigkeitsbereich auch für Basisstationen unterhalb des mittleren Dachniveaus definiert wurde, sind die Fehler dort häufig recht groß, d.h. das Modell ist für Mikro-Zellen nicht immer zu gebrauchen. Wegen der Annahme einer mittleren Gebäudehöhe, eines mittleren Gebäudeabstandes und einer mittleren Straßenschluchtbreite ergeben sich insbesondere auch dann Probleme, wenn die Art der Bebauung nicht homogen ist. Dies ist im Falle historisch gewachsener Städte oft vorzufinden. Außerdem ist dieses Modell für ebenes Gelände definiert, so dass für Städte in hügeligem Gelände eine Anwendung vielfach nicht ratsam erscheint.

### I.3.3.2 Analytische Modelle

Da Empirische oder semi-empirischer Modelle die wirkliche Lage, Orientierung, Form und Größe der Gebäude ebenso wenig berücksichtigen wie die Materialeigenschaften der Wände, hatten daher zahlreiche Arbeiten der letzten Jahre [CIC 93, CIC 94, LEV 92, RIZ 97, RUS 93, VAN 94] das Ziel, Modelle zu entwickeln, welche die Ausbreitungsmechanismen mittels mathematischer Methoden beschreiben, die gut für die Berechnung mit Computern geeignet sind und bei denen möglichst die gesamte Information zur Bebauung detailliert berücksichtigt wird. In der Regel wird zusätzlich zu diesen Bebauungsdaten auch die Geländehöhe benötigt, denen die Gebäudehöhe überlagert werden muss. Dies geht aber naturgemäß einher mit einem entsprechend steigendem Rechenaufwand.

Analytische Modelle werden gegenwärtig häufig bei der Planung und Analyse von Mobilfunknetzen in städtischen Gebieten eingesetzt [WAL 88, ITY 91, SHA 93]. Vergleiche zwischen Simulationen und Messungen zeigen eine für diese Anwendung gute Übereinstimmung. Die Güte der Modellierung hängt allerdings von der Qualität der zugrunde liegenden digitalen Datenbanken ab. Diese Datenbanken müssen sowohl Höhendaten (Topographie), als auch Informationen über Bebauung (Gebäudegrundrisse, Gebäudehöhen, Dachformen, Materialparameter) und Bewuchs (Morphographie) in einer Auflösung und Genauigkeit zur Verfügung stellen, die gut genug ist, eine detaillierte Modellierung zu gewährleisten.

Bei den analytischen Modellen unterscheidet man grundsätzlich strahlenoptische und feldtheoretische Modelle. Für beide Klassen gilt, dass für steigende Genauigkeitsansprüche an die Berechnung die Modellierungstiefe und damit der benötigte Rechenaufwand ansteigt.

#### I.3.3.2.1 Strahlenoptische Ausbreitungsmodelle

Strahlenoptische Ausbreitungsmodelle ermöglichen genaue Berechnungen bei vertretbarem Rechenzeitaufwand (je nach geforderter Auflösung/Genauigkeit). Darüber hinaus entstehen durch den physikalischen Ansatz keine großen Einschränkungen hinsichtlich der untersuchten Frequenzen oder Ausbreitungsbedingungen.

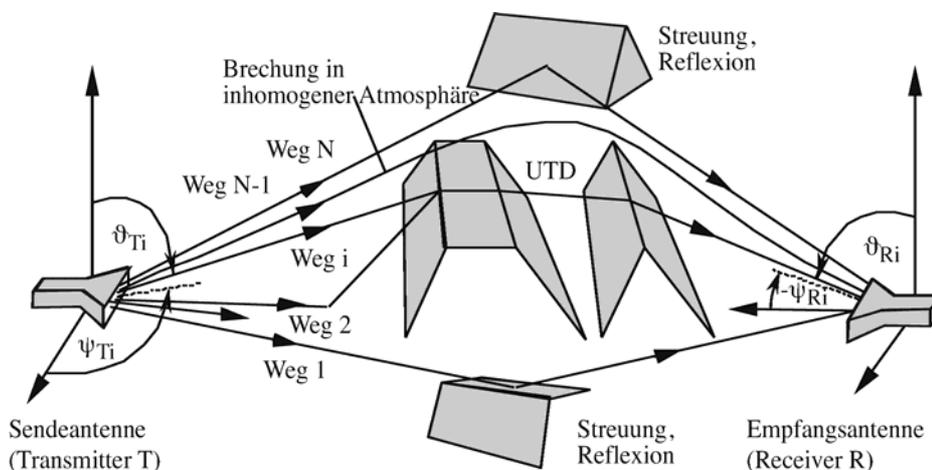


Bild I.3.3: Mehrwegeausbreitung und Deutung einzelner Übertragungswege als Strahlenbahnen

In Bild I.3.3 ist eine Ausbreitungssituation wiedergegeben, die aus einer Kombination aller wichtigen Ausbreitungsmechanismen resultiert. Hieraus sind unmittelbar die wesentlichen Schritte innerhalb eines Modells, bei dem die einzelnen Übertragungswege unabhängig voneinander als Strahlen gedeutet werden, ersichtlich. Berechnungsverfahren, die auf einer derartigen Zerlegung in einzelne Ausbreitungswege basieren und sich so gut zu einer konsistenten Beschreibung der Mehrwegeausbreitung zwischen Sende- und Empfangsantenne verbinden lassen, werden als strahlenoptische Modelle bezeichnet.

Strahlenoptische Modelle fußen auf einer deterministischen Beschreibung aller Objekte in der zu berechnenden Umgebung durch Geometrie und elektrische Materialparameter. In dieser Umgebung werden alle Ausbreitungspfade zwischen Sender und Empfänger gesucht. Auf die Pfade werden schließlich, je nach verwendeter Theorie, unterschiedliche mathematische Formeln angewendet, um die interessierenden Größen am Beobachtungspunkt zu berechnen. Durch die stetig steigende Rechenleistung der Computer hat sich diese Methode in der Vergangenheit immer weiter verbreitet.

Die Analyse der Wellenausbreitung mit einem strahlenoptischen Modell unterteilt sich also in die drei wesentlichen Arbeitsschritte:

- Suche aller relevanten Ausbreitungspfade unter Berücksichtigung der Bebauung und der Geländehöhe (Strahlensuche),
- Berechnung des Übertragungsverhaltens aller Pfade, und
- Verwendung der Parameter aller Ausbreitungspfade zur Berechnung der Empfangsleistung.

Sowohl die Strahlensuche, als auch die Wahl der relevanten Übertragungswege, welche bei der anschließenden Berechnung tatsächlich berücksichtigt werden, unterscheidet sich von Modell zu Modell beträchtlich. Im Gegensatz zu Modellen für ländliche Gebiete, bei denen in der Regel bereits die Suche innerhalb der vertikalen 2D-Schnittebene genügt, sollte insbesondere für BS-Antennen unterhalb des mittleren Gebäudeniveaus in Städten eine 3D-Strahlensuche erfolgen. Die Beugung an vertikalen Gebäudekanten und Mehrfachreflexionen an begrenzenden Hauswänden sind nämlich häufig entscheidender als die Beugung über die Gebäude hinweg.

Bei der Wechselwirkung des Strahls mit einem Hindernis wird die Richtung, die Amplitude, die Phase und/oder die Polarisation der Welle verändert. Eventuell muss der einzelne Strahl auch in mehrere aufgespaltet werden. Dies ist für die Reflexion/Transmission unmittelbar ersichtlich. Bei der Beugung muss ein eintreffender Strahl im Prinzip sogar in unendlich viele Strahlen aufgespaltet werden, da alle möglichen Beugungsrichtungen lediglich dadurch charakterisiert sind, dass sie den Beugungskegel bilden.

Es hat sich herausgestellt, dass die für die Funknetzplanung im Mobilfunk dominierenden Ausbreitungsmechanismen durch Objekte mit gegenüber den benutzten Wellenlängen großen geometrischen Abmessungen ( $> 5 \lambda$ ) hervorgerufen werden. Deshalb bieten sich Methoden an, welche diese Tatsache zur Vereinfachung der Ausbreitungsberechnung ausnutzen (asymptotische Hochfrequenzmethoden [LUE 82]). Die wichtigsten Methoden hier sind:

- Geometrische Beugungstheorie, Geometrical Theory of Diffraction (GTD), bzw. Verallgemeinerte geometrische Beugungstheorie, Uniform Theory of Diffraction (UTD),
- Physikalische Optik, Physical Optics (PO),
- Physical Theory of Diffraction (PTD) bzw. Method of Equivalent Currents (MEC).

Mit der Kombination von GO mit GTD/UTD kann die Auswirkung vieler verschiedener Objekte auf die Wellenausbreitung auf der gleichen theoretischen Basis, der Strahlenoptik, beschrieben werden und ist wohl etabliert.

Die geometrische Optik (Geometrical Optics, GO) [MCN 90] ist ein approximatives Verfahren zur Berechnung von einfallenden, reflektierten und gebrochenen Strahlen. Beugungseffekte an Kanten und Ecken werden nicht berücksichtigt. Diese werden durch die geometrische Beugungstheorie (GTD) [KEL 62] oder die verallgemeinerte geometrische Beugungstheorie (UTD) [KOU 74] hinzugefügt. Die durch Mehrfachbeugung (im Strahlweg aufeinander folgende Objekte, typisch in städtischer Umgebung) verursachten Effekte lassen sich durch rekursive Anwendung der GTD/UTD beschreiben. Allerdings nimmt die Anzahl der zu berücksichtigenden Strahlen exponentiell mit der Anzahl der Beugungsprozesse zu.

Die Feldstärke an einem Punkt ergibt sich durch die kohärente Summation aller durch diejenigen Strahlen repräsentierter Felder, welche diesen erreichen. Deshalb eignet sich das Modell sehr gut zur Untersuchung von Gesamtmissionen durch mehrere Basisstationen.

Allerdings müsste für die genaue Bestimmung der Feldstärke angenommen werden können, dass das Verhalten aller Ausbreitungspfade und insbesondere die Phasen aller Teilwellen exakt bekannt sind. Bereits Ungenauigkeiten der Datenbanken in der Größenordnung einer Wellenlänge sowie die zeitlichen Änderungen in der Ausbreitungs Umgebung verursachen erheblichen Schwankungen der Phasen mit der Folge, dass Feldstärkeunterschiede zwischen Simulation und den tatsächlichen Verhältnissen entstehen. Dies kann auch im Hinblick auf die Eignung für den Strahlenschutz insofern umgangen werden, dass man die variierenden Phasen vernachlässigt und lediglich die Leistungen der einzelnen Mehrwegesignale (inkohärente Überlagerung) addiert. Dies entspricht einem maximal zu erreichenden Prognosewert.

Die Rechenzeiten werden vornehmlich durch die Strahlsuche bestimmt und können bei Berücksichtigung von Interaktionen höherer Ordnung schnell sehr hoch werden.

Ein weiteres Problem stellt die Einbeziehung kleiner Objekte (Autos, Laternenpfosten, ...) oder der Vegetation dar. Beide haben einen starken Einfluss auf die lokale Feldstärke bzw. dominieren sie [SPE 95, DEJ 01, WAG 94, RWL 97, JAK 95]. Sollen diese Einflüsse aus Genauigkeitsansprüchen berücksichtigt werden, müssen entsprechende Eingangsdaten zur Verfügung stehen, wobei der Rechenaufwand durch die steigende Anzahl von Interaktionen steigt.

### **1.3.3.2 Feldtheoretische Modellierung**

Feldtheoretische Verfahren werden zwar in der Funknetzplanung nicht eingesetzt. Dennoch seien Sie an dieser Stelle der Vollständigkeit halber erwähnt.

Die genauesten Ergebnisse einer Berechnung ließen sich mit feldtheoretischen Modellen erzielen. Die direkte numerische Lösung der Maxwell'schen Gleichungen mit Hilfe von Integral- oder Differentialgleichungssystemen wird bei Strukturen mit Abmessungen von *wenigen* Wellenlängen erfolgreich eingesetzt (z.B. bei elektronischen Bauteilen, Antennen in Automobilen usw.). Allerdings ist der Aufwand hierfür erheblich. Eine Verwendung für die Berechnungen der Wellenausbreitung in Gebäuden oder gar in Städten benötigt immens viel Rechenleistung und Speicherplatz.

Da der Raum für die Berechnungen in dieser Studie nicht nur auf die unmittelbare Umgebung der Sendeanlagen begrenzt ist, sondern im Bezug zur Wellenlänge ein sehr großes Versorgungsgebiet darstellt, werden die feldtheoretischen Methoden an dieser Stelle nur der Vollständigkeit halber erwähnt (siehe hierzu auch Abschnitt I.3.5).

Ein Überblick über Feldtheoretische Modellierungsmethoden wie zum Beispiel die „Finite Elemente Methode (FEM)“, die „Finite Differenzen Methode (FDM)“, die Finiten Differenzen im Zeitbereich (Finite Difference Time Domain, FDTD) oder die Integralgleichungsmethode (Integral Equations, IE) ist in [BOR 02] zu finden.

### I.3.4 Beurteilung der Eignung der verschiedenen Verfahren

#### I.3.4.1 Zu erwartende Genauigkeiten

Für alle Modelle, die zum Zwecke der Funknetzplanung entwickelt wurden, gilt gemeinhin eine Vorhersagegenauigkeit von 6 dB als ausreichend [COS 99]. In diesem Zusammenhang liefern empirische bzw. semi-empirische Modelle in der Regel Vorhersagen über Mittelwerte innerhalb eines bestimmten Gebietes, da die feinsträumige Struktur des Feldes für die Funknetzplanung nicht von Bedeutung ist. D.h. das Simulationsergebnis entspricht einer Prognose für den über eine gewisse Zeit und/oder einen gewissen Raumbereich gemittelten Wert. Lokal, sowohl zeitlich als auch räumlich, kann die Empfangsleistung größer oder auch kleiner als dieser Mittelwert sein.

Die folgende Tabelle zeigt einen Vergleich zwischen gemessenen und mit verschiedenen Modellen vorhergesagten Feldstärken.

	Mittlerer Fehler [dB]	Standardabweichung [dB]
Strahlenoptisch [KÜR 93]	2	4
Strahlenoptisch [WLL 97]	4	6
Okumura-Hata [KÜR 93]	19	4
COST-WI [ARC 98]	11	8

Tab. I.3.4: Vergleich Messung-Modell für städtischen Bereich

Aus Tabelle I.3.4 und nach [BOR 02] wird ersichtlich, dass die Genauigkeit von empirischen und semi-empirischen Verfahren begrenzt ist. Eine Erhöhung der Genauigkeit ist lediglich bedingt möglich. So können die Parameter der Modelle nur durch umfangreiche Messkampagnen angepasst werden.

In [COI 01] ist ein Vergleich im Hinblick auf eine *Funknetzplanung* zwischen dem Ausbreitungsmodell COST231-Hata und einem strahlenoptischen Verfahren dargestellt. Hierbei hat sich gezeigt, dass das semi-empirische Modell für eine Funknetzplanung für UMTS nicht geeignet ist, da es einen zu optimistischen Prognosewert in Bezug auf die zu erwartenden Interferenzen liefert. Für den Strahlenschutz ist an dieser Stelle interessant, dass die prognostizierte Feldstärke gerade in Bereichen von Straßenschluchten bzw. freien Plätzen unterschätzt wurde.

Die Vorhersagegenauigkeit der analytischen Verfahren ist in erster Linie durch die Qualität der Eingangsdaten bestimmt. Dies bedeutet, dass sich theoretisch mit steigender Qualität der Datenbanken bessere Simulationsergebnisse erzielen lassen. Allerdings zieht dies ggf. eine erhöhte Rechenzeit nach sich. Die Voraussetzungen und Grenzen der analytischen Modelle werden in den beiden nachfolgenden Kapiteln näher untersucht.

#### **I.3.4.2 Voraussetzungen für die Anwendung analytischer Modelle**

Für analytische Modelle müssen in der Regel verschiedene Datenbanken zur Verfügung gestellt werden:

- Geländedaten (Digitales Höhenmodell),
- Gebäudeumrisse und deren Höhen (z. B. Katasterplan),
- Technische Anlagedaten (Leistung, Frequenz, Antennen usw.),
- Genauer Standort der Sendeantenne (z.B. Höhe über dem Boden und Höhe über dem Dach bzw. genaue Position auf dem Dach),
- Materialparameter.

Um die gewünschten präzisen Resultate zu erhalten, müssen die Daten für die Modellierung mit großer Sorgfalt erfasst und eingelesen werden. Die Rasterung sollte genügend grob sein, um die Anzahl der Punkte, für die die Immission berechnet wird, und damit den Rechenaufwand zu begrenzen, aber dabei fein genug bleiben, um eine genaue Modellierung sicherzustellen.

#### **I.3.4.3 Grenzen der analytischen Modellierung**

Für alle Berechnungsmethoden gilt, dass die Genauigkeit und damit der Aussagewert der berechneten Immissionslagen weitgehend von der Qualität der benötigten Eingangsdaten abhängt. Die Grenzen der Modellierung sind damit durch folgende Einschränkungen gegeben:

- Auflösung der Daten: Informationen zur Lage kleiner Objekte oder der Gebäudeinnenstruktur liegen praktisch nicht vor.

- Detaillierungsgrad der Daten: Die Erfassung von Vegetation und baulicher Details wie Erker, Dachformen oder Lage der Fenster erfordert einen sehr hohen Aufwand. Fassaden und Dächer können aus verschiedenen Materialien mit unterschiedlichen elektrischen Eigenschaften bestehen.
- Genauigkeit der Daten: Insbesondere sind die elektrischen Materialparameter, wenn überhaupt, nur relativ ungenau bekannt; Veränderungen der Materialparameter können eine Variation der Simulationsergebnisse von 5 dB [DCF 97] bewirken.
- Aktualität aller Daten: Die Betreiber von UMTS optimieren ihre Netze periodisch. Alle technischen Angaben können folglich nur für die gewisse Zeit als konstant betrachtet werden.
- Meteorologische Verhältnisse: Schnee, Eis oder Regen können nur in der Art Berücksichtigung finden, dass die Reflexionseigenschaften einer nassen oder mit Schnee bedeckten Fläche modelliert werden.
- Räumliche Feinstruktur: Für die Grenzwertbetrachtung sind lokale Feldstärken wichtig; Daher sollte die Rasterung fein genug sein, um eine genaue Modellierung sicherzustellen. Andererseits sollte die Rasterung genügend grob sein, um die Anzahl der Punkte, für die die Immission berechnet wird, und damit den Rechenaufwand zu begrenzen.

Bei der Feldstärkeberechnung in Gebäuden muss zusätzlich berücksichtigt werden, dass neben der Gebäudestruktur auch die Inneneinrichtung die Feldstärkeverteilung beeinflusst. Auch über Veränderungen, hervorgerufen durch anwesende Personen, wurde schon berichtet [LAY 99, BOR 04]. Diese Einschränkungen müssen bei der Interpretation der Ergebnisse mit großer Sorgfalt berücksichtigt werden.

#### **I.3.4.4 Multifrequenzielle Nachbildung der Feldquelle**

Das Interferenzbild bei GSM weist 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 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 5 MHz vergleichsweise große Bandbreite auf. Durch dieses multifrequenzielle Szenario ist theoretisch eine Abschwächung der Interferenzerscheinungen gegeben. Speziell für UMTS wird in [OLI 03] unter gewissen Voraussetzungen eine Minimierung der örtlichen Schwankungen beschrieben. Messtechnische Untersuchungen hierzu sind im Abschnitt III.5.2 im III. Teilbericht vorliegenden Untersuchungsvorhabens dokumentiert.

In der Funknetzplanung spielt laut Aussage der Funknetzplaner von T-Mobile und der Firma LSTelcom (<http://www.lstelcom.com>) die multifrequenzielle Nachbildung der Feldquelle keine

Rolle. Für die Versorgungs- und Interferenzanalysen werden die Feldstärken für Up- bzw. Downlink jeweils auf der mittleren Frequenz berechnet.

Generell ist die multifrequentielle Nachbildung der Feldquelle in keinem oder oben dargestellten Verfahren vorgesehen bzw. integriert. Bei den strahlenoptischen Verfahren zum Beispiel könnte diese insofern angenähert werden, dass eine „breitbandige“ Quelle durch mehrere Quellen mit unterschiedlichen Frequenzen angenähert wird. Da in diesem Fall die Ausbreitungsberechnung für jede Frequenz einzeln durchgeführt werden muss, erhöht sich dementsprechend auch die Rechenzeit mit der Anzahl der zu berechnenden Frequenzen. Entsprechende Untersuchungen wurden im Abschnitt II.3.1.3 im II. Teilbericht durchgeführt.

### **I.3.5 Erfahrungen aus dem vorangegangenen GSM-Projekt**

Die Aufgabenstellung in einem diesen Untersuchungen vorangegangenen BfS-Projekt „Entwicklung von Mess- und Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Exposition der Bevölkerung in der Umgebung von Mobilfunk Basisstationen“ [BOR 05] war in Bezug auf die Berechnungsverfahren ähnlich zu der in diesem Projekt gelagert. Insofern können für vorliegende Studie bereits Teilergebnisse aus den Vorgängeruntersuchungen übernommen werden.

In [BOR 05] hat sich gezeigt, dass das Antennendiagramm der Basisstationsantennen vom jeweils eingestellten elektrischen Downtilt, der Frequenz und der Montageumgebung abhängig ist. Um mit *einer* numerischen Simulation nicht nur eine bezüglich Downtiltwinkel und Frequenz sehr spezifische Momentaufnahme zu erhalten, sondern eine allgemein gültigere Prognose der Immission, ist es sinnvoll ein synthetisiertes Abstrahldiagramm zu verwenden, im dem die verschiedenen Abhängigkeiten berücksichtigt werden. Hierzu ist es notwendig, dass derartig generierte Diagramme in das zu verwendende Softwarepaket importiert werden können. Ferner hat sich in diesem Zusammenhang gezeigt, dass feldtheoretische Verfahren und auch hybride Verfahren (feldtheoretisch + geometrische Optik) in Bezug auf Anwendung, Speicherbedarf, Rechenleistung und Berechnungsraum zu aufwändig sind. Sie erfordern z.B. durch die detailliert zu modellierende Mobilfunkantenne großes Know How und sind insofern nur für Benutzer mit ausreichend Erfahrung (z.B. Antennentechniker) geeignet.

In [BOR 05] hat sich darüber hinaus gezeigt, dass strahlenoptische 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 in [BOR 05] 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. Hierbei ist aber auch zu beachten, dass dann gerade in nLOS-Situationen mit großen Überschätzungen der Feldstärke gerechnet werden muss.

### I.3.6 Fazit

Analytische Modelle liefern auf Kosten von entsprechend höherem Rechen- und Modellierungsaufwand höhere Genauigkeiten verglichen mit der Berechnung „Reine Freiraumausbreitung + 3dB“ bzw. empirischen oder semi-empirischen Verfahren. Solche Modelle beschreiben auch die komplexen Verhältnisse bei mehreren Basisstationen sowie die verschiedenen Aspekte der Wellenausbreitung, einschließlich der Verhältnisse innerhalb von Gebäuden.

Es hat sich in [BOR 05] gezeigt, dass die strahlenoptischen Verfahren vor allem bezüglich des anwendbaren Entfernungsbereiches, des Anwendungsbereiches, der Bedienungs-freundlichkeit, der Eingabedatendetailliertheit und des Rechenaufwandes als gut geeignet erscheinen.

Für vorliegende Aufgabenstellung ist hierbei allerdings noch folgender Punkt zu berücksichtigen: Es sollte in dieser Studie nicht nur die unmittelbare Umgebung einer Basisstation, sondern die gesamte Zelle betrachtet werden. Da bei der Verwendung von strahlenoptischen Verfahren demnach ein relativ großes Areal nachgebildet werden muss, wird die Modellierung entsprechend aufwändiger (alle Häuser innerhalb der betrachteten Zelle müssten modelliert werden). In diesem Zusammenhang ist ferner die Datenbeschaffung zu berücksichtigen. So sind in den Katasterplänen nur die Grundrisse der Gebäude dargestellt. Informationen über die einzelnen Höhen liegen nicht vor.

Als Beispiel sei hier erwähnt, dass in der Katasterdatenbank der Landesvermessungsanstalt allein für das Bundesland NRW bereits über 3,7 Mio. Gebäude erfasst sind. Im Altstadtgebiet von Köln sind auf einer Fläche von einem Quadratkilometer 1779 Gebäudereferenzen gegeben (<http://www.lverma.nrw.de>).

Eine alternative Möglichkeit zur Reduzierung des Aufwandes wäre insofern zu erreichen, dass auch einfache empirische oder semi-empirische Rechenmodelle (z.B. außerhalb der direkten Umgebung der Basisstation) eingesetzt werden.

## **I.4 Messverfahren für UMTS**

### **I.4.1 Einleitung**

#### **I.4.1.1 Grundsätzliche Einteilung von Messaufgabenstellungen**

Messaufgabenstellungen zur Beurteilung der Exposition durch UMTS-Sendeanlagen lassen sich prinzipiell in verschiedene Klassen einteilen:

##### 1. Messungen zur Überprüfung der Einhaltung gesetzlicher Regularien

Solche Zulassungsmessungen können durch nationale Gesetzgeber gefordert sein oder werden zur Schaffung einer Basis für die Risikokommunikation benötigt. Grundlage für die Zulassungsmessungen sind die jeweiligen nationalen Grenzwerte. Hierbei wird ein worst case Ansatz verfolgt, d.h. die maximale Expositionssituation wird untersucht. Der Bereich der Messungen erstreckt sich hauptsächlich auf das unmittelbare Umfeld der Anlage, z.B. wird der festgelegte Sicherheitsabstand messtechnisch überprüft.

##### 2. Messungen auf Anfrage / nach Bedarf

Initiatoren für diese Messungen sind die allgemeine Öffentlichkeit, Bürgerinitiativen, Behörden oder Netzbetreiber. Hierbei wird die Messung an einer definierten Örtlichkeit verlangt, die aber oft nicht den am stärksten exponierten Bereich darstellt. In Abhängigkeit vom Messauftrag kann sowohl die Messung einer speziellen Anlage separat, als auch die Messung der Gesamtexposition durch Hochfrequenzquellen gefordert sein.

##### 3. Vergleichsmessungen

Die Exposition an einem definierten Ort wird mit der Exposition an anderen Orten verglichen oder es erfolgt ein Vergleich der Exposition durch eine Quelle „vor Ort“ mit der „Hintergrundbelastung“ oder mit den Immissionen durch andere Quellen. Bezüglich UMTS-Sendeanlagen ist z.B. ein Vergleich zu den Immissionen durch GSM-Sendeanlagen interessant.

##### 4. Messungen für wissenschaftliche Zwecke

Der wissenschaftliche Hintergrund solcher Messungen kann die allgemeine Risikobewertung, das zeitliche Monitoring der Bevölkerungsexposition oder Messungen zur Expositionserfassung für epidemiologische Studien sein. Neben worst case Ansätzen zur Untersuchung der Immissionsverteilung im Umfeld der Anlage werden hier auch Durchschnittswerte bzw. repräsentative Szenarien gewählt. Es erfolgt nicht generell eine Bestimmung aller Quellen.

Vorliegende Aufgabenstellung stellt eine Kombination verschiedener Kategorien dar: Eine Überprüfung der Grenzwerteinhaltung nach Kategorie 1 ist zwar wünschenswert, allerdings nicht primäres Ziel vorliegenden Projektes, da die Grenzwerteinhaltung bereits im Rahmen des Standortbescheinigungsverfahrens von der BNetzA überprüft wird.

Insbesondere soll das Verfahren nicht nur eine Aussage „Grenzwert überschritten“ oder „Grenzwert eingehalten“ treffen, sondern muss auch in der Lage sein, die Immissionen im Umfeld der Anlage an beliebigen Orten zuverlässig zu bestimmen (Kategorie 2, 3 und 4).

Eine Motivation für das vorliegende Forschungsprojekt stellt sicherlich auch eine Erweiterung der Wissensbasis über die Größe, Verteilung und Erfassbarkeit der elektromagnetischen Immissionen dar, die letztlich auch einer Risikokommunikation und -bewertung dient (Kategorie 1 und 4). Insbesondere werden im Rahmen dieses Projektes auch UMTS-Immissionen mit GSM-Immissionen verglichen. Neben Spitzenwerten werden dabei auch örtliche und zeitlich gemittelte Immissionen erfasst und deren Schwankungsbreite in Vergleich zu den Spitzenwerten untersucht (Kategorie 4).

#### **I.4.1.2 Vorgehensweise bei der Untersuchung der Messverfahren**

Ausgangspunkt für die Beurteilung von existierenden Messverfahren bilden die Anforderungen, die allgemein an Messverfahren zur Ermittlung der Exposition durch UMTS-Sendeanlagen in Innenräumen und im Freien zu stellen sind. Diese Anforderungen werden im Abschnitt I.4.2 definiert.

Basis für die nachfolgende Übersicht über existierende Messverfahren bilden Normen, Empfehlungen oder Entwürfe, die ansatzweise im nationalen und internationalen Rahmen existieren. Abschnitt I.4.3.2 widmet sich diesbezüglich vorhandenen Regularien in Deutschland, die Abschnitte I.4.3.3 und I.4.3.4 stellen internationale Arbeiten vor.

Abschnitt I.4.4 enthält dann eine detailliertere Darstellung und Bewertung der einzelnen Teilaspekte der Messverfahren (Messtechnik, Messdurchführung, Auswertung usw.). In Abschnitt I.4.5 erfolgt die Beurteilung der Eignung der vorhandenen Verfahren im Hinblick auf die in I.4.2 definierten Anforderungen.

### **I.4.2 Anforderungen an Messverfahren**

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. UMTS ist ein interferenzbegrenztes System. Nach [SCHÜ 02] ist bei der UMTS-Funknetzplanung nicht in erster Linie ein Mindestsignalpegel entscheidend, sondern ein Mindest-Signal-Rausch-Verhältnis, wobei unter Rauschen auch Störungen durch andere UMTS-Anlagen (Interferenzen) gefasst werden. Das für eine qualitativ gute Verbindung notwendige Verhältnis wird für den Downlink mit etwa 6,1 dB angegeben. Bei einem in [SCHÜ 02] angesetzten Rauschflur von -108 dBm sowie Downlink-Interferenzen von 3 dB und einem Prozessgewinn von 6 dB ist am Fußpunkt der Antenne des Mobilgerätes zum Erzielen dieses Signal-Rausch-Verhältnisses ein Mindest-

Nutzsignalpegel von etwa -105 dBm notwendig. Bei einem angenommenen Antennengewinn des UMTS-Mobiltelefons von 0 dBi entspricht dies einer Versorgungsfeldstärke von etwa 39 dB $\mu$ V/m (entsprechend 0,00009 V/m bzw.  $2 \cdot 10^{-11}$  W/m<sup>2</sup>) vor dem Mobilgerät.

Dieser Intensitätsbereich stellt hohe Anforderungen an die Empfindlichkeit entsprechender Messgeräte. Insbesondere die Verwendung von Personenschutzdosimetern bzw. in der EMV-Messtechnik verwendeten Feldsonden zur Störfestigkeitsmessung ist hier nicht mehr ausreichend. Vor allem in der direkten Umgebung der Sender werden allerdings wesentlich höhere Feldstärken vorliegen. Hierbei ist auch zu berücksichtigen, dass der einschlägige Grenzwert zum Schutz der Allgemeinbevölkerung in dem durch UMTS belegten Downlink-Frequenzbereich etwa 156 dB $\mu$ V/m beträgt und somit zunächst zu klären ist, welche Empfindlichkeit aus Sicht der Expositionskontrolle für eine messtechnische Erfassung überhaupt relevant ist.

**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 hier 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 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 Grenzwerte [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:** Aus Immissionsuntersuchungen an Mobilfunk-Basisstationen (z.B. [BOR 04]) ist bekannt, dass die Immission vor allem in Innenräumen kleinstskalig von Messort zu Messort beträchtlich schwanken kann. Es wird damit gerechnet, dass dies auch bei UMTS-Sendeanlagen zutrifft. Wie groß die Schwankungen in der Realität sind, wird im Laufe des Projektes untersucht. Vergleiche hierzu auch die Ausführungen in Abschnitt I.4.4.5. Das Messverfahren muss 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 hochqualifiziertes 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.

## I.4.3 Überblick über die Normungssituation

### I.4.3.1 Einleitung

Dieses Kapitel enthält eine Aufstellung von Normen, Normentwürfen, Empfehlungen und anderen relevanten Arbeiten auf dem Gebiet der Messung elektromagnetischer Immissionen von UMTS-Sendeanlagen. Dabei wird zuerst die Situation in Deutschland betrachtet. Anschließend wird die europäische (mit einem Schwerpunkt auf der Schweiz) und US-amerikanische Normungssituation beleuchtet.

Die Überprüfung der einschlägigen Arbeiten wird nach folgenden Kriterien durchgeführt:

- Existiert eine Messvorschrift speziell für die Erfassung von Immissionen durch UMTS-Sendeanlagen?
- Falls nein, existiert eine Vorschrift für die Erfassung von hochfrequenten Immissionen im allgemeinen und lässt sich diese Vorschrift in Teilen auch für die Erfassung der Immissionen durch UMTS-Sendeanlagen anwenden?
- Welche Messgeräte werden definiert? Gibt es eine Rangfolge für den Einsatz unterschiedlicher Messgeräte? Werden Messparameter festgelegt?
- Gibt es Vorgaben für die Auswahl der Messpunkte?
- Vor allem in Innenräumen schwankt die Immission räumlich sehr stark. Ist ein Verfahren zur Ermittlung der maximalen örtlichen Immission beschrieben?
- Wird als maßgeblicher Immissionsmesswert der örtliche Maximalwert verwendet oder erfolgt eine räumliche Mittelung?
- Gibt es Aussagen bezüglich der Messunsicherheit?

Es wird darauf hingewiesen, dass im Abschnitt I.4.3 vorerst nur die Kernaussagen der relevanten nationalen und internationalen Arbeiten in einem Kurzüberblick vorgestellt werden. Die detaillierte Darstellung der einzelnen Aspekte der unterschiedlichen Messverfahren erfolgt ausführlich im Abschnitt I.4.4.

### **I.4.3.2 Normungssituation in Deutschland**

#### 26. BImSchV

Grenzwerte zum Schutz der Allgemeinheit vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch elektromagnetische Felder von fest installierten Hochfrequenzanlagen mit einer Sendeleistung von 10 W EIRP oder mehr werden in Deutschland in der Sechszwanzigsten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV) geregelt [26. BImSchV]. Die 26. BImSchV gilt nur für Funksendeanlagen, die gewerblichen Zwecken dienen oder im Rahmen wirtschaftlicher Unternehmungen Verwendung finden. Deswegen ist diese Verordnung auf UMTS-Mobilfunksendeanlagen voll anwendbar.

Die 26. BImSchV definiert kein konkretes Messverfahren zur Erfassung der Immissionen. Trotzdem finden sich einige für die Messung relevante Anmerkungen: So ist die Immission bei höchster Anlagenauslastung und unter Berücksichtigung der Immission anderer ortsfester Sendeanlagen zu bestimmen. Die Messungen haben am Einwirkungsort mit der stärksten Exposition zu erfolgen. Eine räumliche Mittelung der Messwerte ist nicht erwähnt; lediglich bei Niederfrequenzanlagen sind kleinräumige Überschreitungen gestattet. Bezüglich einer Messvorschrift wird auf den datierten Entwurf der Norm DIN VDE 0848 Teil 1 vom Mai 1995 verwiesen [0848-1\_1995]. Mittlerweile liegt eine aktualisierte Normfassung vom August 2000 vor [0848-1\_2000].

Vom Arbeitskreis „Elektromagnetische Strahlung“ des Länderausschusses für Immissionsschutz wurden Hinweise zur Durchführung dieser Verordnung erarbeitet [LAI 04]. Diese

präzisieren die Angaben der 26. BImSchV um einige messtechnische Details: Bezüglich Messungen und Berechnungen wird freigestellt, ob die Anwendung der 0848 Teil 1 in der Fassung von 1995 oder 2000 erfolgt. Für die Messung können sowohl breitbandige, als auch frequenzselektive Messgeräte eingesetzt werden. Für eine Maximalwertsuche ist die sog. Schwenkmethode anzuwenden (s. unten), allerdings auf einer fixen Höhe von 1,5 m. Der Spektrumanalysator soll im Modus „Maxhold“ betrieben werden. Bezüglich konkreter Messgeräteeinstellungen, auch bezüglich UMTS, wird auf entsprechende Angaben der Reg TP MV 09/EMF/3 (s. unten) verwiesen.

Bezüglich UMTS (FDD) Mobilfunkanlagen kann die Extrapolation auf die höchste betriebliche Anlagenauslastung, sofern keine näheren Betreiberdaten vorliegen, konservativ durch Multiplikation des Feldstärkemesswertes mit einem Faktor 8 erfolgen. Für eine genauere Ermittlung wird eine Codeanalyse empfohlen, mit der die Feldstärke des so genannten CPICH-Codes gemessen wird, auf dessen Basis die Hochrechnung erfolgt. Für weitergehende Betrachtungen wird auf die Schweizer Messempfehlung zu UMTS-Basisstationen (s. unten) verwiesen.

### BEMFV

Mit der „Verordnung über das Nachweisverfahren zur Begrenzung elektromagnetischer Felder (BEMFV)“ [BEMFV] existiert eine Verordnung, die das Nachweisverfahren für ortsfeste Sendeanlagen zur Gewährleistung des Personenschutzes regelt. Die BEMFV ist für ortsfeste UMTS-Sendeanlagen voll anwendbar. In ihr finden sich keine konkreten Hinweise auf Messverfahren; es wird auf die DIN VDE 0848 Teil 1 (Ausgabe 2000) verwiesen. Für die Grenzwertüberprüfung werden die Grenzwerte nach 26. BImSchV bzw. der EU-Ratsempfehlung 1999/519/EG [99/519/EG] angesetzt.

### DIN VDE 0848 Teil 1

Die Norm DIN VDE 0848 Teil 1 [0848-1\_2000] beschreibt Mess- und Berechnungsverfahren zur Beurteilung der Sicherheit in elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern im Frequenzbereich von 0 Hz bis 300 GHz. Allerdings ist sie ihrem Anwendungsbe- reich entsprechend sehr allgemein gehalten.

Bei inhomogenen Feldern, wie sie zum Beispiel in Innenräumen auftreten können, verlangt sie die Messung in drei verschiedenen Höhen. Es ist der Messperson freigestellt, ob frequenzselektive oder breitbandige Messgeräte zum Einsatz kommen. Die Felder sind isotrop zu messen (entweder mit isotroper Sonde oder eindimensionalen Aufnehmern in allen drei orthogonalen Raumrichtungen und nachträglicher Verknüpfung). Konkrete Geräteeinstellungen vor allem für frequenzselektive Geräte, deren Nichtbeachtung eine potenzielle Fehlerquelle darstellt, werden nicht angegeben. Insgesamt wird eingeschätzt, dass die DIN VDE 0848 Teil 1 für die hier vorliegende Aufgabenstellung zu unspezifisch ist und zu viele Freiheitsgrade bezüglich der Messung offen lässt.

### 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 BNetzA 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](http://emf.bundesnetzagentur.de)) dokumentiert.

Der zu untersuchende Frequenzbereich erstreckt sich von 9 kHz bis 3 GHz und umfasst somit neben anderen Hochfrequenzsendeanlagen auch UMTS-Sendeanlagen.

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. Hervorzuheben ist hier, dass in Abhängigkeit vom zu untersuchenden Frequenzbereich konkrete Einstellparameter des Spektrumanalysators angegeben werden. Das festgelegte Vorgehen zur Maximierung der Immissionen innerhalb eines begrenzten Volumens (feststehende Höhe der Messantenne von 1,5 m, Drehung der Antenne) ist primär für Messungen im Freien tauglich und nicht ohne weiteres auf die Messung in Innenräumen übertragbar.

Unter Abschnitt 4.2.2 der MV 09 finden sich unter „Besondere Aussendungen“ konkrete Messhinweise für die Erfassung von UMTS-Signalen. Insbesondere wird hier darauf verwiesen, dass diese Signale mit einer der Signalbandbreite entsprechenden Auflösungsbandbreite (hier 5 MHz) analysiert werden müssen. Ist die Bandbreite des Messgerätes nicht ausreichend groß, darf mit einer geringeren Bandbreite gemessen werden. Die Messwerte sind dann mit einem das Verhältnis von Signal- und Messbandbreite berücksichtigenden Faktor zu korrigieren.

Der Spektrumanalysator ist mit einem Spitzenwert-Detektor (Peak-Detektor, aus den Messwerten, die einem Bildschirmpixel auf dem Display des Spektrumanalysators zugeordnet sind, wird derjenige mit dem höchsten Pegel ausgewählt und angezeigt) im Maxhold-Modus zu betreiben.

Insgesamt kann eingeschätzt werden, dass die Messanweisung der BNetzA wesentlich detailliertere Angaben gerade bezüglich konkreter Einstellungen der Messgeräte beinhaltet als z.B. die Ausführungen der DIN VDE 0848 Teil 1. Diese Vorgaben werden im weiteren Verlauf des Projektes auf ihre Anwendbarkeit für vorliegende Aufgabenstellung hin untersucht.

Es muss berücksichtigt werden, dass die RegTP 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. 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 (Gesamtmission) angegeben wird.

### BGV/BGR

Mit der BG-Vorschrift BGV B11 Unfallverhütungsvorschrift Elektromagnetische Felder [BGV] bzw. den BG-Regeln BGR B11 Elektromagnetische Felder [BGR] bestehen weitere Regeln bezüglich des Personenschutzes in elektromagnetischen Feldern, hier jedoch primär am Arbeitsplatz im Sinne einer Arbeitsschutz- und/oder Unfallverhütungsvorschrift. Wohingegen in der BGV B11 keine Angaben zu Messverfahren enthalten sind, verweist die BGR B11 auf die DIN VDE 0848 Teil 1. Auch hier wird die Messung bei der maximal auftretenden betrieblichen Leistung der Anlage gefordert bzw. es ist eine entsprechende Hochrechnung der gemessenen Werte vorzunehmen. Die Vorschriften sind sehr stark auf Arbeitsplätze orientiert; d.h. die Messungen haben ohne örtliche Maximalwertsuche an einem festen Ort zu erfolgen. Für Steh- und Sitzarbeitsplätze sind Messebenen vorgegeben; es ist jedoch keine örtliche Mittelung der Messwerte durchzuführen. Für die Immissionen durch UMTS-Sendeanlagen sind keine speziellen Messvorgaben enthalten.

### **I.4.3.3 Normungssituation in Europa**

Zusätzlich zu den nationalen Normungsbestrebungen gibt es relevante Aktivitäten bezüglich Messverfahren elektromagnetischer Felder auf europäischer Ebene. Diese werden im folgenden vorgestellt. Zusätzlich zu gesamteuropäischen Normungsvorhaben, z.B. im Rahmen der CENELEC, wurden dabei primär diejenigen Länder untersucht, die nicht nur Bestimmungen zur Messung hochfrequenter Immissionen im allgemeinen, sondern spezifische Vorschriften zur Erfassung von UMTS-Immissionen entwickelt haben. Solche Vorschriften existieren in erster Linie in der Schweiz, deren Arbeiten in diesem Bereich, wie schon vormals für GSM-Sendeanlagen, im europäischen Raum eine besondere Stellung einnehmen.

#### **I.4.3.3.1 Gesamteuropäische Normung**

##### EU-Ratsempfehlung 99/519/EG

Personenschutzgrenzwerte für die Allgemeinbevölkerung im europäischen Rahmen werden in der EU-Ratsempfehlung 99/519/EG „Empfehlung des Rates vom 12. Juli 1999 zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern (0 Hz – 300 GHz)“ [99/519/EG] empfohlen. In der Ratsempfehlung gibt es jedoch keine Hinweise auf Messverfahren.

##### EN-Vornorm prEN 50413

Mit der prEN 50413 „Basic standard on measurement and calculation procedures for human exposure to electric, magnetic and electromagnetic fields (0 Hz – 300 GHz)“ [prEN 50413] soll eine Grundnorm entstehen, die in etwa vergleichbar mit der DIN VDE 0848 Teil 1 ist. Es ist geplant, dass die EN 50413 nach erfolgter Endabstimmung die DIN VDE 0848 Teil 1 ablöst. Die prEN 50413 ist eine bezüglich der Anlagenart nicht spezifische Norm, die allerdings grundlegende Anforderungen an Messungen definiert. So ist z.B. sicherzustellen, dass

der Maximalwert gemessen wird, allerdings unter normalen Betriebsbedingungen der Sendeanlage (keine Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung). Die Maximalwertsuche kann entweder durch vorausgehende Übersichtsmessungen in den die Quelle umgebenden Bereichen erfolgen oder durch Abtastung einer zwei- oder dreidimensionalen Punktmatrix. In demjenigen Bereich, in dem das Maximum festgestellt wird, sind detaillierte Messungen durchzuführen.

Die Messung kann entweder mit Breitbandmessgeräten oder frequenzselektiven Messgeräten (Spektrumanalysatoren oder Messempfänger) erfolgen.

#### EN-Normen EN 50383, EN 50384 und EN 50385

Speziell für die Messungen an Basisstationen zugeschnitten sind die Normen EN 50383, EN 50384 und EN 50385. So definiert die EN 50383 „Basic standard for the calculation and measurement of electromagnetic field strength and SAR related to human exposure from radio base stations and fixed terminal stations for wireless telecommunication systems (110 MHz - 40 GHz)“ [EN 50383] Mess- und Berechnungsverfahren für die Immission von Mobilfunk-Basisstationen. Diese Norm ist allerdings für Messungen der Immission *vor Ort* ungeeignet. Hier geht es vielmehr um Ermittlung einer Konformitätsgrenze (compliance boundary), also eines Volumens, außerhalb dessen für jeden Untersuchungspunkt angenommen wird, dass er die Anforderungen zur Sicherheit von Personen in hochfrequenten elektromagnetischen Feldern einhält. Außerhalb dieser Konformitätsgrenze werden unabhängig von der Zeitdauer der Exposition die Basisgrenzwerte von den Expositionspegeln nicht überschritten. Die Konformitätsgrenze kann dabei durch Berechnungen oder durch Messungen bestimmt werden. Messungen erfolgen dabei an einer isolierten Sendeantenne und nicht am realen Betriebsort der Antenne, sondern in einer Laborumgebung (z.B. reflexionsarme Absorberkammer). Die Sendeantenne wird mit einem künstlichen Eingangssignal, z.B. einem CW-Signal, gespeist.

Die EN 50384 und EN 50385 sind die entsprechenden Produktnormen für berufliche Exposition bzw. Exposition der Allgemeinheit.

Alle drei Normen sind für Deutschland auch als Deutschen Norm DIN VDE 0848 Teil 383-385 gültig.

#### EN-Vornormen prEN50400 und prEN 50401

Demgegenüber definiert 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] Mess- und Berechnungsverfahren *bei der Inbetriebnahme* der Anlage. Hierbei wird verifiziert, ob die Basisstation die Grenzwerte für die Allgemeinbevölkerung in allgemein zugänglichen Bereichen *auch im operativen Betrieb* einhält. Dies ist deswegen sinnvoll, da die bei Anwendung der EN 50383 unter Laborbedingungen ermittelte Konformitätsgrenze aufgrund von besonderen Gegebenheiten vor Ort (z.B. reflektierende Objekte in unmittelbarer Nähe der Sendeanlage, Immissionsbeiträge anderer Sendeanlagen) gegeben-

nenfalls erweitert werden muss. Die Vornorm prEN 50401 [prEN 50401] ist die entsprechende Produktnorm zur prEN 50400.

Zur immissionsbezogenen Abgrenzung von unterschiedlichen örtlichen Bereichen im Umfeld der Sendeanlage sowie zur Überprüfung der Einhaltung der Grenzwerte sind neben Berechnungsverfahren auch Messverfahren definiert. Es können Breitbandverfahren und frequenzselektive Messverfahren eingesetzt werden. Die Messungen sind bei maximaler Anlagenauslastung durchzuführen; andernfalls sind die Messwerte zu extrapolieren. Eine entsprechende Handlungsanweisung für UMTS wird jedoch nicht beschrieben.

Bei Messungen mit frequenzselektiven Geräten sind definierte Angaben zu internen Geräteeinstellungen enthalten. So wird beispielsweise für UMTS eine Auflösebandbreite von 5 MHz und eine Mindest-Videobandbreite von 3 MHz vorgegeben. Im Falle von kleineren Auflösebandbreiten werden Kanalleistungsmessungen (channel power) vorgeschlagen (siehe unten). Bei Signalen mit einem hohen Crestfaktor, wie z.B. UMTS-Signalen, wird von der Verwendung eines Peak-Detektors abgeraten (dies ist damit anders als bei der BNetzA-Messvorschrift).

Außerdem ist ein Mindestabstand des Messgerätes zu Objekten im Raum bzw. Personen vorgegeben. Der maximale horizontale Abstand der Messorte beträgt 1 m. An jedem Messort wird die Immission auf drei Höhen ermittelt (1,1 m, 1,5 m und 1,7 m über dem Boden). Der maßgebliche Messwert ist das *Maximum* aus den drei Messwerten. Dies ist insofern bedeutsam, da in früheren Fassungen dieses Normentwurfs unter bestimmten Umständen eine *Mittelung* über die drei Punkte oder sogar über eine aus sechs Punkten bestehende Ebene vorgegeben war.

Außerdem sind Hinweise zur Berechnung der Messunsicherheit angegeben.

#### CEPT ECC Recommendation (02)04

Schließlich existiert mit der CEPT ECC Recommendation „Measuring non-ionising radiation (9 kHz – 300 GHz)“ [CEPT 03] eine Empfehlung, die die verschiedenen Messverfahren der CEPT-Länder für elektromagnetische Immissionen im Frequenzbereich 9 kHz bis 300 GHz vereinheitlichen soll. Die Messempfehlung ist zwar nicht speziell auf UMTS-Basisstationen fixiert, enthält im Anhang aber spezielle Anweisungen für die Messung von UMTS-Immissionen. So werden beispielsweise für den Fall, dass der Spektrumanalysator eine zu geringe Bandbreite zur vollständigen Erfassung der Signale aufweist, Kanalleistungsmessungen (channel power) empfohlen.

Allgemein erlaubt die CEPT Recommendation alleinige Messungen von elektrischer Feldstärke (E) oder magnetischer Feldstärke (H) schon bei Abständen von einer Wellenlänge vom Sender. Messpunkte sind die am stärksten exponierten Orte, an denen sich Personen über längere Zeit aufhalten. Der Expositionsgrad wird durch Vormessungen oder theoretische Abschätzungen beurteilt. Die Messungen sollen an jeweils einem Punkt in 1,5 m Höhe durchgeführt werden. Sofern der Messwert eine sog. „Entscheidungsschwelle“ (Schwelle x dB unter dem Grenzwert, in Abhängigkeit von der Messunsicherheit) erreicht oder überschreitet, wird die Messung an zwei Punkten wiederholt, die sich in 1,1 m und 1,7 m Höhe

unter bzw. über dem 1,5 m hohen Messpunkt befinden. Das Ergebnis wird über die drei Punkte gemittelt. Es werden drei Messfälle diskutiert:

1. Ein Kurzüberblick ist durchzuführen, sofern die Gesamtimmission durch alle Sendeanlagen das Messziel ist. Hierfür sind Breitbandmessgeräte mit isotropen Sonden einzusetzen.
2. Ein variabler Frequenzscan ist durchzuführen, wenn die Immissionspegel nach Frequenz unterschieden werden sollen. Hierzu sind Spektrumanalysatoren bzw. Messempfänger mit geeigneten Empfangsantennen zu verwenden. Das Messgerät ist mit einem Peak Detektor in der Betriebsart „Maxhold“ zu betreiben. Die Antenne muss in horizontaler und vertikaler Polarisierung verwendet werden. Angaben zu Maximierungsmethoden sind nicht enthalten.
3. Eine detaillierte Untersuchung ist dann durchzuführen, wenn die ersten beiden Methoden nicht anwendbar sind. Beispiele für die Anwendung sind Nahfeldmessungen, die Messung starker elektrischer oder magnetischer Felder sowie Nicht-Standard Messungen (gepulst, breitband, diskontinuierliche Signale, ...). Obwohl nicht explizit erwähnt, kann UMTS hierunter eingegliedert werden. Eine Maximierungsroutine ist nicht beschrieben. Die Messdauer bei zeitlich schwankenden Immissionen soll sich nach der verwendeten Grenzwertnorm richten; im Falle der EU-Ratsempfehlung 99/519/EG wären dies 6 Minuten.

Außerdem sind Angaben zu Messunsicherheiten enthalten.

#### **1.4.3.3.2 Normung in der Schweiz**

Auf europäischer Länderebene sind im Hinblick auf die Entwicklung von spezifischen UMTS-Messverfahren insbesondere die Arbeiten aus der Schweiz hervorzuheben. Seit September 2003 liegt hierzu vom Schweizerischen Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) und dem Bundesamt für Metrologie und Akkreditierung (METAS) ein Entwurf einer Messempfehlung für die Erfassung der Immission von Mobilfunk-Basisstationen (UMTS-FDD) vor [BUWAL 03]. Basis dieses Entwurfs war eine Studie der Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana (SUPSI) im Auftrag des BUWAL [SUPSI 04]. In der Studie wurde anhand eines Vergleichs mit den Ergebnissen von hoch aufgelösten Punktrastermessungen sowohl die Eignung der Schwenkmethode bei UMTS-Immissionsmessungen untersucht und bestätigt, als auch unterschiedliche gerätespezifische Messmethodiken untersucht und an mehreren Geräten unterschiedlicher Hersteller verifiziert.

Die Ergebnisse der Studie wurden im Entwurf zur Messempfehlung von BUWAL und METAS berücksichtigt: Mit der breitbandigen, der spektralen und der codeselektiven Messung wurden drei taugliche Messprinzipien in die Empfehlung aufgenommen.

Die breitbandige Messung dient hierbei als orientierende Messung. Es wird mit einer Breitbandsonde gemessen, die die Strahlung in einem breiten Frequenzbereich erfasst und keine Identifikation der einzelnen Strahlungsanteile erlaubt. Eine Extrapolation auf den maximalen Anlagenzustand ist aufgrund nicht vorhandener Separation der UMTS-Immissionen der Anlage vor Ort von anderen hochfrequenten Immissionen sowie mangels Kenntnis der

momentanen Auslastung der Anlage nicht exakt, sondern nur als worst case möglich. Mit der breitbandigen Messung lässt sich deswegen grundsätzlich nur die Einhaltung des Grenzwertes nachweisen, nicht aber dessen Überschreitung.

Auch die spektrale Messung wird als orientierende Messung klassifiziert. Im Gegensatz zur breitbandigen Messung können UMTS-Signale eines Betreibers von UMTS-Signalen anderer Betreiber sowie von anderen hochfrequenten Signalen separiert werden. Nicht möglich ist jedoch eine Unterscheidung der UMTS-Immissionsanteile zwischen unterschiedlichen Anlagen oder unterschiedlichen Sektoren einer Anlage eines Betreibers, da diese alle ein und dieselbe Frequenz verwenden. Da bei einer operativen Anlage unter Verkehrslast frequenzselektiv ebenfalls keine Möglichkeit besteht, eine exakte Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung vorzunehmen, ist solch eine Extrapolation nur als worst case möglich, indem angenommen wird, dass die momentan gemessene Immission sich nur aus der Immission durch die permanent vorhandenen Signalisierungskanäle zusammensetzt. Operativer Sprach- und Datenverkehr wird somit als Signalisierung gerechnet; dies führt bei einer Extrapolation zu einer Überschätzung des maximalen Betriebszustandes, der vom Verkehrsaufkommen zur Zeit der Messung abhängt. Mit einer spektralen Messung lässt sich deswegen ebenfalls grundsätzlich nur die Einhaltung des Grenzwertes nachweisen, nicht aber dessen Überschreitung.

Die codeselektive Messung wird als Referenzmethode klassifiziert, welche im Zweifelsfall Vorrang vor den beiden anderen Methoden hat. Es wird hierbei selektiv die zeitlich konstante Immission durch den so genannten primären CPICH (Common Pilot Channel) der Anlage gemessen. Zu diesem Zweck wird ein Messgerät eingesetzt, welches das UMTS-Signal im Codebereich darstellen (dekodieren) kann und dann selektiv den Anteil der einzelnen primären CPICH detektieren kann. Da derzeit die Leistung des primären CPICH zur maximalen Sendeleistung einer Zelle in einem festen Zusammenhang steht, ist auf dieser Basis eine exakte Hochrechnung auf den maximalen Betriebszustand möglich. Da hierfür die eingestellten Leistungen der primären CPICH (bzw. das Verhältnis zwischen Leistung des CPICH und maximaler Sendeleistung der Zelle) bekannt sein müssen, ist eine Mitarbeit der Netzbetreiber unerlässlich.

Bei der UMTS-Messempfehlung muss beachtet werden, dass primäres Anwendungsgebiet nicht die Ermittlung eines konkret vorliegenden Immissionswertes ist, sondern eine Überprüfung, in wieweit an den Messorten Grenzwerte eingehalten oder überschritten sind. Insofern sind, wenn auch mit den genannten Einschränkungen, frequenzselektive sowie Breitbandverfahren für diese Aufgabenstellung einsetzbar. In wieweit diese Verfahren auch hinreichend genaue Werte für die vorliegende Aufgabenstellung liefern können, wird im II. Teilbericht vorliegenden Untersuchungsvorhabens geklärt.

Laut [BUWAL 03] soll an einem Messpunkt grundsätzlich die höchste im Raum vorherrschende Immission ermittelt werden. Zu diesem Zweck ist die Schwenkmethode anzuwenden, wobei ein Abstand der Antenne von mindestens 0,5 m zu Wänden, Boden, Decke und Mobiliar einzuhalten ist. Mittelungen der Immission über mehrere örtlich getrennte Messpunkte sind nicht zulässig. Es ist eine Anleitung zur Ermittlung der Messunsicherheit enthalten; die Messunsicherheit wird nicht zu den Messergebnissen addiert.

#### **I.4.3.4 Normungssituation in den USA**

Grenzwerte zum Personenschutz werden in den USA im OET-Bulletin 65 [FCC 97] und in der IEEE C95.1 [IEEE C95.1] geregelt. Erwähnenswert hierbei ist, dass laut [IEEE C95.1] bei inhomogenen Feldern die an einem festen Ort vorliegenden Feldstärke- bzw. Leistungsflussdichtewerte die (abgeleiteten) Grenzwerte übersteigen dürfen, solange der räumliche Mittelwert unterhalb der Grenzwerte bleibt. Hierbei ist die räumliche Mittelung über eine Fläche, die äquivalent mit dem vertikalen Körperquerschnitt ist (Projektionsfläche), zu bilden.

Im OET-Bulletin 65 ist ein eigenes Messtechnik-Kapitel enthalten, das aber eher allgemeine Aussagen enthält. Immerhin sind aber ausführliche Anforderungen an Messgeräte sowie Hinweise zu Fehlerquellen bei der Messung enthalten.

Bezüglich der Messung wird explizit auf die IEEE C95.3 verwiesen [IEEE C95.3]. Diese ist ein allgemeiner Messstandard für elektromagnetische Felder, vergleichbar z.B. mit der deutschen DIN VDE 0848 Teil 1. Die IEEE C95.3 geht auf prinzipielle Messprobleme ein, die zu beachten sind (Abstand, Polarisation, Nahfeld/Fernfeld, Kabelführung, ...).

Im Falle des Vorhandenseins einer dominanten Quelle ist wegen der Mehrwegeausbreitung die Messung an mehreren Messpunkten innerhalb einer Fläche mit 1 m oder 2 m Kantenlänge durchzuführen. Hierbei sollte ein Mindestabstand von 20 cm zu reflektierenden Objekten eingehalten werden. Die Messwerte sind zu mitteln und mit den Grenzwerten zu vergleichen. Als Messgeräte sind frequenzselektive Geräte oder Breitbandsonden einzusetzen.

Im Falle des Vorhandenseins mehrerer Quellen mit unbekanntem Sendeparametern sind die Messpunkte über ein dreidimensionales Gitter mit 1 m Abstand zwischen den Gitterpunkten aufzunehmen. Hier soll ein Breitbandmessgerät mit isotroper Sonde verwendet werden.

### **I.4.4 Beschreibung der vorhandenen Messverfahren**

#### **I.4.4.1 Grundsätzliche Messverfahren**

Bei der Messung hochfrequenter Immissionen wird grundsätzlich zwischen breitbandigen, frequenzselektiven (spektralen) und codeselektiven Messverfahren unterschieden.

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.

Demgegenüber kann durch den Einsatz frequenzselektiver Verfahren 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 derzeit bei UMTS alle Anlagen eines Betreibers auf derselben Frequenz (Gleichwellennetz), so dass hier keine emittentenbezogene Trennung möglich ist.

Um die unterschiedlichen Anlagen eines Betreibers separieren zu können, müssen codeselektive Verfahren eingesetzt werden. Mit diesen ist es möglich, die Immission unterschiedlicher Anlagen bzw. unterschiedlicher Sektoren anhand der unterschiedlichen Scramblingcodes voneinander zu trennen.

Für breitbandige Messungen werden Handmessgeräte mit Breitbandsonden eingesetzt. Bei frequenzselektiven Messungen finden üblicherweise Spektrumanalysatoren oder Messempfänger sowie passende Empfangsantennen und HF-Kabel Verwendung. Codeselektive Messgeräte gibt es als Spektrumanalysatoren mit Dekodier-Option und als eigenständige, abgesetzte Drivetester. Die jeweiligen Messgeräte und Hilfsmittel werden in Abschnitt I.4.4.3 ausführlich vorgestellt.

In einigen der vorgestellten Normen konzentriert sich der Einsatz der breitbandigen Sonden auf drei Gebiete:

1. Übersichtsmessungen,
2. Ermittlung des am höchsten exponierten Ortes, an dem dann eine frequenzselektive Feinmessung durchgeführt wird,
3. Messungen in unmittelbarer Nähe der Sendeanlage (Bereich des Sicherheitsabstandes). Dort ist davon auszugehen (bzw. mit einem frequenzselektiven Messgerät zu überprüfen), dass die Immission durch die Sendeanlage vor Ort gegenüber Immissionen von umliegenden Sendeanlagen dominiert. Somit ist eine frequenzmäßige Aufspaltung der Gesamtmission nicht mehr notwendig.

Die Dominanz der Immissionen der Anlage vor Ort ist jedoch bei Messungen an beliebigen Orten im Umfeld der Anlage nicht immer gegeben, da oftmals die Immissionen von anderen Sendeanlagen (DECT-Telefone in der Wohnung, umliegende Rundfunk- oder Fernsehsender, umliegende GSM-Mobilfunkanlagen) gleich groß oder höher als die Immissionen der UMTS-Sendeanlagen sein können.

Heutzutage verfügbare Breitbandmessgeräte sind zwar empfindlich genug, um Feldstärkewerte in der Größenordnung der Grenzwerte sicher detektieren zu können. Feldintensitäten von unter 1 V/m werden aber oftmals gar nicht bzw. inkorrekt angezeigt. In Abhängigkeit vom Hersteller existieren stellenweise auch Spezialsonden mit höheren Empfindlichkeiten, z.B. 0,2 V/m. Diese Empfindlichkeit erscheint zwar zur reinen Grenzwertüberprüfung völlig ausreichend. Allerdings ist die vorliegende Aufgabenstellungen so ausgerichtet, dass die tatsächlich vorhandene Immission an beliebigen Orten im Umfeld der Sendeanlage ermittelt werden soll, unabhängig davon, ob und wie weit sie unter dem Grenzwert liegt.

Dem gegenüber sind Spektrumanalysatoren sowie codeselektive Messgeräte in der Regel so empfindlich, dass unter Verwendung von geeigneten Richtantennen Immissionen gemessen werden können, die je nach Frequenzbereich bezüglich der elektrischen Leistungsflussdichte um mindestens acht Größenordnungen unter den einschlägigen Grenzwerten liegen [BOR 96]. In Zusammenhang mit ihrer Selektivität sind sie daher bevorzugt für die Detailmessungen einzusetzen. In wieweit diese Empfindlichkeit für eine zuverlässige Ermittlung der Immissionen an beliebigen Orten im gesamten Versorgungsbereich von UMTS-Anlagen ausreicht, wird im II. Teilbericht vorliegenden Forschungsprojektes untersucht.

Den Vorteilen der selektiven Verfahren (Frequenz- bzw. Codeselektivität, Empfindlichkeit) steht ein deutlicher Nachteil gegenüber: Selektive Messungen sind oftmals ungleich aufwändiger als breitbandige Messungen. Das betrifft sowohl die finanzielle Seite des Messequipments, die Messdurchführung sowie das erforderliche Know how der mit der Messung Beauftragten. Überblicksmessungen oder das Absuchen großer Areale auf Maximalwerte mit selektiven Verfahren stellen beispielsweise oft einen beträchtlichen Aufwand dar, der oftmals nicht praktikabel ist. Dem gegenüber sind Breitbandsonden handlich, schnell und unkompliziert einsetzbar. Es ist daher von der konkreten Messaufgabenstellung abhängig, ob Breitbandsonden, selektive Geräte oder eine Kombination von beiden einzusetzen sind.

#### **I.4.4.2 Auswahl der Messpunkte**

Die Auswahl der Messpunkte richtet sich nach der Frage, wie die Messaufgabenstellung definiert ist. Hierfür gibt es im wesentlichen zwei Ansatzpunkte:

1. Der Messort ist im Vorhinein fest definiert, z.B. ein Arbeitsplatz oder ein Zimmer. Unter Umständen ist hierbei sogar der räumliche Bereich noch weiter eingegrenzt, z.B. auf einen Punkt. In diesem Fall braucht der Messort nicht gesondert ausgewählt zu werden.
2. Der Messort ist vor Beginn der Messungen noch nicht definiert, sondern erst festzulegen. Es soll z.B. überprüft werden, ob an irgendeiner (allgemein zugänglichen) Stelle im Umfeld einer Sendeanlage die Grenzwerte überschritten werden oder es soll der Sicherheitsabstand ermittelt oder das Maximum der Immission im Umfeld der Anlage an allgemeinen Aufenthaltsorten von Personen bestimmt werden.

Sind die Messpunkte, so wie im letzteren Falle, erst noch zu bestimmen, bestehen grundsätzlich folgende Möglichkeiten:

- Überblicksmessungen: Mit einem breitbandigen Feldstärkemessgerät können potenzielle Messpunkte vorab überprüft werden. Obwohl mit dem Feldstärkemessgerät, wie bereits in Abschnitt I.4.4.1 beschrieben, keine Feinmessungen möglich sind, eignen sie sich jedoch hervorragend dazu, einen Überblick über die Immissionsverteilung zu bekommen und diejenigen Orte mit maximaler Immission zu bestimmen, die in einem nachfolgenden Durchlauf mit dem selektiven Gerät fein vermessen werden.
- Orte mit potenziell hoher Immission: Aus der Sendertopologie oder aus der Erfahrung des Messpersonals sind diejenigen Orte zu bestimmen, an denen mit einer maximalen Immission zu rechnen ist. Dies ist, insbesondere bei Vorhandensein mehrerer Sender bzw. bei größerer Entfernung vom Sender, eine nicht triviale Aufgabe. In den Normungsansätzen sind konkrete, praktisch umsetzbare Handlungsanweisungen hierfür nicht enthalten.
- Sensible Orte: Obwohl nicht immer durch das Vorhandensein von maximalen Immissionen begründet, sondern eher der öffentlichen Diskussion zu dieser Thematik Rechnung tragend, ist oftmals eine Auswahl des Messpunktes an sensiblen Orten sinnvoll. Hierunter sind zu verstehen:
  - Kindergärten, Kindertagesstätten, Schulen,
  - Seniorenheime, Pflegeheime,

- Krankenhäuser,
- die Bereiche innerhalb von Wohnungen, an denen man sich nicht nur vorübergehend aufhält, also z.B. Schlaf-, Kinder- und Wohnzimmer.

### I.4.4.3 Messgeräte und Hilfsmittel

#### I.4.4.3.1 Breitbandiges Messverfahren

Messgeräte zur breitbandigen Messung bestehen in der Regel aus einer Anzeigeeinheit, auf die eine je nach Frequenzbereich und Feldart (elektrisches Feld E oder magnetisches Feld H) passende Messsonde aufgesteckt wird. Wichtig ist, dass die Sonde den Frequenzbereich der relevanten zu erfassenden Quellen umfassen muss. Für den Hochfrequenzbereich werden oft Sonden verwendet, die mindestens den Frequenzbereich von 100 kHz bis 2,5 GHz abdecken. In der Regel ist eine E-Feld Sonde hinreichend; auf diese Problematik wird später detailliert eingegangen.

Bild I.4.1 zeigt als Beispiel für ein breitbandiges Messgerät das Gerät EMR-300 der Firma Narda Safety Test Solutions mit aufgesteckter E-Feldsonde Typ 8.

Als Empfangselemente werden bei E-Feld Sonden im Sondenkopf in der Regel elektrisch kurze Dipole eingesetzt, wobei die Empfangsspannung am Dipol detektiert und über eine hochohmige Ableitung der Auswerte- bzw. Anzeigeeinheit zugeführt wird.

Sonden unterscheiden sich grundsätzlich danach, ob sie nur eine Raumkomponente des (elektrischen) Feldes aufnehmen oder eine isotrope Feldmessung vornehmen. Isotrope Sonden sind in der Regel praktikabler, da hierbei die Messung der Feldstärke in den drei orthogonalen Raumrichtungen und die Ermittlung der resultierenden Feldstärke automatisch vorgenommen wird. Dadurch vereinfacht sich der Messaufwand beträchtlich.



Bild I.4.1: Breitbandiges Feldstärkemessgerät mit aufgesteckter Messsonde

Auf der Geräteanzeige wird, jeweils wählbar als Effektiv- oder Spitzenwert, die (elektrische) Feldstärke angezeigt. Bei einigen Geräten kann eine Umschaltung der Anzeige auf die elektrische Leistungsflussdichte erfolgen.

Die absoluten Anzeigen von Breitbandsonden sollten bei komplexen Signalen mit hohem Crestfaktor immer besonders kritisch betrachtet werden, da es hier zu deutlichen pegelabhängigen Fehlbewertungen der Exposition kommen kann [KEL 96]. Hierzu werden im II. Teilbericht Untersuchungen vorgestellt.

#### **1.4.4.3.2 Frequenzselektives Messverfahren**

Für die Durchführung von frequenzselektiven Messungen wird benötigt:

- ein Spektrumanalysator oder Messempfänger,
- eine auf den zu untersuchenden Frequenzbereich abgestimmte Empfangsantenne,
- HF-Kabel zur Verbindung der Antenne mit dem Spektrumanalysator,
- ggf. Speichermedien zum Abspeichern der aufgenommenen Spektren.

Mit der Antenne wird dem elektromagnetischen Strahlungsfeld Energie entnommen und über das Kabel dem Spektrumanalysator zugeleitet. Mit diesem wird die Empfangsleistung spektral aufgespalten, d.h. es wird bestimmt, wie groß die gemessenen Immissionen bei welcher Frequenz sind.



Bild I.4.2: Frequenzselektives Messverfahren mit Spektrumanalysator und Messantenne

Vereinfacht kann man sich diese Aufspaltung im Spektrumanalysator so vorstellen, dass im gesamten eingestellten Frequenzbereich ein Filter mit einer bestimmten Bandbreite („Auflösebandbreite“, RBW) den Frequenzbereich durchläuft. Bei jeder Frequenz wird derjenige Beitrag, der durch das Filter umfasst wird, als Anzeigewert dargestellt. Gerade die Messun-

gen mit dem Spektrumanalysator verlangen Kenntnisse der Signalcharakteristika der zu messenden Immission sowie ein Verständnis der grundlegenden Funktionsweise eines Spektrumanalysators. Werden Messparameter falsch gewählt, können damit die Immissionen wesentlich fehlerbewertet werden.

Selbstverständlich muss der Spektrumanalysator bzw. Messempfänger für den zu untersuchenden Frequenzbereich geeignet sein. Gut einsetzbar für vorliegende Aufgabenstellung sind beispielsweise Geräte, die den Frequenzbereich von 9 kHz bis 3 GHz umfassen.

Auch das Hochfrequenzkabel und vor allem die Empfangsantennen müssen für den zu untersuchenden Frequenzbereich geeignet sein. Als Empfangsantennen für den durch UMTS-Sendeanlagen abgedeckten Frequenzbereich (2110 bis 2170 MHz) kommen prinzipiell Richtantennen, wie z.B. logarithmisch-periodische Antennen, oder auch dipolartige Antennen mit schwacher Richtwirkung, wie z.B. bikonische Antennen, in Frage. Richtantennen haben den Vorteil, dass die Beeinflussung durch den Messenden nicht so stark ist wie bei Antennen mit schwacher Richtwirkung. Dafür gestaltet sich hier die Maximalwertsuche der Immission etwas aufwändiger. Außerdem ist streng genommen nur mit dipolartigen Antennen eine Bestimmung der Lage des Feldvektors im Raum aus aufeinander folgenden Messungen in den drei orthogonalen Raumkomponenten möglich.

#### **1.4.4.3 Codeselektives Messverfahren**

Derzeit gibt es zwei Arten von codeselektiven Messgeräten: Zum einen können Spektrumanalysatoren, die mit einer speziellen W-CDMA Dekodierungssoftware ausgerüstet sind, verwendet werden. 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 I.4.3 dargestellt.

Soll die Schwenkmethode zur Suche des räumlichen Immissionsmaximums im Messvolumen eingesetzt werden, muss bei der Geräteauswahl darauf geachtet werden, dass die Dekodierungen der gemessenen Signale ausreichend schnell erfolgen. Hierfür sind mindestens etwa 6-10 Dekodierungen pro Sekunde notwendig [WUS 04-1]. Derzeit verfügbare Messgeräte erfüllen diese Anforderungen bezüglich der Dekodiergeschwindigkeit nicht durchgängig. In wieweit sich daraus Einschränkungen bei der Anwendung der Schwenkmethode ergeben, wird in den weiteren Projektschritten untersucht.



Bild 1.4.3: Portables, codeselektives UMTS-Messsystem (mit TSMU, Laptop und Messantenne), Firma Rohde & Schwarz

Mittels eines solchen codeselektiven Messsystems ist es möglich, Messungen im Livebetrieb einer UMTS-Station durchzuführen (d.h. bei aufgrund nicht konstanter Verkehrslast permanent schwankender Immission) und trotzdem zuverlässig auf die höchste betriebliche Anlagenauslastung hochrechnen zu können. Aufgrund 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.

Es ist hier allerdings zu beachten, dass entsprechende codeselektiver Systeme aufgrund der Neuartigkeit dieser Messsysteme sowie der Neuartigkeit von UMTS bislang weitaus weniger ausgetestet und verifiziert sind als z.B. Breitbandmessgeräte oder Spektrumanalysatoren. In [RIE 04] wird beispielsweise berichtet, dass die in Drivetestern eingesetzten Rake-Empfänger das reine Hochfrequenzsignal tendenziell überschätzen, weil die Phasen der einzelnen Mehrwegekomponenten immer so gedreht werden, dass sich die Teilsignale optimal aufaddieren. In der Realität sind durch Mehrwegeausbreitungen bei korrekter Berücksichtigung der Phase aber auch Auslöschungen möglich. Allerdings wird vermutet, dass diese Überschätzung sich bei einer örtlichen Maximalwertsuche und Messung im Maximum nur marginal bemerkbar macht. Außerdem wird von Schwierigkeiten bei der Maximalwertsuche mittels Schwenkmethode im Vergleich zu GSM-Messungen berichtet, die bei bikonischen Antennen größer waren als bei logarithmisch-periodischen Antennen. In [SUPSI 04] wurde die Erfahrung gemacht, dass bei der CPICH-Dekodierung von relativ kleinen Signalen (z.B. Stationen, die einige 100 m entfernt sind), die Messfehler sprunghaft zunahmen.

Bei diesen Messungen ist ebenfalls zu berücksichtigen, dass die Möglichkeiten von Plausibilitätsprüfungen der Messergebnisse gerade gegenüber frequenzselektiven Messungen stark eingeschränkt sind. Wohingegen man am Spektrumanalysator bei GSM-Messungen das Aufbauen eines Spektrums mit den einzelnen Kanälen beobachten kann inklusive der

Möglichkeit, eventuelle Inkonsistenzen bereits hier zu erkennen, kommt bei den codeselektiven Messungen quasi nur ein Zahlenwert heraus, dem in gewisser Hinsicht „geglaubt“ werden muss.

Bei codeselektiven Messungen gibt es also noch genügend Möglichkeiten, Erfahrungen zu sammeln und Verbesserungen in die Entwicklung dieser Geräte einzubringen.

#### **1.4.4.3.4 Kalibrierung der Messgeräte**

Breitbandmessgeräte, Spektrumanalysatoren, Messempfänger, codeselektive Messgeräte, Empfangsantennen und Zuleitungskabel müssen kalibriert sein. Die Kalibrierung ist in regelmäßigen Abständen zu wiederholen.

Kalibrierung bedeutet:

- bei Breitbandmessgeräten, Spektrumanalysatoren bzw. Messempfängern und codeselektiven Messgeräten: Zuordnung zwischen den ausgegebenen Werten des Messgerätes (z.B. 6,8) zu einer durch ein Bezugsnormale dargestellten Größe (z.B. (1) V/m),
- bei Empfangsantennen: Bestimmung von frequenzabhängigen Gewinn- bzw. Antennenfaktoren,
- bei Zuleitungskabeln: Bestimmung der frequenzabhängigen Dämpfungsfaktoren.

Das Kalibrierintervall richtet sich nach der Art und Historie des Messgerätes bzw. Hilfsmittels, der Benutzungshäufigkeit und der Einsatzumgebung. Sicherlich werden die verwendeten Gerätschaften bei Vorortmessungen stärker belastet als unter Laborbedingungen. Einige Normempfehlungen sprechen von mindestens einer Kalibrierung pro Jahr bzw. sogar von zusätzlichen Überprüfungen vor jedem Messprojekt.

#### **1.4.4.3.5 Nahfeld-Fernfeld Problematik**

Ein wichtiger Aspekt bei der Messung ist die Frage, inwieweit die Komponenten des elektrischen (E) und magnetischen (H) Feldes getrennt zu erfassen sind oder ob die Erfassung einer der beiden Komponenten hinreichend ist. Dieses ist in erster Linie von der Art der Sendeantenne und vor allem vom Abstand des Messortes von der Sendeantenne abhängig.

Hierfür definieren die nationalen und internationalen Normen unterschiedliche Kriterien: Oftmals wird gefordert, zur Erfassung von lediglich einer der beiden Komponenten E oder H mindestens die Entfernung  $r$

$$r > \frac{2D^2}{\lambda_0} \quad (1.4.1)$$

(Fernfeld) einzuhalten, wobei  $D$  die maximale geometrische Ausdehnung der Antenne beschreibt und  $\lambda_0$  die Freiraumwellenlänge ist. Andere Arbeiten halten bereits ab Entfernun-

gen von einer Wellenlänge (strahlendes Nahfeld) von der Anlage die Erfassung lediglich einer der Feldkomponenten E oder H für hinreichend. Für die Immissionsmessung im Umfeld der hier betrachteten UMTS-Sendeanlagen werden allgemein zugängliche Messpunkte in der Regel außerhalb des durch Formel (I.4.1) definierten Abstandes liegen, so dass die Messung z.B. der elektrischen Feldkomponente hinreichend ist.

#### **I.4.4.4 Wahl der Messparameter**

Bei Messungen mit Breitbandmessgeräten sind die Möglichkeiten der Auswahl unterschiedlicher Geräteeinstellungen begrenzt und entsprechend die Fehlermöglichkeiten gering. Bei den frequenzselektiven Verfahren hingegen ist eine richtige Wahl der Messparameter bzw. Geräteeinstellungen relevant und zur Ermittlung eines korrekten Messergebnisses eminent wichtig. Dies betrifft vor allem die Bandbreiten vom Mess- und Videofilter (RBW und VBW) sowie den Frequenzbereich (Span), die Durchlaufzeit des Messfilters durch den eingestellten Frequenzbereich (Sweeptime) und den gewählten Detektortyp (Peak, RMS).

Die in Kapitel I.2 vorgestellten grundlegenden Signalparameter von UMTS machen deutlich, dass hier mit sehr großer Auflösebandbreite (RBW und VBW) gemessen werden muss. Bei UMTS ergibt sich eine Messbandbreite von etwa 5 MHz [WUS 04-1]. Moderne Spektrumanalysatoren bieten spezielle Kanalfilter, die für gängige Funktechniken optimierte Auflösebandbreiten zur Verfügung stellen.

Stehen diese großen Bandbreiten nicht zur Verfügung (viele ältere Geräte besitzen als Maximalwert eine RBW von 1 MHz), ergeben sich zwei alternative Möglichkeiten:

1. Man nutzt den bei modernen Analysatoren vorhandenen Channel-Power-Messmode, bei dem das vorhandene Spektrum mit kleiner Auflösebandbreite abgetastet wird und anschließend für einen vom Benutzer definierten Bereich durch Integration die gesamte Empfangsleistung des Kanals errechnet wird. Nachteil des Verfahrens ist der Zeitaufwand, denn es kann immer nur ein Kanal ausgemessen werden. Bei Vorhandensein von UMTS-Immissionen durch vier unterschiedliche Netzbetreiber mit je zwei Frequenzkanälen (Endausbaustadium FDD) wäre demnach, sofern eine exakte Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung gefordert ist, ein bis zu achtmaliges Wiederholen der Messung notwendig.
2. Eine andere Alternative bietet sich zumindest bei den rauschähnlichen Signalen (UMTS) mit konstanter Leistungsdichte im Spektrum an. Hier kann man das Signal auch schmalbandiger erfassen und anschließend mittels eines Korrekturfaktors, der sich aus der Bandbreite des zu messenden Signals und der äquivalenten Rauschbandbreite des verwendeten Selektionsfilters errechnet, auf den wahren Wert der vorhandenen Exposition schließen [RegTP 03].

Als Detektor ist bei UMTS ein RMS-Detektor (Effektivwertdetektor) zu wählen, da es bei Verwendung eines Peak-Detektors zu einer erheblichen Überbewertung der Exposition in der Größenordnung des Crestfaktors kommt.

Wie bereits oben beschrieben, fehlen in den aktuell vorliegenden Messvorschriften, Normen und Normenentwürfen teilweise exakte Angaben über die wesentlichen Messgeräteeinstellen bei frequenzselektiven Messungen oder aber die vorgeschlagenen Parameter werden den komplexen Signalstrukturen der UMTS-Signale nicht völlig gerecht. Daher werden im II. Teil vorliegenden Projektes geeignete Messverfahren und Geräteeinstellungen für die Erfassung von UMTS-Signalen erarbeitet. Insbesondere wird geklärt, ob neben codeselektiven Messverfahren auch spektrale Verfahren eingesetzt werden können. Bezüglich der frequenzselektiven Verfahren wird untersucht, ob die oben angegebenen alternativen Messverfahren (Channel-Power-Messung, Messung mit geringer Auflösebandbreite und anschließender Hochrechnung) vergleichbare Ergebnisse liefern wie spektrale Messungen mit korrekter Auflösebandbreite.

Bei codeselektiven Messungen ist nach ersten Erfahrungen bei heute verfügbaren Messgeräten die Möglichkeit der Variation entsprechender Messparameter beschränkt. Bei einigen Geräten besteht die Möglichkeit, zwischen einem schnellen unempfindlicheren Messmode und einem langsamen Mode mit gesteigerter Empfindlichkeit umzuschalten. In wieweit dies einen Einfluss auf die Genauigkeit der Messergebnisse hat und ob auch andere Geräteeinstellungen die Messungen beeinflussen können, ist Gegenstand der weiteren Untersuchungen vorliegenden Projektes.

#### **I.4.4.5 Messdurchführung**

Die Notwendigkeit einer Vorschrift für eine detaillierte Messdurchführung erwächst aus der Notwendigkeit, an einem räumlich ausgedehnten Messort das Maximum der Immission zu bestimmen, da gerade in Innenräumen die Immission örtlich sehr stark schwanken kann. Erfolgt die Messwertaufnahme lediglich an einem festen Punkt, sind Unterbewertungen der Immission von mehreren Größenordnungen (!) möglich.

Im Projekt „Entwicklung von Mess- und Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Exposition der Bevölkerung durch elektromagnetische Felder in der Umgebung von Mobilfunk-Basisstationen“ des Bundesamtes für Strahlenschutz [BOR 05] wurden hierfür mit der Schwenkmethode, der Drehmethode und der Punktrastermethode verschiedene Maximierungstechniken eingehend auf ihre Anwendbarkeit für Immissionsmessungen unter besonderer Berücksichtigung von Messungen in Innenräumen untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass die Schwenkmethode am besten für die Aufgabenstellung der messtechnischen Erfassung des Maximalwertes der Immission geeignet ist. Bei der Schwenkmethode wird das ganze Messvolumen mit einer 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 die Immissionen mit der „Maxhold“ Funktion des Messgerätes kontinuierlich erfasst. Die Bewegung der Antenne muss bezogen auf die Sweeptime des Spektrumanalysators langsam erfolgen.

Mit der Schwenkmethode sind allerdings keine räumlichen Mittelwertbildungen der Immission, z.B. an den Punkten eines Messgitters, möglich, wie es etwa in [CEPT 03] beschrieben ist. Allerdings wurde in o.g. Projekt festgestellt, dass die Ergebnisse von solchen Mittelwertbildungen sehr stark von der verwendeten Mittelungsgeometrie und dem vorliegenden

Expositionsszenario abhängen. Eine „allgemein gültige“ Geometrie, die für jedes Expositionsszenario anwendbar ist, konnte nicht gefunden werden. Deswegen wurde eingeschätzt, dass nicht eine Mittelwertbildung, sondern eine räumliche Maximalwerterfassung derzeit die am besten geeignete Erfassungsmethode für die messtechnische Immissionsbestimmung von hochfrequenten Funksendeanlagen mit dem Ziel der Grenzwertüberprüfung ist.

Prinzipiell ist die Schwenkmethode sowohl für die Messung mit Breitbandsonden, als auch mit frequenzselektiven und codeselektiven Messgeräten geeignet. Speziell bei codeselektiven Messgeräten werden hierbei im Laufe des Projektes noch Untersuchungen durchgeführt, um die prinzipielle Eignung der Schwenkmethode auch in der Praxis zu verifizieren.

Bei manchen Aufgabenstellungen ist jedoch nicht die Ermittlung von Maximalimmissionen in einem Messvolumen gewünscht, da es nicht um die Überprüfung der Einhaltung von Grenzwerten geht. Vielmehr benötigt man zum Beispiel für epidemiologische Untersuchungen (beispielsweise bei Studien zu Befindlichkeitsstörungen von Personen, die in unmittelbarer Nähe von Basisstationen leben) Messwerte, die Aufschluss über die real innerhalb der Wohnung auftretenden Immission geben. Wie verschiedene Untersuchungen gezeigt haben, ist der Abstand zu einer Basisstation als Kriterium zur Klassifizierung der Exposition eine wenig geeignete Größe [BOR 04, WUS 04-2].

Somit bleibt zur Expositionsabschätzung bei Wohnungen nur die messtechnische Bestimmung des räumlichen Mittelwertes [VOIGT 04]. Zusätzlich müssen auch die zeitlichen Veränderungen der Exposition erfasst werden, da sowohl GSM- als auch UMTS-Mobilfunksendeanlagen ihre Sendeleistung auslastungsabhängig verändern.

Auch bei der messtechnischen Überprüfung der Wirksamkeit von Abschirmmaßnahmen gegen hochfrequente Felder ist der Vergleich der Maximalimmission vor und nach Realisierung von Abschirmmaßnahmen weniger aussagekräftig als der Vergleich der mittleren Immission.

Zur Bestimmung eines räumlichen Mittelwertes sind Schwenk- und Drehmethode wenig geeignet. Hier bietet die Punktrastermethode eindeutig Vorteile. Es wurde allerdings bereits dargelegt, dass bei der Wahl der Mittelungsgeometrie derzeit keine allgemeingültige Vorgehensweise existiert. Bisherige Untersuchungen haben gezeigt, dass insbesondere bei relativ geringer Messpunktanzahl die Immission im Volumen durch Unterabtastung deutlich fehlbeurteilt werden kann.

GSM-Immissionen innerhalb von Räumen könnten sich eventuell durch Kompensationseffekte bezüglich der Inhomogenität unkritischer verhalten als UMTS-Signale, denn die Felder innerhalb von Räumen werden bei GSM üblicherweise durch wesentlich mehr Einzelsignale erzeugt als bei UMTS (Ein typisch ausgestatteter GSM-Standort mit drei Sektorantennen sendet auf neun unterschiedlichen Frequenzen). Jedes Einzelsignal erzeugt innerhalb eines Raumes ein eigenes „Feldstärkegebirge“, die Summe aller räumlichen Verteilungsfunktionen kann dann gegebenenfalls eine gewisse Homogenisierung der Exposition erzeugen. Bei UMTS könnte dieser Effekt deutlich geringer ausgeprägt sein, da UMTS mit sehr wenig unterschiedlichen Trägerfrequenzen auskommt (Pro Betreiber wird mit einer, bestenfalls mit zwei Trägerfrequenzen gearbeitet). Andererseits könnte aufgrund der deutlich größeren Bandbreite von UMTS-Signalen das fast fading geringer ausgeprägt sein, was wiederum positiv auf die Feldhomogenität wirken würde.

Zusammenfassend kann man feststellen, dass bezüglich der Feldhomogenität bei UMTS und deren Auswirkung auf die Bestimmung von Raummittelwerten noch offene Fragen bestehen, die im Rahmen dieses Projektes näher untersucht werden.

Zur Erfassung der zeitlichen Schwankungen von UMTS-Signalen ist die codeselektive Messung des P-CPICH nicht geeignet, da mit dieser Messung eine nicht zeitvariante Komponente des UMTS-Signals erfasst wird. Als geeignet erweist sich hier die frequenzselektive Messung oder die Channel-Power-Messung, da diese Verfahren den zeitlichen Momentanwert des gesamten UMTS-Signals erfassen. Geht es um die Untersuchung der räumlichen Feldverteilung, ist allerdings eine Messung des P-CPICH durchaus sinnvoll, da damit die räumliche Mittelwertbildung nicht durch zeitliche Feldstärkevariationen verfälscht wird.

Neuerdings sind manche Messgeräte, die den P-CPICH codeselektiv erfassen, zusätzlich in der Lage, auch den Momentanwert des Gesamtsignals wiederzugeben, so dass diese dann auch für derartige Messaufgaben verwendbar erscheinen.

#### **I.4.4.6 Auswertung**

Die sich an die Messung anschließende Auswertung umfasst im wesentlichen die folgenden Aspekte:

- Sofern mit Spektrumanalysatoren oder Messempfängern gemessen wurde: Wie werden aus den originär gemessenen Spannungs- bzw. Leistungspegeln Feldstärke- oder Leistungsflussdichtewerte berechnet?
- Wie erfolgt die Extrapolation der gemessenen Augenblickswerte auf den Zustand bei maximaler Anlagenauslastung?

##### ***I.4.4.6.1 Umrechnung der Messwerte auf Leistungsflussdichten bzw. Feldstärken***

Die Grenzwerte sind üblicherweise als elektrische (E) bzw. magnetische Feldstärke (H) oder elektrische Leistungsflussdichte (S) im Fernfeld definiert. Im Fernfeld beinhalten E, H und S dieselbe Information und lassen sich ineinander umrechnen. Insofern kann bei Breitbandmessgeräten, die in der Regel direkt die elektrische Feldstärke ausgeben, auf einfache Weise eine Umrechnung auf H oder S erfolgen, soweit erforderlich.

Werden die Messungen mit Spektrumanalysator oder Messempfänger durchgeführt, so müssen die originär gemessenen Spannungs- oder Leistungspegel unter Berücksichtigung von Antennenfaktor (bzw. -gewinn) der Empfangsantenne in eine Feldstärke oder Leistungsflussdichte umgerechnet werden, wobei die Kabeldämpfung des Zuleitungskabels mit berücksichtigt werden muss. Um eine Auswertung nach der Messung zu vereinfachen, können bei vielen Geräten die Korrekturfaktoren für die Antenne und das Kabel direkt in das Gerät eingegeben werden, so dass die Geräteanzeige auch hier direkt die elektrische Feldstärke ausgibt.

Ähnlich ist auch bei codeselektiven Messgeräten zu verfahren; über eine Eingabe von Kabel- und Antennenkorrekturen und eventuellen Dämpfungsfaktoren für Abschwächer in die Software kann die Immission des CPICH direkt als Feldstärkewert ausgelesen werden.

#### ***1.4.4.6.2 Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung***

Eine Extrapolation des gemessenen Augenblickswertes auf die Immission bei maximaler Anlagenauslastung ist deswegen notwendig, da bei UMTS-Sendeanlagen die Sendeleistung (und damit auch die Immission am Messort) permanent auslastungsabhängig schwankt. Der Schwankungsbereich wird durch eine Minimalimmission (permanent sendende Signalisierungskanäle) und eine Maximalimmission (maximale Sendeleistung für die betreffende Zelle) aufgespannt. Laut einschlägiger Grenzwerte ist eine Extrapolation auf den höchsten betrieblichen Zustand der Anlage vorzunehmen.

Bereits in Abschnitt 1.4.3.3.2 wurde die Möglichkeit der Extrapolation für die drei vorgestellten Messverfahren: breitbandige Messung, spektrale Messung und codeselektive Messung erörtert:

Bei der breitbandigen Messung ist eine Extrapolation auf den maximalen Anlagenzustand aufgrund nicht vorhandener Separation der UMTS-Immissionen der Anlage vor Ort von anderen hochfrequenten Immissionen sowie mangels Kenntnis der momentane Auslastung der Anlage nicht exakt, sondern nur als worst case möglich. Bei einer Messung muss angenommen werden, dass die momentan gemessene Immission nur von den Signalisierungskanälen der Anlage vor Ort stammt. Je mehr Verkehr über die UMTS-Anlage läuft und je größer der Anteil der Immissionen durch umliegende HF-Sender ist, umso deutlicher wird der somit gewonnene worst case Wert die tatsächlich maximale Immission durch die UMTS-Anlage überschätzen. Deswegen lässt sich mit diesem Verfahren grundsätzlich nur die Einhaltung des Grenzwertes nachweisen, nicht aber dessen Überschreitung.

Auch bei der spektralen Messung ist eine Extrapolation auf den maximalen Anlagenzustand nur orientierend möglich. Es können zwar UMTS-Signale eines Betreibers von UMTS-Signalen anderer Betreiber sowie von anderen hochfrequenten Signalen separiert werden. Nicht möglich ist jedoch eine Unterscheidung der UMTS-Immissionsanteile zwischen unterschiedlichen Anlagen oder unterschiedlichen Sektoren einer Anlage eines Betreibers. Da bei einer operativen Anlage unter Verkehrslast frequenzselektiv ebenfalls keine Möglichkeit besteht, eine exakte Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung vorzunehmen, ist solch eine Extrapolation nur als worst case möglich, indem angenommen wird, dass die momentan gemessene Immission sich nur aus der Immission durch die permanent vorhandenen Signalisierungskanäle zusammensetzt. Operativer Sprach- und Datenverkehr wird somit als Signalisierung gerechnet; dies führt bei einer Extrapolation zu einer Überschätzung des maximalen Betriebszustandes, der vom Verkehrsaufkommen zur Zeit der Messung abhängt. Läuft hingegen zur Zeit der Messung kein Verkehr über die Anlage und sind nur die permanenten Signalisierungen aktiv, ist prinzipiell (unter Vernachlässigung von Immissionen durch umliegende UMTS-Anlagen des selben Betreibers) eine weitgehend exakte Extrapolierung auf den maximalen Anlagenzustand möglich.

Mittels einer codeselektiven Messung ist es hingegen möglich, Messungen im Livebetrieb einer UMTS-Station durchzuführen (d.h. bei aufgrund nicht konstanter Verkehrslast permanent schwankender Immission) und trotzdem zuverlässig auf die höchste betriebliche Anlagenauslastung hochrechnen zu können. Aufgrund 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. Da hierfür die eingestellten Leistungen der primären CPICH (bzw. das Verhältnis zwischen Leistung des CPICH und maximaler Sendeleistung der Zelle) bekannt sein müssen, ist eine Mitarbeit der Netzbetreiber unerlässlich. Hierbei müssen aber die in Abschnitt I.4.4.3.3 angesprochenen messtechnischen Problematiken speziell bei der codeselektiven Messung berücksichtigt werden.

#### **I.4.4.7 Dokumentation**

Zur Dokumentation der Messungen ist ein Messbericht anzufertigen. Dieser sollte 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 der Messung, die Rohergebnisse und die Auswertung der Messdaten nachvollziehbar sind.

Es sollten wenigstens folgende Angaben enthalten sein:

- Administrative Angaben,
- Gegenstand der Messung,
- Beschreibung der untersuchten Sendeanlage,
- Auswahl der Messpunkte,
- Verwendete Messgeräte,
- Messverfahren,
- Messergebnisse,
- Grenzwerte und Vergleich der Messergebnisse mit den Grenzwerten, und
- Messunsicherheit.

Vor allem bezüglich der Behandlung der Messunsicherheit bestehen unterschiedliche Ansätze. Hier muss grundsätzlich entschieden werden, ob

- die Messunsicherheit zum gemessenen Wert addiert wird (additive approach to uncertainty) oder, sofern z.B. eine maximale Messunsicherheit nicht überschritten wird, diese nicht extra vorgehalten werden muss (typisches Verfahren in der EMV-Messtechnik, shared risk approach to uncertainty);
- nur die gerätebedingte, oder auch die verfahrensbedingte Messunsicherheit (prinzipielles Messverfahren, Einfluss des Messenden, Reproduzierbarkeit usw.) einbezogen wird.

### **I.4.5 Eignung der verschiedenen Messverfahren**

In Tabelle I.4.1 wird die Eignung der vorgestellten Messverfahren gegenüber den in Abschnitt I.4.2 definierten Anforderungen zusammengefasst.

Aus einer Übersicht vorhandener Verfahren wird ersichtlich, dass für vorliegende Aufgabenstellung primär codeselektive und in geringerem Umfang auch frequenzselektive Messungen sinnvoll sind. Diese Verfahren weisen Vorteile vor allem bezüglich Empfindlichkeit und Selektivität auf, so dass sie vorrangig für Fein- bzw. Detailmessungen eingesetzt werden. Breitbandmessungen werden nur in unmittelbarer Nähe vom Sender vorrangig zu Überblickszwecken bzw. eingeschränkt auch für worst case Abschätzungen sinnvoll sein; sie haben dann vor allem Vorteile hinsichtlich Messaufwand und notwendiger Qualifizierung des Personals.

Forschungsbedarf besteht vor allem hinsichtlich korrekter Einstellungen der Messparameter bei den frequenzselektiven Messungen, da hier die Gefahr einer Fehlerfassung der Immissionen aufgrund der neuartigen Signalstrukturen sehr groß ist.

Berücksichtigt werden müssen ebenfalls die aufgrund der neuartigen codeselektiven Messtechnik und der vergleichsweise geringen Erfahrungsbasis vorhandenen Unsicherheiten der codeselektiven Messung. Im Abschnitt I.4.4.3.3 wurde mit den einzusetzenden Antennen, Schwierigkeiten bei der Maximalwertsuche und Messfehlern bei relativ kleinen UMTS-Signalen sowie fehlenden Plausibilitätsprüfungen einige Probleme adressiert, die in den weiteren Projektteilen näher beleuchtet werden.

Kriterium	<b>Breitbandig</b> (Breitbandgerät mit isotroper Sonde)	<b>Frequenzselektiv</b> (Spektrumanalysator / Messempfänger mit Antenne)	<b>Codeselektiv</b> (Codeselektiver Empfänger mit Antenne)
Empfindlichkeit	<b>gering</b> (typisch ab 1 V/m, selten auch schon ab 0,2 V/m)	<b>hoch</b> (im hier betrachteten Frequenzbereich etwa 0,001 V/m)	<b>hoch</b> (im hier betrachteten Frequenzbereich etwa 0,001 V/m)
Selektivität	<b>in der Regel nicht vorhanden</b> (es wird ein Wert angezeigt, der der Summe der Immissionen im spezifizierten Frequenzbereich der Sonde entspricht). Mittlerweile auch einige Geräte mit vorschaltbaren Filtern verfügbar.	<b>Frequenzselektivität vorhanden</b> (UMTS-Immissionen lassen sich von GSM- und sonstigen HF-Immissionen trennen, auch Trennung der UMTS-Immissionen von unterschiedlichen Betreibern möglich; Separierung der Immissionen von unterschiedlichen Anlagen eines Betreibers nicht möglich)	<b>Codeselektivität vorhanden</b> (UMTS-Immissionen lassen sich vollständig bezüglich Betreiber und Anlage separieren)
Einbeziehung aller relevanter Anlagen	im Rahmen der Anzeigeschwelle (Mindestempfindlichkeit) gegeben; Trennung der Anteile der Anlage vor Ort von anderen Anlagen aber nicht möglich	<b>vollständig gegeben</b>	Einbeziehung der Immissionen aller relevanten UMTS-Immissionen möglich; Messung von GSM- und anderen HF-Immissionen nicht möglich
Grenzwertüberprüfung	Einhaltung der Grenzwerte nachweisbar, Überschreitung jedoch wegen Einschränkungen bei der Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung nicht möglich	Einhaltung der Grenzwerte nachweisbar, Überschreitung jedoch wegen Einschränkungen bei der Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung bei Netzlast nicht möglich, ohne Netzlast möglich	<b>vollständig geeignet</b>
Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung	<b>nur als worst case möglich</b>	<b>nur als worst case möglich; ohne Netzlast vollständig möglich</b>	<b>vollständig möglich</b>
Aufwand	<b>gering bis moderat</b> (Preis der Messgeräte moderat, Messaufwand gering)	<b>hoch bis sehr hoch</b> (Preis der Messgeräte sehr hoch, Messaufwand hoch)	<b>hoch bis sehr hoch</b> (Preis der Messgeräte sehr hoch, Messaufwand gering bis hoch)
Praktikabilität: Messung nicht im Labor, sondern vor Ort	<b>hoch</b> (Messequipment für Innen- und Außeneinsatz geeignet, Umstellung von Mobiliar nicht zwingend erforderlich)	<b>moderat</b> (Messequipment für Innen- und Außeneinsatz geeignet, gewisse Einschränkungen durch Witterung beim Außeneinsatz, Umstellung von Mobiliar nicht zwingend erforderlich)	<b>moderat</b> (Messequipment für Innen- und Außeneinsatz geeignet, gewisse Einschränkungen durch Witterung beim Außeneinsatz, Umstellung von Mobiliar nicht zwingend erforderlich)

Kriterium	<b>Breitbandig</b> (Breitbandgerät mit isotroper Sonde)	<b>Frequenzselektiv</b> (Spektrumanalysator / Messempfänger mit Antenne)	<b>Codeselektiv</b> (Codeselektiver Empfänger mit Antenne)
Genauigkeit	Reaktion der Geräte auf Signale mit hohem Crestfaktor noch auszutesten	hoch bei Verwendung von modernen Geräten mit hoher Abtastrate, geeigneten Detektoren und hohen Bandbreiten	hier sind noch Messerfahrungen zu sammeln; Probleme u.a. bei geringen Intensitäten und bei Mehrwegeausbreitung berichtet
Maximalwertsuche möglich?	<b>ja</b>	<b>ja</b>	<b>ja</b>
Qualifizierung des Messpersonals	<b>gering</b> (keine große Erfahrung des Messpersonals notwendig)	<b>hoch</b> (große Messerfahrung des Personals notwendig)	<b>moderat bis hoch</b>
Eignung für Überblicksmessungen	<b>hoch</b>	<b>gering</b> (hoher Messaufwand)	nach derzeitigem Stand je nach Gerät hoch bis moderat; noch näher zu untersuchen
Eignung für Feinmessungen	<b>gering</b> (fehlende Frequenz- und Codeselektivität und Empfindlichkeit)	<b>moderat</b> (fehlende Codeselektivität für korrekte Hochrechnung auf maximale Anlagenauslastung)	<b>hoch</b>
Isotrope Messung möglich?	<b>ja</b> (mit isotroper Sonde)	<b>nur mit hohem Aufwand</b> (sequentielle Messung in allen drei Raumrichtungen mit dipolartiger Antenne); mittlerweile auch erste Sonden verfügbar, die Umschaltung von drei orthogonalen Dipolen automatisch durchführen, dadurch Aufwandsreduzierung	<b>nur mit hohem Aufwand</b> (sequentielle Messung in allen drei Raumrichtungen mit dipolartiger Antenne); mittlerweile auch erste Sonden verfügbar, die Umschaltung von drei orthogonalen Dipolen automatisch durchführen, dadurch Aufwandsreduzierung

Tab. I.4.1: Vergleich der grundlegenden Messverfahren: Breitbandig, frequenzselektiv und codeselektiv

## **I.5 Literaturstudie zu ähnlichen Projekten**

In diesem Kapitel sollen Projekte aus dem In- und Ausland vorgestellt werden, die sich ebenfalls mit der Ermittlung der Feldverteilung in der Umgebung von UMTS-Mobilfunkbasisstationen befassen. Hierbei lassen sich drei Gruppen unterscheiden:

- Projekte, die sich mit grundsätzlichen Fragestellungen der Immissionserfassung in der Umgebung von UMTS-Basisstationen beschäftigen, also ähnlich gelagert sind wie dieses Projekt.
- Messungen in der Umgebung von UMTS-Basisstationen, bei denen die Feldbelastung an exemplarischen Messpunkten bestimmt wird. Meist handelt es sich hierbei um typische Messkampagnen, wie sie seit einigen Jahren regelmäßig im Rahmen verschiedenster Projekte durchgeführt werden. Zweck dieser Untersuchungen ist meist eine verbesserte Information der Öffentlichkeit über die Immissionen durch Mobilfunksender.
- Zusätzlich existieren noch einige Aufsätze und Fachbeiträge zur Messtechnik von UMTS-Signalen, die allgemeine Informationen zur Erfassung der Feldverteilung bei UMTS-Basisstationen liefern.

Im folgenden werden die wichtigsten Quellen aus allen drei Gruppen kurz vorgestellt. Zusätzlich wird noch eine aktuelle Veröffentlichung aus der Schweiz präsentiert, bei der es um Berechnungsverfahren zur Immissionsprognose geht (Abschnitt I.5.1.4).

### **I.5.1 Projekte im Ausland**

#### **I.5.1.1 Projekt BASEXPO**

Seit Oktober 2003 läuft das EUREKA-Projekt „BASEXPO“. Bei diesem Projekt geht es um die Entwicklung wissenschaftlich begründeter und praktikabler Verfahren zur Expositionsbestimmung in der Umgebung von Mobilfunkbasisstationen. Durchgeführt wird das Projekt von einem europäischen Forschungsverbund, an dem beispielsweise das Österreichische Forschungszentrum Seibersdorf, das Forschungszentrum der France Telecom sowie verschiedene Universitätsinstitute und Technologiefirmen aus unterschiedlichen europäischen Ländern beteiligt sind. Das Forschungsprojekt gliedert sich in folgende Arbeitspakete:

- Evaluation existierender Standards und Messverfahren zur Expositionsbestimmung bei Basisstationen
- Validierung und Vergleich von Simulationsprogrammen zur Expositionsprognose
- Untersuchungen zu räumlichen und zeitlichen Feldstärkeschwankungen
- Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit und Wiederholbarkeit

- Entwicklung von verschiedenen Messverfahren für unterschiedliche Mobilkommunikationssysteme (unter anderem auch für UMTS). Auswahlkriterien für geeignete Messgeräte.
- Entwicklung von Strategien zur Abschätzung der im täglichen Leben real auftretenden Exposition.

BASEXPO bearbeitet also ähnliche Fragestellungen wie dieses Projekt, allerdings ist es nicht auf UMTS beschränkt. Es ist jedoch auch deutlich umfangreicher angelegt. Nähere Informationen zu den Projekthaltungen finden sich auf der Homepage des Projektes ([www.basexpo.org](http://www.basexpo.org)). Derzeit sind allerdings noch keine Ergebnisberichte auf der Homepage abgelegt.

### **I.5.1.2 Untersuchungen der Fachhochschule Südschweiz**

Die Fachhochschule der Südschweiz (SUPSI) wurde vom Schweizer Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) beauftragt, umfangreiche Untersuchungen zur Expositionsmesstechnik bei UMTS-Basisstationen durchzuführen. Die Ergebnisse sollen in eine Messempfehlung für UMTS-Basisstationen des BUWAL einfließen, die seit September 2003 als Entwurf vorliegt [BUWAL 03]. Der Abschlussbericht des Projektes wurde von SUPSI im April 2004 vorgelegt. Er steht auf der Homepage des BUWAL zur Verfügung (<http://www.umweltschweiz.ch/imperia/md/content/luft/nis/vorschriften/supsi-umts.pdf>).

Im Rahmen des Projektes wurden die folgenden wesentlichen Arbeitspakete behandelt [SUPSI 04]:

- Analyse der bei UMTS verwendeten Systemarchitektur und Signalstrukturen sowie die daraus resultierenden Konsequenzen für die Messtechnik
- Grundsätzliche Verfahren zur Expositionsbestimmung. Ähnlichkeiten und Unterschiede zu GSM.
- Marktanalyse zur Findung geeigneter Messgeräte und -systeme
- Durchführung von Vergleichsmessungen mit verschiedenen Messgeräten unter definierten Laborbedingungen
- Expositionsmessungen in der Umgebung realer UMTS-Basisstationen
- Vergleich der wichtigsten Messverfahren (spektrale Messung, Channel-Power-Messung, codeselektive Messung)
- Untersuchungen zur Eignung der „Schwenkmethode“ für die Erfassung von UMTS-Expositionen.

Der umfangreiche Bericht liefert eine Vielzahl von verwertbaren Informationen, insbesondere aus den Ergebnissen der Vergleichsmessungen sowohl unter Laborbedingungen als auch bei realen Stationen. Als wichtige Ergebnisse der Studie kann festgehalten werden:

- Sowohl Laboruntersuchungen als auch Messungen an realen UMTS-Stationen zeigen, dass die „Schwenkmethode“ auch bei UMTS-Signalen geeignet ist, das lokale Feldstärkemaximum im Raum zu detektieren und größtmäßig anzugeben. Es ergab sich im Rahmen von Reproduzierbarkeitsuntersuchungen eine Standardabweichung von maximal etwa 1 dB bei Wiederholung der Messungen an verschiedenen Tagen.
- Zur Bestimmung der lokalen Maxima war allerdings meist eine etwas längere Messzeit notwendig als bei GSM-Signalen.
- Ein Vergleich verschiedener Messgeräte ergab bis auf eine Ausnahme (bei der ein Fehler in der Signalerfassung des Gerätes vorlag) Abweichungen von maximal 1,5 dB.
- Die codeselektive Messung der CPICH-Leistung mit anschließender Extrapolation auf höchste Sendeleistung liefert die verlässlichsten Maximalimmissionswerte. Eine Hochrechnung von frequenzselektiven Messergebnissen oder Resultaten von „Channel-power“-Messungen führen regelmäßig zu einer Überbewertung der Exposition.

Die Autoren der Studie empfehlen weitere Untersuchungen an realen UMTS-Stationen sowie einen Ringversuch zum Vergleich der realen Messergebnisse von verschiedenen Messlabors, die erfahrungsgemäß mit unterschiedlichen Messgeräten ausgestattet sind.

### **I.5.1.3 Expositionsmessungen in der Schweiz**

Die größten messtechnischen Erfahrungen bei UMTS-Basisstationen sind derzeit in der Schweiz zu finden. Auf Grund der dort herrschenden restriktiven Immissionsgesetzgebung reicht es bei vielen Standorten nicht mehr aus, nur durch Berechnungen die Einhaltung der verschärften Anlagegrenzwerte (zwischen 4 und 6 V/m, je nach Ausstattung des Mobilfunkstandortes) nachzuweisen. Insbesondere bei GSM-Standorten, die mit UMTS-Systemen erweitert wurden, sind im städtischen Umfeld häufig Abnahmemessungen notwendig, um die Einhaltung der Grenzwerte eindeutig nachzuweisen. Derartige Messungen werden in der Schweiz nicht von einer zentralen Behörde (vergleichbar mit der BNetzA in Deutschland), sondern von akkreditierten NIS-Messlabors durchgeführt. Derzeit sind in der Schweiz etwa 5 bis 10 Labors in der Lage, qualifizierte UMTS-Expositionsmessungen durchzuführen.

Rückfragen bei einem der großen NIS-Messlabors in der Schweiz ergaben, dass etwa seit Anfang 2004 Abnahmemessungen bei UMTS-Basisstationen durchgeführt werden. Insgesamt sind bis heute in der Schweiz mehr als 100 UMTS-Standorte messtechnisch überprüft worden, wobei im Rahmen einer derartigen Messung immer mindestens die drei höchst exponierten „Orte mit empfindlicher Nutzung“ gemessen werden (das sind in der Regel

Räume in benachbarten Gebäuden, in denen sich Personen nicht nur vorübergehend aufhalten).

Aufgrund der sehr niedrigen Grenzwerte ergeben sich bei vielen Messungen Expositionswerte nahe den Grenzwerten, so dass Messverfahren, die zu einer regelmäßigen Überbewertung der Immission führen (Breitbandmessung, frequenzselektive Messung), in vielen Fällen nicht mehr geeignet sind, die Einhaltung der Grenzwerte nachzuweisen. Der Trend bei den Messlabors geht daher in der Schweiz eindeutig hin zu codeselektiven Verfahren.

Da es sich bei den Messungen in der Regel um Aufträge von Netzbetreibern oder Behörden handelt und in den Berichten häufig datenschutzrechtlich relevante Informationen dokumentiert sind, werden derartige Messberichte normalerweise nicht einer breiten Öffentlichkeit z.B. über das Internet zur Verfügung gestellt.

#### **I.5.1.4 Immissionskataster Hochfrequenzstrahlung in Basel**

Ebenfalls aus der Schweiz stammt ein aktueller Projektbericht über eine Pilotstudie, die im Auftrag des Lufthygieneamtes Basel und des Schweizer Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) durchgeführt wurde [BÜR 05]. Ziel der Pilotstudie war die Erstellung eines Immissionskatasters von hochfrequenter nichtionisierender Strahlung für zwei Testgebiete. Dazu gehörten konzeptionelle Arbeiten, Erstellung von Software für Ausbreitungsrechnungen, Durchführungen von Berechnungen, Vergleich von verschiedenen Varianten, Vergleich mit Messungen und Anpassen von Parametern. In Bezug auf die räumliche Auflösung sollen die Möglichkeiten und Grenzen der Modellierung ausgelotet werden, in Bezug auf die zeitliche Auflösung war das Ziel die Berechnung der realen, zeitgemittelten Strahlung. Berechnet wurden zwei Modellgebiete im Kanton Basel, eines davon im ländlichen Umfeld, das andere im Zentrum der Basler Altstadt. Berechnet wurden die Felder von UKW-Rundfunk- und TV-Sendern sowie von Funkruf-, GSM- und UMTS-Basisstationen.

Im Lauf der Arbeit wurden u.a. folgende möglicher Rechenmodelle und Algorithmen für die Ausbreitungsrechnung von Funkwellen untersucht:

- ideale Freiraumausbreitung
- COST-Walfisch-Ikegami
- ITU-R P.1546
- ITU-R P.1411

Auch die Gebäudedämpfung sowie die Beugung an Dachkanten wurde teilweise in den Modellen berücksichtigt.

Im Moment kann jedoch noch keine Auskunft darüber gegeben werden, welche Modelle bei welchen Situationen die brauchbarsten Ergebnisse liefern, da die Resultate von messtechnischen Verifikationen der Berechnungen noch nicht vorliegen. Diesbezügliche Untersuchungen werden allerdings zur Zeit vorgenommen, so dass ein Vergleich zwischen Messung und Berechnungen in absehbarer Zukunft möglich wird.

## **I.5.2 Projekte in Deutschland**

In Deutschland wurden bisher keine Projekte speziell zur Erarbeitung von Verfahren für die Expositionsbestimmung bei UMTS-Basisstationen durchgeführt. Allerdings liegen bereits die Ergebnisse erster Messkampagnen in der Umgebung von UMTS-Stationen vor:

### **I.5.2.1 Feldstärkemonitoring der BNetzA (EMF-Datenbank)**

Die Bundesnetzagentur (BNetzA) bietet auf Ihrer Homepage ([emf.bundesnetzagentur.de](http://emf.bundesnetzagentur.de)) eine umfangreiche EMF-Plattform an, auf der neben Informationen über ortsfeste Funksendeanlagen auch eine sehr große Zahl von Messergebnissen hochfrequenter Exposition zugänglich ist. Es handelt sich hierbei um mehr als 2500 Messpunkte aus den Messkampagnen der ehemaligen Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post (RegTP) von 1996/97 bzw. 1999/2000. Die seit 2003 kontinuierlich durchgeführten Messungen (etwa 2000 Messpunkte jährlich) werden ebenfalls in die Datenbank eingepflegt. Die Messorte wurden teilweise durch die BNetzA selbst festgelegt, wobei diese meist besonderes Augenmerk auf die Nähe zu ortsfesten Funksendeanlagen legt. Die Messpunkte befinden sich im Freien an öffentlich zugänglichen Orten oder in Bereichen mit besonderem öffentlichen Interesse (z.B. Schulen, Kindergärten, Krankenhäuser). Der Rest der Messpunkte wird durch die Landesumweltministerien festgelegt.

Die BNetzA führt die Expositionsmessungen gemäß der Messvorschrift RegTP MV 09/EMF/3 [RegTP 03] durch (Bei UMTS bedeutet dies: Frequenzselektive Erfassung ohne Extrapolation auf höchste betriebliche Anlagenauslastung, Messung mit dem Peak-Detektor) und gibt für jeden Messpunkt leider jeweils nur die dort vorhandene Summenexposition an. Es ist also nicht möglich, aus den Informationen der BNetzA-Datenbank quantitative Aussagen über die Exposition durch UMTS-Mobilfunksender zu erhalten.

### **I.5.2.2 EMF-Messkampagne des IZMF in Hessen**

Im Mai und Juni 2004 wurde im Auftrag des Informationszentrums Mobilfunk (IZMF) eine Messkampagne in der Umgebung von Mobilfunkstandorten in Hessen durchgeführt. Vorgenommen wurden die Messungen von der Firma EMV-Services GmbH (ein Unternehmen der TÜV Nord Gruppe). Der Ergebnisbericht steht auf der Homepage des IZMF ([www.izmf.de](http://www.izmf.de)) zur Verfügung [SAU 04].

An den insgesamt 71 Punkten wurden die Felder von Mobilfunksendeanlagen erfasst, wobei auch UMTS-Immissionen gemessen wurden (falls vorhanden). Leider wird im Ergebnisbericht nur die Summenimmission aus GSM- und UMTS-Signalen angegeben, so dass aus dieser Messkampagne keine Erkenntnisse über die Feldverteilung speziell in der Umgebung von UMTS-Sendeanlagen gewonnen werden können.

Bei den UMTS-Messungen wurde eine codeselektive Erfassung durchgeführt und auf höchste betriebliche Anlagenauslastung extrapoliert.

### I.5.2.3 EMF-Monitoring Bayern

Ein mit 400 Messpunkten sehr umfangreiches Projekt zur Erfassung der Exposition der Bevölkerung bezüglich hochfrequenter Felder wird derzeit in Bayern durchgeführt [BER 04], bei dem sowohl die Summenimmission, als auch die Immissionsverteilung auf die wesentlichen Funkdienste im Umfeld des Menschen ermittelt werden. Das Versuchsdesign lässt sich wie folgt charakterisieren:

- Die 400 Messpunkte sind nicht nur auf einzelne Regionen des Landes beschränkt, sondern verteilen sich über die gesamte Fläche Bayerns.
- Die Messpunktauswahl wurde durch ein reines Zufallsverfahren realisiert. Die Wahrscheinlichkeit für einen Messpunkt in einer beliebigen Kommune wurde hierbei mit deren Einwohnerzahl gewichtet, so dass besonders viele Messpunkte in die dicht besiedelten Regionen Bayerns zu liegen kamen. Die Messpunkte befinden sich alle im Freien in Bodennähe in öffentlich zugänglichen Bereichen mit Wohnbebauung.
- Statt, wie bei den meisten Messkampagnen üblich, mit Spektrumanalysator und geeigneten Messantennen eine Kurzzeitmessung durchzuführen (unter geeigneter Berücksichtigung der räumlichen Feldstärkeschwankungen), wurde ein eigens dafür konzipiertes automatisches Messsystem entwickelt, das den Frequenzbereich von 9 kHz bis 3 GHz frequenzselektiv mittels eines komplexen Antennenaufbaus abtastet und die vorhandenen hochfrequenten Felder automatisch erfasst. An jedem der 400 Messpunkte wurde eine Erfassung über einen Zeitraum von einer Stunde durchgeführt.
- Grundlage für die Bewertung der Feldstärken waren die 26. BImSchV [26. BImSchV] und die EU-Ratsempfehlung [99/519/EG].
- Eine Wiederholung der Messkampagne an den gleichen Punkten ist voraussichtlich für Sommer 2005 vorgesehen, so dass nach Abschluss des zweiten Durchlaufs gegebenenfalls vorhandene Veränderungen des Immissionsbildes aufgezeigt werden können.

Die erste Messkampagne des EMF-Monitorings wurde zwischen Juli 2002 und August 2003 durchgeführt. Die wesentlichen Ergebnisse dieser Messungen liegen bereits vor. Zu dieser Zeit waren in Bayern allerdings erst relativ wenige UMTS-Anlagen in Betrieb, so dass nur an 14 der 400 Punkte UMTS-Immissionen überhaupt festgestellt werden konnten. Eine Auswertung kann natürlich mit einer derart geringen Datenmenge nicht durchgeführt werden. Nach Abschluss der zweiten Messkampagne ist allerdings mit einer ausreichenden Zahl an UMTS-Messergebnissen zu rechnen, so dass hieraus vermutlich verwertbare Erkenntnisse über die Exposition durch UMTS-Basisstationen gewonnen werden können.

Die vorhandene Messausrüstung lässt sowohl eine frequenz- als auch eine codeselektive Erfassung der UMTS-Felder zu. Da hier jedoch jeweils der Zeitverlauf der Felder an einem Punkt während einer Stunde aufgenommen wird, ist die frequenzselektive Erfassung sinnvoll, da damit eventuell vorhandene auslastungsabhängige Schwankungen beobachtet werden können. Eine Extrapolation auf höchste betriebliche Anlagenauslastung ist bei diesem Versuchsdesign nicht sinnvoll.

### I.5.2.4 EMF-Messprojekt Berlin

Im Dezember 2004 wurden die Ergebnisse einer im Stadtgebiet von Berlin durchgeführten Messkampagne veröffentlicht [WUS 04-2]. Bei dieser Messkampagne wurden im Frühjahr 2004 an insgesamt 55 Messpunkten, die sich auf 25 Messorte in Berlin verteilen, umfangreiche Expositionsmessungen mit Schwerpunkt auf dem GSM- bzw. UMTS-Mobilfunk durchgeführt (Bild I.5.1). Die UMTS-Felder wurden hierbei codeselektiv erfasst, es wurden Hochrechnungen auf höchste betriebliche Anlagenauslastung vorgenommen.

Im Rahmen des Messprojektes sollte auch der Frage nachgegangen werden, wie sich die Immissionen von GSM- bzw. UMTS-Sendern in der Größenordnung zu einander verhalten. Für 34 Messpunkte konnte dieser Vergleich sinnvoll durchgeführt werden, an den anderen 21 Punkten ist ein Vergleich nicht möglich, da in deren Umgebung entweder nur GSM oder nur UMTS-Sendeanlagen installiert waren oder eine der beiden Systeme durch Gebäude so stark abgeschattet wurde, dass ein Einbeziehen dieser Punkte in den Vergleich zu einer Verzerrung der Ergebnisse führen würde. Diese relativ geringe Messpunktezahl sollte im Auge behalten werden, wenn es darum geht, allgemeingültige Schlüsse aus dem Vergleich GSM - UMTS zu ziehen.

Immissionen verursacht durch GSM- bzw. UMTS-Sender halten sich derzeit an den Messpunkten in etwa die Waage. Eine endgültige Aussage über die Immissionsaufteilung ist allerdings im Moment nicht möglich, da die UMTS-Netze in Berlin zum Zeitpunkt der Messungen bei weitem noch nicht vollständig aufgebaut waren.

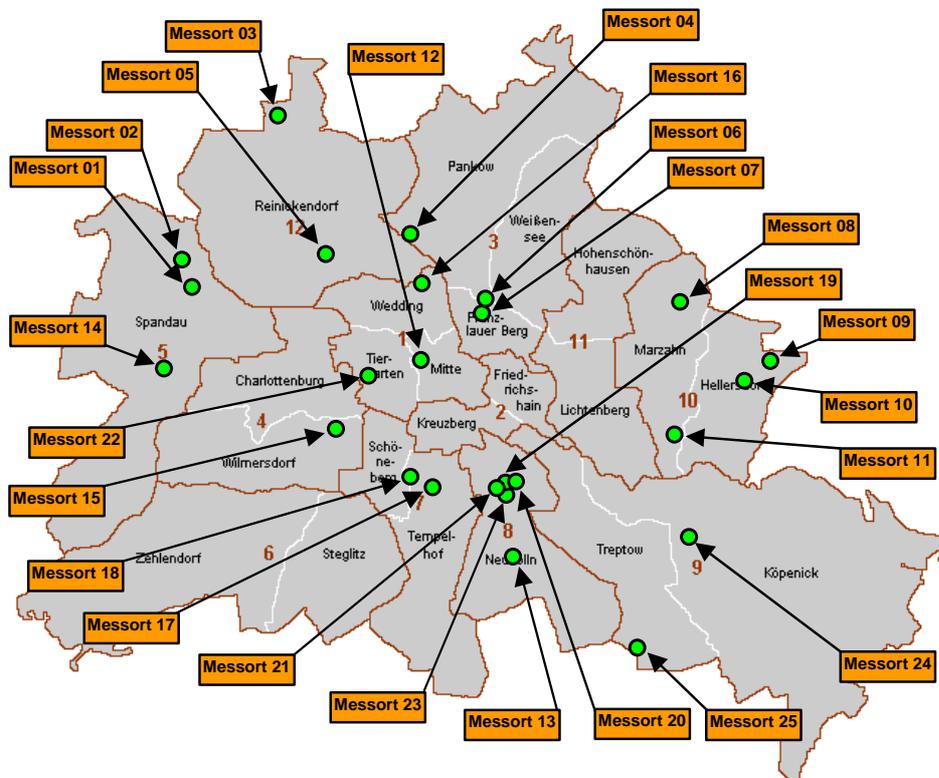


Bild I.5.1: EMF-Messprojekt Berlin: Verteilung der Messorte auf das Stadtgebiet

Ausführliche Ergebnisdarstellungen der Messkampagne und Hintergrundinformationen sind im Internet unter <http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltratgeber/de/emf> abrufbar.

### I.5.2.5 Immissionsdatenbank Bayern

Im Rahmen eines Ende 2004 abgeschlossenen Projektes des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz zur Untersuchung der Immissionen von Mobilfunksendeanlagen wurde aus den Resultaten von 109 kleineren bzw. mittelgroßen Messkampagnen (hauptsächlich aus Bayern) eine umfangreiche Immissionsdatenbank erstellt, in der im Moment etwa 1250 Messpunkte dokumentiert sind [WUS 04-3]. Auch hier wurden nicht nur Summenimmissionswerte festgehalten, sondern es wurden (falls vorhanden) die Messwerte von GSM und UMTS getrennt dokumentiert.

Insgesamt befinden sich in der Datenbank 116 Messpunkte, an denen sowohl GSM-, als auch UMTS-Immissionen gemessen wurden. Die Ergebnisse des Vergleichs sind in Bild I.5.2 dargestellt, wobei zu beachten ist, dass sowohl für GSM, als auch für UMTS die Immissionen bei höchster betrieblicher Anlagenauslastung angegeben sind. Die derzeit meist noch geringe Auslastung der UMTS-Stationen übt somit keinen Einfluss auf den Vergleich aus.

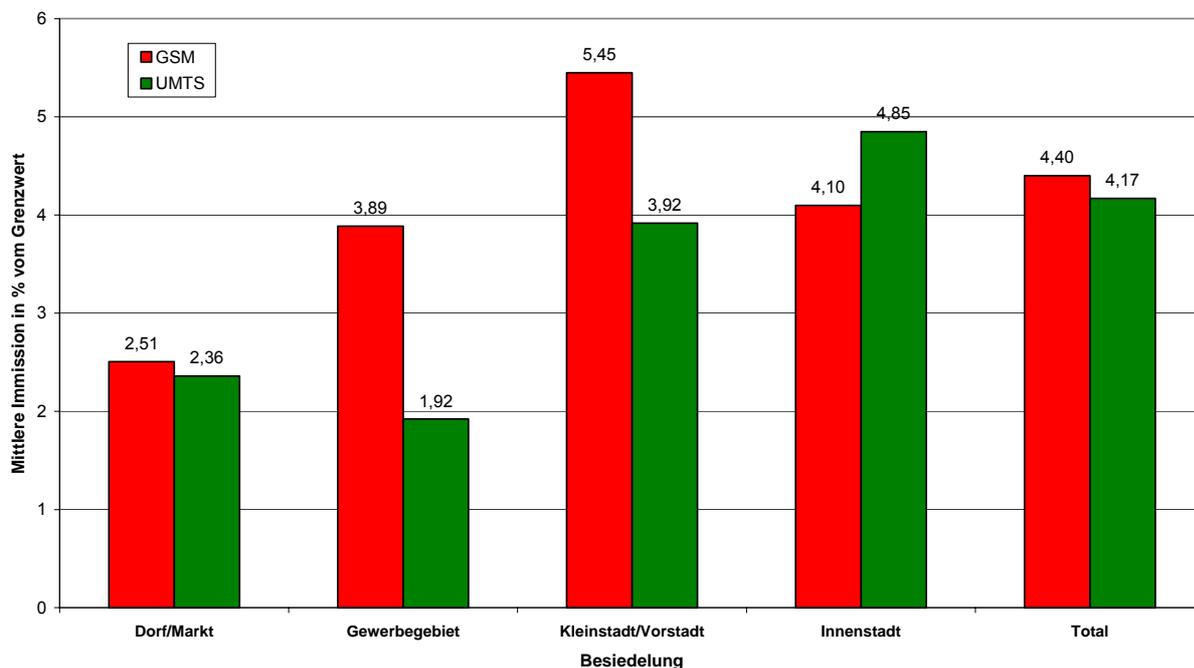


Bild I.5.2: Immissionsvergleich GSM - UMTS (Angabe in Prozent vom Grenzwert bezüglich der Feldstärke, jeweils extrapoliert auf höchste betriebliche Anlagenauslastung)

Auch diese Auswertung kommt zum Schluss, dass kein signifikanter Unterschied zwischen den Immissionen, verursacht durch UMTS-Stationen im Vergleich zu GSM-Anlagen feststellbar ist, wobei auch hier auf die noch recht geringe Datenbasis von 116 Punkten hinzuweisen ist.

### **I.5.2.6 UMTS-Feldmessungen in Nordrhein-Westfalen**

Ende 2004/Anfang 2005 wurde im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MUNLV NRW) eine Messreihe in der Umgebung von Mobilfunkstandorten in Nordrhein-Westfalen durchgeführt. Vorgenommen wurden die Messungen von den Firmen IMST GmbH und der EM Institut GmbH. Die Ergebnisse der Untersuchungen stehen auf der Homepage des MUNLV (<http://www.munlv.nrw.de/sites/arbeitsbereiche/immission/mobil.htm>) zur Verfügung [BOR 05-2].

Die Messpunkte an 24 Mobilfunk-Standorten wurden identisch zu denen einer Vorläuferstudie aus dem Jahre 2002 gewählt, so dass es möglich war, die Veränderungen durch die seit 2002 neu hinzugekommenen UMTS-Anlagen zu beurteilen. Die Messungen der UMTS-Immissionen wurden mit codeselektiver Messtechnik vorgenommen.

Die Messungen zeigen, dass die Immissionssituation bezüglich Mobilfunk an vielen Messpunkten gegenüber 2002 nahezu unverändert geblieben ist. Das neu hinzugekommene UMTS-Mobilfunksystem trägt zwar insgesamt zu einer Veränderung der Immissionssituation bei. Allerdings spielen offensichtlich an den Messpunkten die Immissionen durch UMTS-Anlagen im Vergleich zu den GSM-Immissionen eine untergeordnete Rolle. An nur einem Messpunkt waren die UMTS-Immissionen größer als die GSM-Immissionen. Hierbei lag eine Konfiguration vor, bei der sich der Messpunkt direkt in Hauptstrahlrichtung der UMTS-Antenne, aber nur am Rande der Hauptstrahlrichtung der GSM-Antenne befand.

Im Rahmen einer systematischen Auswertung der Messergebnisse wurden die Einflussfaktoren Abstand des Messpunktes von der Anlage, Vertikalwinkel und Sichtbedingungen untersucht. Ein deutlicher Einfluss des Vertikalwinkels und der Sichtverhältnisse konnte herausgearbeitet werden.

### **I.5.3 Einzelveröffentlichungen zur Messtechnik von UMTS-Signalen**

Bisher liegen nur wenige Einzelveröffentlichungen zu Expositionsmessverfahren in der Umgebung von UMTS-Basistationen vor. Dabei handelt es sich meist um Kongressbeiträge oder Artikel in einschlägigen Fachzeitschriften.

Eine der ersten Auseinandersetzungen mit den Grundproblematiken der korrekten Erfassung von UMTS-Signalen im Rahmen der Expositionsmesstechnik findet sich in [OLI 03]. Die grundsätzliche Problematik der großen Signalbandbreite sowie der korrekten Detektorauswahl (RMS-Detektor) bei spektralen Messungen wird in diesem Kongressbeitrag bereits geschildert.

Ein Zeitschriftenartikel von Swisscom [FRI 03] beschäftigt sich eingehender mit der frequenz- bzw. codeselektiven Erfassung von UMTS-Signalen. Die Resultate durchgeführter Untersuchungen zeigen, dass bei UMTS mit ähnlichen Messunsicherheiten zu rechnen ist, wie es bereits bei der Messung von GSM-Signalen der Fall ist.

In [WUS 04] werden frequenz- und codeselektive Messtechnik bei UMTS vorgestellt, wobei anhand von durchgeführten Untersuchungen insbesondere auf die korrekte Einstellung des Spektrumanalysators (Auflösebandbreite, Detektortyp, Sweeptime) bei der frequenzselektiven Messtechnik eingegangen wird. Vergleichbare Aussagen finden sich auch in einem italienischen Zeitschriftenbeitrag [LIC 04].

In [RIE 04] wird insbesondere der Entwurf der Schweizer Messempfehlung für UMTS-Basisstationen vorgestellt. Außerdem werden erste Erfahrungen mit codeselektiven Messsystemen geschildert

#### **I.5.4 Fazit**

In der Literatur finden sich erste Untersuchungen zur Expositionsmesstechnik bei UMTS-Sendeanlagen, allerdings, bis auf eine ausführliche Studie aus der Schweiz, nur in Form kurzer Zeitschriften- oder Kongressbeiträge. Bezüglich bisher durchgeführter Messungen ist die Datenlage recht unbefriedigend, da die UMTS-Netze noch nicht lange genug in Betrieb sind. Systematische Untersuchungen zur Expositionsverteilung fehlen derzeit weitgehend.

## 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.
- [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.
- [ALTA 04] **Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape**, *Final Report: Basis for a UMTS measurement recommendation*, (2004)
- [AMA 03a] **E. Amaldi, A. Capone, F. Malucelli**, *Planning UMTS Base Station Location: Optimization models with Power Control Algorithms*, IEEE Trans. on Wireless Communications, vol.2, No. 5, (Sept. 2003).
- [AMA 03b] **E. Amaldi, A. Capone, F. Malucelli, F. Signori**, *Optimization models and algorithms for downlink UMTS radio planning*, IEEE, (2003).
- [ARC 98] **B. Alves, C. Ribeiro, und L. Correia**, *A Comparison of Propagation Models for Urban Micro-cells in GSM*, COST 259 TD(98)069, (1998).
- [BAN 03] **M. Banerjee, R. Desquiotz**, *Größtmögliche Dynamik für WCDMA-/3GPP-Signale*, Test-Kompendium 2004, Publish-Industry-Verlag, München, (2003).
- [BEMFV] **BEMFV**, *Verordnung über das Nachweisverfahren zur Begrenzung elektromagnetischer Felder*, BGBl. Jg. 2002 Teil I Nr. 60, 27.08.2002.
- [BER 04] **J. Bernkopf**, *Monitoring elektromagnetischer Felder an statistisch ausgewählten Orten in Bayern*, NIR 2004 Nichtionisierende Strahlung Sicherheit und Gesundheit, 36. Jahrestagung des Fachverbandes für Strahlenschutz, Köln, 31.8.-2.9.2004, S. 411-418, (2004).
- [BGV] **BGV B11 (VBG 25)**, *Unfallverhütungsvorschrift Elektromagnetische Felder*, Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektronik, 01.06.2001.
- [BGR] **BGR B11 (ZH1/257)**, *Berufsgenossenschaftliche Regeln für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit: Elektromagnetische Felder*, Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektronik, Juni 2001.

- [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).
- [BOR 05-2] **Chr. Bornkessel, M. Wuschek, M. Neikes, A. Schramm, M. Schubert, P. Schmidt**, *Elektromagnetische Felder in NRW: Feldmessungen in der Umgebung von UMTS-Sendeanlagen*, Studie im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, *Abschlussbericht*, Kamp-Lintfort, (2005).
- [BOR 96] **C. Bornkessel, T. Becks und U. Kullnick**, *Katastermäßige Erfassung der elektromagnetischen Belastung in Nordrhein-Westfalen: Vorschläge zur Durchführung*, IMST-Report, Kamp-Lintfort, (1996).
- [BÜR 05] **A. Bürgi**, *Pilotprojekt Immissionskataster Hochfrequenzstrahlung*, Projekt im Auftrag des Lufthygieneamtes Basel und des Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, (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.
- [CIC 93] **D.J. Cichon, T. Kürner und W. Wiesbeck**, *Modellierung der Wellenausbreitung in urbanem Gelände*, Frequenz , vol. 47, S. 2-11, (1993).
- [CIC 94] **D.J. Cichon**, *Strahlenoptische Modellierung der Wellenausbreitung in urbanen Mikro- und Pikofunkzellen*, Dissertation, Universität Karlsruhe, ISSN 0942-2935, Band 8 (1994).
- [COI 01] **Mathias Coinchon**, *The Impact of radio propagation prediction on urban UMTS planning*, WaveCall, (2001).

- [COS 90] **COST 231**, *Urban Transmission Loss Models for Mobile Radio in the 900- and 1800-MHz Bands (Revision 2)*, COST-231 TD (90) 119, (1990).
- [COS 91] **COST 231**, *Urban Transmission Loss Models for Mobile Radio in the 900- and 1800-MHz Bands*, COST-231 TD (91) 73, (1991).
- [COS 99] **COST 231**, *Digital Mobile Radio towards Future Generation Systems*, Final Report, European Commission, EUR 18957, (1999).
- [DCF 97] **V. Degli-Esposti, C. Carciofi, M. Frullone und G. Riva**, *Sensitivity of Ray Tracing Indoor Field Predictions to Environment Modelling*, COST 259 TD(97)049, (1997).
- [DEJ 01] **Y.L.C. de Jong**, *Measurement and Modelling of Radiowave Propagation in Urban Microcells*, PhD Thesis, Eindhoven University, ISBN 90-386-1860-3, (2001).
- [DEY 66] **J. Deygout**, *Multiple Knife Edge Diffraction for Microwaves*, IEEE Trans. Ant. Prop., vol. 4, S. 480-489, (1966).
- [DEY 91] **J. Deygout**, *Correction Factor for Multiple Knife-Edge Diffraction*, IEEE Trans. Ant. Prop., vol. 39, S. 1256-1258 (1991).
- [EN 50383] **EN 50383:2002**, *Basic Standard for the Calculation and Measurement of Electromagnetic Field Strength and SAR Related to Human Exposure From Radio Base Stations and Fixed Terminal Stations for Wireless Telecommunication Systems (110 MHz - 40 GHz)*. CENELEC Standard, August 2002.
- [EN 50384] **EN 50384:2002**, *Product Standard to Demonstrate the Compliance of Radio Base Stations and Fixed Terminal Stations for Wireless Telecommunication Systems With the Basic Restrictions or the Reference Levels Related To Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields (110 MHz - 40 GHz) - Occupational*. CENELEC Standard, August 2002.
- [EN 50385] **EN 50385:2002**, *Product Standard to Demonstrate the Compliance of Radio Base Stations and Fixed Terminal Stations for Wireless Telecommunication Systems With the Basic Restrictions or the Reference Levels Related To Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields (110 MHz - 40 GHz) - General Public*. CENELEC Standard, August 2002.
- [FCC 97] **FCC Federal Communications Commission Office of Engineering and Technology**, *Evaluating Compliance with FCC Guidelines for Human Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields*. OET Bulletin 65, August 1997.
- [FRI 03] **P. Fritschi, H. Lehmann**, *Messung der nichtionisierenden Strahlung bei UMTS-Mobilfunk-Basisstationen*, comtec, Bern, (2003)
- [GIO 84] **C.L. Giovaneli**, *An Analysis of Simplified Solutions for Multiple Knife-Edge Diffraction*, IEEE Trans. Ant. Propagat., vol. 32, S. 297-301, (1984).

- [HAT 80] **M. Hata**, *Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Services*, IEEE Trans. Veh. Tech., vol. 29, S. 317-325, (1980).
- [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).
- [IEEE C95.1] **IEEE Std C95.1-1999 Edition**, *IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz*, IEEE, New York, USA, 1999.
- [IEEE C95.3] **IEEE Std C95.3-1991**, *IEEE Recommended Practice for the Measurement of Potentially Hazardous Electromagnetic Fields – RF and Microwave*, IEEE, New York, USA, 1992.
- [IKE 84] **F. Ikegami, S. Yoshida, T. Takeuchi und M. Umehira**, *Propagation Factors Controlling Mean Field Strength on Urban Streets*, IEEE Trans. Ant. Propagat., vol. 32, S. 822-829. (1984).
- [ITY 91] **F. Ikegami, T. Takeuchi und S. Yoshida**, *Theoretical Prediction of Mean Field Strength for Urban Mobile Radio*, IEEE Trans. AP, vol. 39, S. 299 ff., (1991).
- [JAK 95] **R. Jakoby, U. Liebenow**, *Modelling of Radiowave Propagation in Microcells*, Proc. 9<sup>th</sup> Int. Conf. Antennas Propagat., S. 377-380, (1995).
- [KANN 97] **A.G. Kanatas, I.D. Kountouris, G.B. Kostaras und P. Constantinou**, *A UTD Propagation Model in Urban Microcellular Environments*, IEEE Trans. Veh. Tech., vol. 46, S. 185-193, (1997).
- [KEL 62] **J.B. Keller**, *Geometrical Theory of Diffraction*, Journal of the Optical Society of America, Vol. 52, Nr. 2, S. 116-131, (1962).
- [KEL 96] **H. Keller**, *Normgerechte Personenschutzmessungen im HF- und Mikrowellenbereich mit den Feldstärkemessgeräten EMR-20 / EMR-30*, Firmenschrift Wandel & Goltermann, Eningen, (1996).
- [KOU 74] **R.G. Kouyoumjian, P.H. Pathak**, *A Uniform Geometrical Theory of Diffraction for an Edge in a Perfectly Conducting Surface*, Proc. IEEE, S. 1448-1461, (1974).
- [KRÜ 03] **R. Krüger, H. Mellein**, *UMTS - Einführung und Messtechnik*, Franzis' Verlag, Poing, (2003).
- [KÜR 93] **T. Kürner**, *Charakterisierung digitaler Funkssysteme mit einem breitbandigen Wellenausbreitungsmodell*, Dissertation, Universität Karlsruhe, ISSN 0942-2935, Band 3, (1993).
- [KÜR 98] **T. Kürner**, *Propagation Models for Macro Cells*, COST231, Final Report, Chapter 4.4, 1998.

- [LAI 04] **Länderausschuss für Immissionsschutz**, *Hinweise zur Durchführung der Verordnung über elektromagnetische Felder (26. Bundes-Immissionsschutzverordnung)*, Fassung vom 26.03.2004, [www.lai-immissionsschutz.de](http://www.lai-immissionsschutz.de), (2004).
- [LAY 99] **F. Layer und H. Früchting**, *A UTD-based Model of the Time-variant Indoor Radio Channel in the Vicinity of a Human*, COST 259 TD(99)081, (1999).
- [LES 02] **Pierre Lescuyer**, *UMTS - Grundlagen, Architektur und Standard*, dpunkt.verlag, Heidelberg, (2002).
- [LEV 92] **M.F. Levy**, *Diffraction Studies in Urban Environment with Wide-Angle Parabolic Equation Method*, Electronics Letters, vol. 28, S. 1491-1492, (1992).
- [LIC 04] **G. Licitra, D. Palazzuoli, A. S. Ricci, A. M. Silvi**, *UMTS Signal Measurements with Digital Spectrum Analyzers*, Radiation Protection Dosimetry, Vol. 111, No. 4, (2004).
- [LUE 82] **R.J. Luebbers et al.**, *GTD Terrain Reflection Model Applied to ILS Glide Scope*, IEEE Trans. Aerosp. Electr. Syst., vol. 18, S. 11-20, (1982).
- [LUS 04] **M. Lustig, N. Schlüter, J. Tenckhoff, A. Weller**, *Planning UMTS communication networks with the software tool PegaPlan*, T-Mobile, (2004).
- [MAI 00] **G. Maile**, *Impact of UMTS*, IBC Conference on Mobile Networks & the Environment, (June 2000).
- [MAT 00] **R. Mathar, T. Niessen**, *Optimum positioning of base stations for cellular radio networks*, Wireless Networks 6, pp. 421-428, (2000).
- [MCN 90] **D.A. McNamara, C.W.I. Pistorius und J.A.G. Malherbe**, *Introduction to Uniform Geometrical Theory of Diffraction*, Artech House, ISBN 0-89006-301-X, (1990).
- [NOKIA 05] Persönliche Mitteilung von Herrn Grafe, Firma Nokia, (2005).
- [OKU 68] **Y. Okumura**, *Field Strength and its Variability in VHF and UHF Land-Mobile Services*, Rev. Electrical. Comm. Lab., vol. 16, S. 825-873, (1968).
- [OLI 03] **C. Olivier, L. Martens**, *Exposure Assessment around UMTS Base Stations: Extension of Existing Measuring Procedures*, International Zurich Symposium on EMC, (2003).
- [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.

- [prEN 50401] **prEN 50401**, *Product 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.
- [prEN 50413] **prEN 50413**, *Basic Standard on Measurement and Calculation Procedures for Human Exposure to Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (0 Hz - 300 GHz)*. CENELEC Draft Standard, November 2003.
- [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).
- [RIZ 97] **K. Rizk, J.F. Wagen und F. Gardiol**, *Two-Dimensional Ray-Tracing Modeling for Propagation Prediction in Microcellular Environments*, IEEE Trans. Veh. Tech., vol. 46, S. 508-518, (1997).
- [RUS 93] **T.A. Russell, C.W. Bostian und T.S. Rappaport**, *A Deterministic Approach to Predicting Microwave Diffraction by Buildings for Microcellular Systems*, IEEE Trans. Ant. Prop., vol. 41, S. 1640-1649, (1993).
- [RWL 97] **K. Rizk, J.-F. Wagen, J. Li und F. Gardiol**, *Lamppost and Panel Scattering Compared to Building Reflection and Diffraction*, COST 259 TD(97)033, (1997).
- [SAU 04] **E. Sauer, K. Schwerin**, *Immissionsschutzmessungen (Mobilfunk) in Hessen*, TÜV-Nord (EMV-Services), Prüfbericht Nr. 04/4071-2, (2004).
- [SCHÜ 02] **W. Schütz**, *Funkplanung UMTS*, Seminarbeitrag im „UMTS Development Course“, IMST, April 2002.
- [SHA 93] **P.A. Sharples, M.J. Mehler**, *Propagation Modelling in Microcellular Environments*, Proc. 8<sup>th</sup> Int. Conf. on Antennas and Propagation, S. 68-71, (1993).
- [SPE 95] **Space Engineering, Ingegneria dei Sistemi**, *Propagation Model for the Land Mobile Channel in Urban Environments*, Final Presentation, ESA Contract No. 9788/92NL/LC(SC), (1995).
- [SUN 04] **Y. Sun**, *Radio Network Planning for 2G and 3G*, Seminar on Topics in Communication Engineering, (2004).

- [SUPSI 04] **A. Salvade et al.**, *Basis for a UMTS measurement recommendation*, final report for Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape, Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana (SUPSI), Manno (2004).
- [TUR 90] **A.M.D. Turkmani, J.P. Parsons und A.F. de Toledo**, *Radio Propagation Into Buildings at 1.8 GHz*, COST 231 TD(90)117, (1990).
- [VAN 94] **G.A.J. Van Dooren**, *A Deterministic Approach to the Modelling of Electromagnetic Wave Propagation in Urban Environments*, PhD Thesis, Eindhoven University, ISBN 90-9006889-9, (1994).
- [VOIGT 04] **H. Voigt, H.-P. Neitzke**, *Methoden und Ergebnisse der Messung von Hochfrequenz-Immissionen in Wohnungen*, EMF-Monitor 3/2004, Hannover, (2004)
- [WAG 94] **J.-F. Wagen, K. Rizk**, *Ray Tracing Based Prediction of Impulse Responses in Urban Microcells*, Proc. IEEE 44<sup>th</sup> Veh. Technol. Conf., S. 210-214, (1994).
- [WAL 88] **J. Walfisch und H. Bertoni**, *A Theoretical Model of UHF Propagation in Urban Environments*, IEEE Trans. Ant. Prop., vol. 36, S. 1788-1796, (1988).
- [WAL 01] **B. Walke, M. P. Althoff, P. Seidenberg**, *UMTS - Ein Kurs*, J. Schlembach Fachverlag, Weil der Stadt, (2001).
- [WLL 97] **J.-F. Wagen, E. Lachat und J. Li**, *Performance Evaluation of a Ray Tracing Based Microcellular Coverage Prediction Tool*, COST 259 TD(97)019, (1997).
- [WUS 04] **M. Wuschek**, *Feldstärkemessungen in der Umgebung von UMTS-Mobilfunkbasisstationen*, EMV 2004, Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit, Düsseldorf (2004).
- [WUS 04-1] **M. Wuschek**, *Korrekte Erfassung der Immissionen von modernen, breitbandigen Funksystemen*, NIR 2004 Nichtionisierende Strahlung Sicherheit und Gesundheit, 36. Jahrestagung des Fachverbandes für Strahlenschutz, Köln, 31.8.-2.9.2004, S. 372-380, (2004).
- [WUS 04-2] **M. Wuschek und C. Bornkessel**, *EMF-Messprojekt Berlin*, Newsletter der Forschungsgemeinschaft Funk e.V., Nr. 4/2004, S. 68-74, Bonn, (2004).
- [WUS 04-3] **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
COST	European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research (engl.) → Europäische Zusammenarbeit auf dem Gebiet der wissenschaftlichen und technischen Forschung
COST-WI	COST-Walfisch-Ikegami
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 (engl.) → Frequenzduplex
FDM	Finite Differenzen Methode
FDTD	Finite Difference Time Domain (engl.) → Finite Differenzen im Zeitbereich
FEM	Finite Elemente Methode
GO	Geometrical Optics (engl.) → Geometrische Optik
GTD	Geometrical Theory of Diffraction (engl.) → Geometrische Beugungstheorie
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access (engl.) → Technologie zur deutlichen Erhöhung der Nutzdatenrate im Downlink bei UMTS
IEM	Integral Equations Method (engl.) → Integralgleichungsmethode
LOS	Line of Sight (engl.) → Sichtverbindung
MEC	Method of Equivalent Currents (engl.) → Methode der äquivalenten Ströme
MoM	Method of Moments (engl.) → Momentenmethode
MS	Mobilstation

NLOS	Non Line of Sight (engl.) → keine Sichtverbindung
P-CCPCH	Primary Common Control Physical Channel (engl.)
P-CPICH	Primary Common Pilot Channel (engl.)
S-SCH	Primary Synchronization Channel (engl.)
PO	Physical Optics (engl.) → Physikalische Optik
PTD	Physical Theory of Diffraction (engl.) → Physikalische Beugungstheorie
RBW	Resolution bandwidth (engl.) → Auflösebandbreite
RegTP	Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post
S-CCPCH	Secondary Common Control Physical Channel (engl.)
S-CPICH	Secondary Common Pilot Channel (engl.)
S-SCH	Secondary Synchronization Channel (engl.)
Span	Frequenzbereich bei frequenzselektiven Messgeräten = Endfrequenz – Anfangsfrequenz des dargestellten Spektrums
TDD	Time Division Duplex (engl.) → Zeitduplex
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System (engl.) → Universelles Mobiltelekommunikationssystem
UTD	Uniform Theory of Diffraction (eng.) → Verallgemeinerte geometrische Beugungstheorie
VBW	Video bandwidth (engl.) → Videobandbreite

## Verzeichnis häufig verwendeter Symbole

b	Gebäudeabstand
d	Entfernung
f	Frequenz
h	Höhe
r	Abstand
w	Straßenbreite
C	Crestfaktor
D	Maximale geometrische Ausdehnung einer Antenne
$D_B$	Beugungsdämpfung
E	Elektrische Feldstärke
H	Magnetische Feldstärke
P	Leistung
S	elektrische Leistungsflussdichte
U	elektrische Spannung
$Z_{F0}$	Feldwellenwiderstand des freien Raumes
$\lambda_{(0)}$	(Freiraum-) Wellenlänge