



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit

SCHRIFTENREIHE REAKTORSICHERHEIT UND STRAHLENSCHUTZ

**ENTWICKLUNG VON MESS- UND BERECHNUNGSVERFAHREN
ZUR ERMITTLUNG DER EXPOSITION DER BEVÖLKERUNG
DURCH ELEKTROMAGNETISCHE FELDER IN DER UMGEBUNG
VON MOBILFUNK-BASISSTATIONEN**

BMU - 2005-658



WIR STEuern UM AUF ERNEUERBARE ENERGIEN.

BMU – 2005-658

**„Entwicklung von Mess-und Berechnungsverfahren zur
Ermittlung der Exposition der Bevölkerung durch
elektromagnetische Felder in der Umgebung von
Mobilfunk-Basisstationen“**

Institut für Mobil- und Satellitenfunktechnik

Carl-Friedrich-Gauß-Straße 2

47475 Kamp-Lintfort

IMPRESSUM

Dieser Band enthält einen Abschlussbericht über ein vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) gefördertes Vorhaben. Verantwortlich für den Inhalt sind allein die Autoren. Das BMU übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter. Der Eigentümer behält sich alle Rechte an der weiteren Nutzung oder Vervielfältigung des Berichts vor.

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

Herausgeber:

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
Referat RS I 2
Postfach 12 06 29
53048 Bonn

ISSN 1612-6386

Erscheinungsjahr: 2005

Zusammenfassung

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, Mess- und Berechnungsverfahren zu entwickeln, die geeignet sind, die Exposition von Personen im Umfeld von Mobilfunk Basisstationen zu ermitteln. Die Verfahren sollen dabei zur Überprüfung der Grenzwerte geeignet sein. Der Begriff Umfeld wird hier als Bereich außerhalb des durch die RegTP festgelegten Sicherheitsabstandes bis etwa 200 m Entfernung von der Anlage definiert.

Die Immissionsverteilung im Umfeld von Mobilfunk Basisstationen weist spezifische Eigenschaften auf, die vor allem bei der Entwicklung eines Messverfahrens geeignet berücksichtigt werden müssen. So unterliegt die Immission kleinskaligen und großskaligen örtlichen sowie zeitlichen Schwankungen. Diese sind dafür verantwortlich, dass die Streubreite der Immission im Umfeld von verschiedenen Anlagen sehr groß sein kann und von Werten weit unterhalb $1 \mu\text{W}/\text{m}^2$ bis zu einigen $100 \text{ mW}/\text{m}^2$ reichen kann. Die für Deutschland relevante Personenschutznorm, die 26. BImSchV, sowie die Durchführungshinweise des Länderausschusses für Immissionsschutz (LAI) definieren, dass Messungen der Immission am Einwirkungsort mit der stärksten Immission und eine Bewertung der Messergebnisse auf Basis der maximal gemessenen Werte zu erfolgen hat. Außerdem sind die Messungen bei der höchsten betrieblichen Anlagenauslastung durchzuführen; andernfalls sind die Werte entsprechend hochzurechnen.

Das zu entwickelnde Messverfahren muss deswegen in der Lage sein, innerhalb einer örtlich kleinskalig schwankenden Feldverteilung zuverlässig das Immissionsmaximum zu finden und darüber hinaus eine Extrapolation der gemessenen Augenblickswerte auf maximale Anlagenauslastung zu ermöglichen. Schon hier wird deutlich, dass die Messwertaufnahme lediglich an einem ortsfesten Messpunkt mit einem nicht mehr tolerierbaren Fehler behaftet sein kann und als Messverfahren zumindest für vorliegende Aufgabenstellung ausscheidet. Die Eignung für andere Messaufgaben, z.B. im Rahmen von kontinuierlichen Immissionsmonitorings oder bei Personendosimetern, bleibt davon unberührt; dies soll jedoch nicht primärer Untersuchungsgegenstand vorliegenden Projektes sein.

Darüber hinaus muss das Messverfahren hohen Anforderungen bezüglich Empfindlichkeit, Separierung unterschiedlicher Anlagen als Voraussetzung für eine exakte Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung, Praktikabilität, Genauigkeit und Reproduzierbarkeit genügen.

Immissionsmessungen sind prinzipiell mit breitbandigen und frequenzselektiven Messgeräten möglich. Breitbandsonden haben Einschränkungen in Bezug auf Frequenzselektivität und Empfindlichkeit, sind aber aufgrund ihrer Handlichkeit sehr gut dazu geeignet, Orte mit maximaler Immission im Umfeld der Anlage vorzuselektieren.

Die Feinmessung erfolgt mit frequenzselektiven Spektrumanalysatoren bzw. Messempfängern sowie entsprechend geeigneten Empfangsantennen. Als Antennen können mit logarithmisch-periodischen Antennen einerseits sowie bikonischen Antennen bzw. Dipolen andererseits zwei unterschiedliche Antennentypen eingesetzt werden. Beide Antennentypen weisen Vor- und Nachteile auf. In Szenarien mit aus unterschiedlichen Richtungen einfallenden, gleich starken Immissionen (z.B. Innenräume ohne direkte Sicht auf die Sendeanlage) haben stärker richtende logarithmisch-periodische Antennen theoretisch Nachteile. Die schwach richtenden bikonischen Antennen bzw. Dipolantennen weisen dagegen eine teils extrem starke Beeinflussung durch den Messenden sowie von Mobilien oder Wänden auf das Messergebnis auf.

Diese Beeinflussungen können so stark sein, dass für vorliegende Untersuchungen primär der Einsatz von logarithmisch-periodischen Antennen empfohlen wird.

Die Messungen der Immission sollen im Fernfeld der Mobilfunk Basisstation erfolgen. Außerhalb des Sicherheitsabstandes ist die alleinige Messung der elektrischen Feldstärke hinreichend. Die elektrischen und magnetischen Feldanteile sind schon bei wesentlich geringeren Abständen, als es über die auf der maximalen geometrischen Ausdehnung der Antenne basierende Fernfeldformel definiert ist, über den Freiraumwellenwiderstand verknüpft.

Messungen mit dem Spektrumanalysator bzw. Messempfänger verlangen Grundkenntnisse in der Funktionsweise der Geräte und der wichtigsten Grundeinstellungen. Vor allem Auflösungsbandbreite, Detektortyp, Frequenzbereich, Videobandbreite und Sweep Time müssen korrekt auf das zu analysierende Mobilfunksignal eingestellt werden, da sonst signifikante Fehlbewertungen der Immission möglich sind. Leider sind die Defaulteinstellungen der Messgeräte für vorliegende Aufgabenstellung nicht durchgängig anwendbar. Deswegen werden die wichtigsten Grundeinstellungen definiert und in einer Tabelle zusammengefasst.

Neben der Einstellung der Messparameter hat vor allem die Messdurchführung einen großen Einfluss auf das Messergebnis. Hier ist vor allem zu diskutieren, ob an einem Messort das Maximum der Immission, oder der Mittelwert in einem Messvolumen ermittelt werden soll. Mit der Schwenkmethode, der Drehmethode und der Punktrastermethode stehen drei praxiserprobte, taugliche Methodiken zur Verfügung. Alle drei Verfahren liefern unter gleichen Randbedingungen bei sorgfältiger Durchführung identische Ergebnisse. Bezüglich des zeitlichen Aufwandes ist die Punktrastermethode am aufwändigsten und die Schwenkmethode am schnellsten. Bei Punktrastermethode und Drehmethode können sich je nach Messort Platzprobleme ergeben. Die Streuung der Ergebnisse der drei Methoden bei Messung durch unterschiedliche Labore ist vergleichbar. Insbesondere ist die Streuung der relativ aufwändigen Drehmethode und Punktrastermethode nicht besser als bei der einfacher durchzuführenden Schwenkmethode.

Allerdings ist die Punktrastermethode die einzige, die eine Mittelung innerhalb eines Messvolumens ermöglicht. Eine genauere Betrachtung zeigt jedoch, dass die „optimale“ Mittelungsgeometrie sehr stark vom Expositionsszenario abhängt und keine „allgemein gültige“ Geometrie angegeben werden kann. Durch die Reduzierung der Punkteanzahl auf praktikable Werte steigt die Sensibilität des Mittelungsergebnisses gegenüber Expositionsszenario sowie Art und Lage der Mittelungsgeometrie. Aus diesen Gründen wird eingeschätzt, dass die Schwenkmethode derzeit die am besten geeignete Methode für vorliegende Aufgabenstellung ist.

Die Reproduzierbarkeit der Schwenkmethode bei nacheinander folgenden Messungen mit gleichem Messequipment kann als sehr gut bezeichnet werden. Voraussetzung ist hier jedoch eine sehr sorgfältige Durchführung des Schwenkvorgangs, da alle Polarisierungen und Einfallrichtungen im Messvolumen erfasst werden müssen.

Die sich an die Messungen anschließende Auswertung umfasst im wesentlichen die Umrechnung der originär gemessenen Leistungs- bzw. Spannungspegel in Leistungsflussdichte- oder Feldstärkewerte, die direkt mit den normativen Grenzwertvorgaben verglichen werden können. Darüber hinaus sind die gemessenen Augenblickswerte auf maximale Anlagenauslastung hochzurechnen. Hierfür werden bei GSM Anlagen die Immissionen durch die zeitlich

konstanten BCCH (Sende Kontrollkanäle) ermittelt und mit der Zahl der maximal verfügbaren Kanäle verknüpft. Bei UMTS Anlagen sind nach den ersten Messerfahrungen zwei Trends bezüglich einer Hochrechnung erkennbar: Auch hier gibt es Signalisierungskanäle, die ständig on air sind. Diese können frequenzselektiv erfasst werden und unter der worst case Annahme, dass nur die Signalisierungskanäle zum Zeitpunkt der Messung aktiv waren, auf maximale Anlagenauslastung extrapoliert werden. Dieses Verfahren wird die Immission im Regelbetrieb wesentlich überschätzen. Eine korrekte Hochrechnung ist möglich, in dem die Hochrechnung auf Basis des kontinuierlich gesendeten CPICH Kanals erfolgt, dessen Immission zuverlässig aber nur mit codeselektivem Messequipment erfasst werden kann. Diese Messmethode ist nach derzeitigem Stand diejenige, die die größte Chance hat, sich bei Immissionsmessungen an UMTS Anlagen durchzusetzen.

Zur Dokumentation der Messungen ist ein Messbericht anzufertigen. Der Messbericht sollte mindestens so aufbereitet sein, dass für den Auftraggeber das Ergebnis der Messungen klar und verständlich dokumentiert ist und für Fachleute alle technischen und administrativen Informationen derart enthalten sind, dass das Vorgehen bei der Messung, die Rohergebnisse und die Auswertung der Messdaten *nachvollziehbar* sind. Im Messbericht ist ein Messunsicherheitsbudget aufzustellen, das sowohl gerätebedingte, als auch methodenbedingte Unsicherheiten berücksichtigt. Es wird dafür plädiert, die Messunsicherheit nicht auf die Messergebnisse aufzuschlagen.

Die bei den Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse sind in einem Vorschlag für eine diesbezügliche Messnorm zusammengefasst, der im Anhang enthalten ist.

Berechnungsverfahren für die Ermittlung der Exposition im Umfeld von Mobilfunk Basisstationen lassen sich grob in feldtheoretische, strahlenoptische, auf Freiraumausbreitung basierende und hybride Verfahren unterteilen. Da unter anderem in derartigen Softwarepaketen oftmals mehrere 10 Mannjahre Entwicklungsarbeit stecken, wurde auf kommerzielle bereits auf dem Markt befindliche Software aus den oben genannten Bereichen zurückgegriffen.

Die Mobilfunkantenne ist das Element, durch das die Verteilung der Immission seitens der Basisstation bestimmt wird. Hierbei hat der Downtiltwinkel einen großen Einfluss auf die Abstrahlcharakteristik im Bereich der Hauptstrahlrichtung und der Nebenkeulen. Der Downtilt stellt keinen fixen, einmal eingestellten Parameter dar, sondern wird im Rahmen der Netzoptimierung (hierbei auch zunehmend fernsteuerbar) variiert. Deswegen ist es für eine Berechnung, die nicht nur eine Momentaufnahme liefern, sondern auch eine längerfristige Immissionsprognose geben soll, sinnvoll, das Antennendiagramm so anzupassen, dass der Betriebszustand aller eingesetzten elektrischen Downtiltwinkel berücksichtigt werden kann. Darüber hinaus ist das Abstrahlverhalten einer Mobilfunkantenne abhängig von der Frequenz. Da diese im Rahmen des Frequenzplanwechsels stetigen Änderungen unterworfen ist, ist es auch hier sinnvoll, die Abstrahlcharakteristik in der Art anzupassen, dass die Abhängigkeit der Frequenz berücksichtigt wird. Auch die Montageumgebung bewirkt eine Änderung der Abstrahlcharakteristik. Damit diese in einer Modellierung vernachlässigt und somit eine deutliche Vereinfachung erzielt werden kann, wird auch dieser Einfluss durch die Synthese eines vereinfachten Abstrahldiagramms der Mobilfunkantenne berücksichtigt.

In diesen synthetisierten Abstrahlcharakteristiken wird somit die Abhängigkeit vom Downtilt, die Frequenzabhängigkeit und der Einfluss der Montageumgebung vereinfacht in einem Diagramm repräsentiert. Es ist sinnvoll, Softwarepakete zu verwenden, in denen Abstrahlcharakteristiken direkt eingelesen werden können.

Für die Modellierung der dreidimensionalen Umgebung einer Basisstation ist zu beachten, dass die notwendigen Geodaten bezüglich der Gebäudegrundrisse zu einem Großteil in den Liegenschaftskatastern der Katasterbehörden der Kreise und kreisfreien Städte enthalten sind. Darüber hinaus können diese Daten auch aus Satellitenbildern generiert werden. In diesem Zusammenhang ist aber als großer Nachteil zu bewerten, dass Informationen bezüglich der Höhe von den einzelnen Gebäuden nicht verfügbar sind. Diese müssen demnach abgeschätzt werden.

Bezüglich der Parameter der Basisstationen ist festzuhalten, dass nur ein Teil der für eine Berechnung benötigten Daten der Standortbescheinigung zu entnehmen sind. Deswegen ist eine Unterstützung der Mobilfunkbetreiber zwingend erforderlich.

Eine detaillierte Modellierung des Immissionsortes erweist sich vor allem bei Innenraumszenarien als sehr aufwändig. Anhand eines Beispiels konnte jedoch gezeigt werden, dass die Lage bzw. die Art des Mobiliars sowie eine Bewegung von Personen zwar das kleinskalig örtlich und zeitlich schwankende Interferenzbild verändern, die Größe der *Immissionsmaxima* aber weitgehend gleich bleibt. Deswegen ist eine detaillierte Nachbildung von Innenräumen entbehrlich.

Alle untersuchten Softwarepakete haben bezüglich dem Einbinden von Gebäuden, den verwendeten Materialien, der Behandlung der Mobilfunkantennen und der Darstellung der Ergebnisse Vor- und Nachteile. Es ist deswegen nicht sinnvoll, ein Programm anzugeben, dass für alle auftretenden Szenarien optimal geeignet und darüber hinaus einfach und schnell für „jedermann“ bedienbar ist.

Feldtheoretische Verfahren sind u.a. aufgrund des durch den enormen Speicherbedarfs und Rechenaufwands begrenzten Simulationsraum als nicht geeignet anzusehen, die Exposition in der Umgebung von Mobilfunkbasisstationen zu berechnen. Der für die hier betrachtete Aufgabenstellung benötigte Simulationsraum steht bei Hybridverfahren zwar zur Verfügung, aber der hohe Aufwand der Modellierung (z.B. Mobilfunkantenne) und das große einzubringende Know How stellt sehr hohe Anforderungen an den Benutzer. Sie sind deswegen nur für Benutzer zu empfehlen, die bereits Erfahrung und Know How im Umgang mit der numerischen Feldberechnung aufweisen. Darüber hinaus sind auch profunde Kenntnisse in der Antennentechnik vonnöten.

Es hat sich gezeigt, dass die für einen Vergleich zwischen Berechnung und Messung verwendeten Softwarepakete eine gute Prognose der Immission in Relation zum gemessenen Feldstärkewert bei einer Konfiguration mit direkter Sicht (LoS) zur Mobilfunkantenne liefern.

Wird eine Konfiguration untersucht, in der keine direkte Sicht zur sendenden Antenne vorliegt (nLoS), überschätzt die Methode „reine Freiraumausbreitung“ mit einer Beaufschlagung von 3 dB die Immission deutlich, wobei auf Strahlenoptik basierende Programme eine bessere Prognose liefern, die tatsächliche Immission aber auch unterschätzen können.

Zusammenfassend kann hier festgehalten werden, dass für eine Worst Case Abschätzung die Methode „reine Freiraumausbreitung“ mit einer Beaufschlagung von 3 dB zu empfehlen ist. Ist hingegen die Immission möglichst genau zu prognostizieren, sollten die Gebäude berücksichtigt werden. Hierbei ist aber zu beachten, dass unter Umständen auch Unterschätzungen möglich sind. Ferner ist der wesentlich höhere Modellierungsaufwand zu nennen.

Summary

The aim of the here presented study is to develop measurement as well as calculation methods, suited for the determination of the public exposure due to electromagnetic fields in the vicinity of cellular mobile phone base stations. The methods shall be suited for a check against exposure limits. In this context “vicinity” means the area outside the regulatory safety distance up to 200 m distance from the station.

The exposure distribution in the vicinity of cellular base stations exhibits certain specific characteristics, which have to be taken into account especially concerning the development of an appropriate measurement procedure. So the exposure shows small scale and large scale local as well as temporal variations. They are responsible for the fact, that the band width in possible exposure may be very large, reaching from values below $1 \mu\text{W}/\text{m}^2$ up to several $100 \text{ mW}/\text{m}^2$. The relevant exposure standard for Germany, 26. BImSchV, as well as Guidelines from the Federal Committee of Exposure Safety (Länderausschuss für Immissionschutz) define to perform measurements at the location of maximal exposure and to post process the measured values on the basis of the maximal measured results. Moreover, measurements have to be taken at highest operational state of the station; otherwise they have to be extrapolated appropriately.

Therefore, the measurement method to develop has to be able to find reliably the exposure maximum inside a local small scale varying field distribution and to provide the possibility of extrapolating the momentary measured values onto the maximum operational state. Just at this point it can be concluded, that measurements taken at one single locally fixed point may be too much erroneous and are not suited for the here described tasks. They may be suited better for continuous exposure monitoring or personal dosimeters, but these problems are excluded from the here presented project.

Moreover, the measurement method must fulfil high demands concerning sensitivity, separation of different stations as a prerequisite for exact extrapolation on maximal operational state, practicability, accuracy as well as reproducibility.

Basically exposure measurements are possible with broadband and frequency selective equipment. Broad band field probes have shortcomings concerning frequency selectivity and sensitivity, but they are well suited for pre selecting the locations with maximal exposure due to their handiness.

Detail measurements are performed with frequency selective spectrum analysers or measurement receivers and suitable receiving antennas. For antennas logarithmic-periodical (logper) as well as biconical antennas or dipoles can be used. Both types have advantages and shortcomings. In scenarios with multiple reflections, coming from different directions (non line of

sight scenarios inside buildings), logper antennas with higher directivity have theoretical drawbacks. Biconical or dipole antennas with low directivity do not exhibit this principal drawback, but may offer a strong influence of the user as well as walls or furnishings onto the results. These influences may be so strong, that logper antennas are highly recommended for this type of measurements.

The measurements shall be performed in the far field of the cellular station. In regions outside the safety distance a measurement of the electric field strength alone is regarded to be sufficient. Electric and magnetic field components are coupled over the free space impedance at much smaller distances from the antenna, as is defined by the far field formula based on the geometrical size of the base station antenna.

Measurements with spectrum analyser or measurement receiver desire broad knowledge of the basic operation of these devices as well as their settings. Especially resolution bandwidth, detector type, frequency range, video band width and sweep time must be correctly matched onto the base station signal to be analysed. Otherwise significant errors may be possible. Unfortunately default settings are not suitable often for the present problem. Therefore the most important settings are defined and summarised in a table.

Besides the measurement parameter settings also the measurement procedure has a large influence on the measurement results. Here first of all the question has to be discussed, onto whether the exposure maximum, or an averaged value over a volume has to be determined. With sweeping method, rotation method and raster method three practically tested methods are available. All methods lead to the same results, if performed carefully and under identical conditions. Concerning time effort the raster method is most time consuming; the sweeping method is the fastest one. With rotation method and raster method space problems may occur. The spread of the results concerning measurements by different laboratories is comparable. Especially the spread of the expensive raster method is not better than for the easier sweeping method.

Here it must be taken into account, that the raster method alone provides an averaging inside a measurement volume. A thorough investigation, however, shows, that an "optimal" average geometry strongly depends on exposure scenario and no "general" geometry can be found. By reducing the number of raster points to practical values the sensitivity of the averaging result to exposure scenario and type as well as location of the averaging geometry rises. Therefore the sweeping method is regarded to be the best suited for the present measurement problem.

Reproducibility of the sweeping method at successive measurements tends to be very good, assuming a very carefully operation of the sweeping procedure to correctly capture all polarisations and wave propagation directions in the volume.

The post processing covers the computation of the originally measured power or voltage values into flux densities or field strength values, directly comparable with the exposure standard limits. Also, the measured momentary exposures must be extrapolated to the maximal operational state of the station. For that, at GSM stations the exposure due to the time constant BCCH channels is extracted and connected with the maximal possible number of channels of the station. At UMTS, two trends can be observed at the moment: Here also signalling channels do exist. These can be captured with a frequency selective measurement and extrapolated onto the maximal state under the worst case assumption, that only signalling

(but no traffic) was present during the measurement. This procedure will overestimate the maximal exposure if the station is in normal operation with traffic. A correct extrapolation is possible, if the extrapolation is performed on basis of the P-CPICH channel. The CPICH exposure can be measured only with code selective equipment. This procedure is regarded to be the most promising for standardised exposure measurements around UMTS stations.

For documentation of the measurements a report has to be drawn up. The report have to be at least in this form, that the results are clear and easily understood for the customer. For experts all technical and administrative information has to be provided, that the measurements, the raw results and the post processing is comprehensible. A uncertainty budget has to be established, which takes into account equipment based an method based uncertainties. It is argued that the uncertainty is NOT added to the measurement results.

All results of the here presented investigations are summarised in a proposal for a cellular base station specific measurement standard.

Calculation methods for the determination of the public exposure due to electromagnetic fields in the vicinity of cellular base stations can roughly be divided into field-theoretical, ray-optical, free space based propagation and hybrid methods.

As such software packages contain often more than 10 men years of development work only commercial software was used for this study concluding all above defined groups.

The cellular radio antenna is that element from the point of a base stations that determines the distribution of the nuisance. In this context the downtilt angle influences the radiation pattern in direction of the main loop and the side loops rapidly. It has to be stressed out, that the downtilt angle represents no fixed but in the context of network optimisation mutable parameter (more and more remote controlled). As a simulation should result in a long-lasting prediction and not represent a snap-shot of the nuisance distribution it is reasonable to change the antenna radiation pattern in that way, that the operating status over all submitted downtilt angles is considered within one single radiation pattern.

In addition the directional radio pattern is dependent on frequency. As this parameter is often changed in the context of the frequency-plan it is also reasonable to adjust the radiation pattern in that way, that this dependency is considered.

Furthermore the installation vicinity of the cellular base station antenna provokes a change of the radiation pattern. To simplify the modelling of the scenario and therefore neglect the installation vicinity is also in that way considered as a new radiation pattern is synthesized.

The synthesized antenna radiation pattern represents as a conclusion the dependency of downtilt angle, frequency and influence of the installation vicinity. In this context its reasonable to use simulation software that is capable to import such antenna radiation patterns.

To model the three dimensional environment of a cellular base station geographic information as the outlines of buildings is needed. This information is mainly contained in the landed property register of the register authority of district towns or independent cities. In addition the data for this outlines of buildings can be generated out of satellite pictures. A great

disadvantage in this context is that information about the height of each building is not available. Therefore it has to be estimated.

Regarding the parameters for the cellular base station for its own it has to be pointed out, that desired parameters concerning the calculation are only partly available in the site certification. Therefore support from the mobile network operators is mandatory needed in this context.

A detailed modelling is primarily very extensive regarding indoor scenarios. An example demonstrated in this context, that the position and respectively the manner of the chattels as well as the movement of persons in fact changes the small scale location and time varying field distribution, but the amplitude of the maximum nuisance is extensively constant. Therefore a detailed modelling of indoor rooms is disposable.

Every investigated software shows according to inclusion of buildings, use of materials, handling of cellular radio antennas and the presentation of results advantages as well as disadvantages. Therefore it is not reasonable to point out *one* software package of its own, that is ideal suited for all scenarios and additionally fast and easy to use for everyone.

Among others field theoretical methods are because of the enormous memory requirements and calculation effort restricted in simulations range and therefore not regarded to be suited to calculate the exposure in the vicinity of cellular base stations. These aspects are indeed fulfilled by hybrid methods, but the enormous effort for the modelling (e.g. the base station antenna) and the great know-how needed are high demands for the user. These software packages are therefore suited for users, that already have experience and know-how with the numerical field calculations. In addition profound knowledge in antenna engineering is necessary.

The comparison between measurement and calculation with each used software shows a good prediction of the nuisance in relation to the measured field strength if a line of sight configuration (LOS) is existent.

If a non line of sight configuration (nLOS) is given according to the base station antenna, the method "free space" with an impact of 3 dB overestimates the measured field strength clearly whereas programs based on ray-optical methods provide a better prediction, but can also underestimate the real nuisance.

As a conclusion the method "free space" with an impact of 3 dB is recommended as a Worst Case prediction. If the prediction should be more precise buildings should be considered in simulation. It has to be kept in mind, that under certain circumstances an underestimation of the nuisance is possible. In addition the greater modelling effort has to be considered.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Summary	7
1 Einleitung	15
1.1 Zielsetzung des Forschungsvorhabens.....	15
1.2 Hintergrund des Forschungsvorhabens	15
1.3 Einordnung des vorliegenden Abschlussberichtes	16
2 Messverfahren	18
2.1 Einleitung	18
2.2 Ergebnisse der Analyse der Immissionsverteilung.....	19
2.3 Ableitung von Anforderung an Messverfahren.....	23
2.4 Vorgaben der 26. BImSchV	24
2.5 Entwicklung und Bewertung von geeigneten Messverfahren	25
2.5.1 Grundsätzliche Messverfahren	25
2.5.2 Auswahl der Messpunkte.....	27
2.5.3 Messgeräte und Hilfsmittel	29
2.5.3.1 Frequenzselektives Messverfahren.....	29
2.5.3.2 Breitbandiges Messverfahren	38
2.5.3.3 Kalibrierung der Messgeräte	40
2.5.4 Nahfeld Fernfeld Problematik	41
2.5.5 Wahl der Messparameter.....	44
2.5.5.1 Auflösungsbandbreite.....	45
2.5.5.2 Detektor	46
2.5.5.3 Frequenzbereich.....	47
2.5.5.4 Videobandbreite.....	48
2.5.5.5 Sweep Time	48
2.5.5.6 Sonstiges.....	49
2.5.5.7 Zusammenfassung	50
2.5.6 Messdurchführung	50
2.5.6.1 Einleitung.....	50
2.5.6.2 Vorstellung und Bewertung der Verfahren	51
2.5.6.3 Korrekte Erfassung der Polarisation.....	56
2.5.6.4 Genauigkeit.....	57

2.5.6.5	Zeitlicher Aufwand.....	60
2.5.6.6	Reproduzierbarkeit	61
2.5.6.7	Möglichkeiten und Grenzen der Mittelung	62
2.5.6.8	Fazit	64
2.5.6.9	Breitbandiges Messverfahren	65
2.5.7	Auswertung	66
2.5.7.1	Umrechnung der Messwerte auf Leistungsflussdichten bzw. Feldstärken.....	66
2.5.7.2	Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung (Spektrumanalysator)	67
2.5.8	Dokumentation	75
2.5.8.1	Administrative Angaben.....	75
2.5.8.2	Gegenstand der Messung.....	76
2.5.8.3	Daten der untersuchten Mobilfunk Sendeanlage.....	76
2.5.8.4	Auswahl der Messpunkte.....	76
2.5.8.5	Verwendete Messgeräte.....	76
2.5.8.6	Eingesetztes Messverfahren	76
2.5.8.7	Messergebnisse	77
2.5.8.8	Grenzwerte und Vergleich zu den Messwerten.....	77
2.5.8.9	Messunsicherheit	77
2.5.8.10	Ergebnis	83
2.6	Katasteransätze.....	83
3	Berechnungsverfahren	87
3.1	Einleitung	87
3.2	Wellenausbreitungsmodelle.....	87
3.2.1	<i>Strahlenoptische Ausbreitungsmodelle</i>	88
3.2.2	<i>Feldtheoretische Modellierung</i>	89
3.2.3	<i>Hybridmethoden</i>	89
3.2.4	<i>Fazit.....</i>	89
3.3	Verwendete Software.....	90
3.3.1	<i>EFC-400 Telekommunikation.....</i>	90
3.3.2	<i>EMF-Visual</i>	91
3.3.3	<i>Wireless Insite.....</i>	91
3.3.4	<i>Quickplan.....</i>	92
3.3.5	<i>Empire.....</i>	92
3.3.6	<i>Feko.....</i>	93
3.4	Detailbetrachtung der Mobilfunkantennen	93

3.4.1	<i>Abhängigkeit der Abstrahlcharakteristik vom Elektrischen Downtilt</i>	94
3.4.2	<i>Abhängigkeit der Abstrahlcharakteristik von der Frequenz</i>	99
3.4.3	<i>Einfluss der Montageumgebung auf die Abstrahlcharakteristik</i>	103
3.4.4	<i>Fazit</i>	107
3.5	Simulationsparameter	109
3.5.1	<i>Geodaten</i>	109
3.5.2	<i>Standortparameter der Mobilfunksendeanlage</i>	110
3.6	Anwendung der Softwarepakete auf reale Konfigurationen	111
3.6.1	<i>Vorbetrachtungen zu den Berechnungen und den Softwarepaketen</i>	113
3.6.1.1	Betrachtungen für die Berechnung innerhalb von Gebäuden.....	113
3.6.1.2	Test der Software anhand einfacher Szenarien.....	116
3.6.1.3	Geodaten	117
3.6.1.4	Behandlung von Materialien in den Softwarepaketen.....	120
3.6.1.5	Basisstationsparameter	121
3.6.1.6	Darstellung der Simulationsergebnisse	124
3.6.2	<i>Basisstationsstandort: Handelsstraße 76, 46519 Alpen</i>	125
3.6.3	<i>Basisstationsstandort: Hochstraße 1-3, 47443 Moers</i>	130
3.6.4	<i>Basisstationsstandort: Hombergerstraße 162, 47441 Moers</i>	138
3.6.5	<i>Basisstationsstandort: Hochstraße 57, 47798 Krefeld</i>	144
3.6.6	<i>Basisstationsstandort: Katharinenstraße 12, 44137 Dortmund</i>	150
3.6.7	<i>Basisstationsstandort: Zum Niepmannshof 5, 47475 Kamp-Lintfort</i>	156
3.6.8	<i>Basisstationsstandort: Inrather Straße 146, 47803 Krefeld</i>	161
3.6.9	<i>Auswertung der Berechnungsergebnisse</i>	164
3.7	Beurteilung der Programme und Zusammenfassung	168
3.7.1	<i>Empire und Feko</i>	168
3.7.2	<i>Wireless Insite</i>	169
3.7.3	<i>Quickplan</i>	170
3.7.4	<i>EMF-Visual</i>	171
3.7.5	<i>EFC-400</i>	172
3.7.6	<i>Fazit</i>	173
3.8	Flächendeckendes Kataster	176
3.8.1	<i>Datenverfügbarkeit</i>	176
3.8.2	<i>Aktualisierung</i>	177
3.8.3	<i>Anforderungen an das eingesetzte Berechnungsverfahren</i>	177
3.8.4	<i>Genauigkeit</i>	178

3.8.5	<i>Aufwandsabschätzung</i>	178
3.8.6	<i>Fazit</i>	179
	Danksagung	180
	Literaturverzeichnis	181
	Abkürzungsverzeichnis	186
	Verzeichnis häufig verwendeter Symbole	187
	Anhang: Vorgaben für eine Messnorm	A1-A6
1.	Zweck	A1
2.	Geltungsbereich	A1
3.	Begriffe	A1
4.	Vorgehensweise	A2
4.1	Auswahl der Messpunkte.....	A2
4.2	Messgeräte und Hilfsmittel.....	A2
4.3	Messparameter.....	A3
4.2	Messdurchführung.....	A3
5.	Auswertung	A4
6.	Dokumentation	A5

1 Einleitung

1.1 Zielsetzung des Forschungsvorhabens

Der vorliegende Endbericht ist Bestandteil des Forschungsvorhabens „Entwicklung von Mess- und Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Exposition der Bevölkerung durch elektromagnetische Felder in der Umgebung von Mobilfunk Basisstationen“ des Bundesamtes für Strahlenschutz. Die Verfahren sollen zur Überprüfung der Grenzwerte geeignet sein.

Der flächendeckende Ausbau der Mobiltelefonnetze, der Aufbau der modernen breitbandigen Multimedianeetze (UMTS) sowie der Aufbau des terrestrischen digitalen Rundfunks führen zu einer Erhöhung der Feldexposition der Bevölkerung insgesamt. Nicht zuletzt hervorgerufen durch die neue UMTS Technologie und den damit verbundenen Bedarf an etwa 40.000 neuen Basisstationen allein in Deutschland [SCHÜ 01] stehen derzeit vor allem die *Mobilfunk Basisstationen* der GSM und UMTS Netze im Zentrum der öffentlichen Diskussion. Deswegen werden andere HF Emittenten, wie z.B. Rundfunk- oder Fernsehsender, von einer weiteren Betrachtung in dieser Studie ausgeklammert. Weiterhin unberücksichtigt bleiben die Immissionen durch Mobilfunk Endgeräte, d.h. Handys für GSM oder UMTS.

Für den Strahlenschutz ist es dabei dringlicher denn je, *verlässliche* Daten über die tatsächlich vorliegende elektromagnetische Immission im Umfeld der Mobilfunk Basisstationen zu erhalten. Hierzu sind neben modellmäßigen Berechnungen vor allem Messungen erforderlich. Ziel des Vorhabens ist es deshalb, Mess- und Berechnungsverfahren zu entwickeln, die geeignet sind, die Exposition von Personen im Umfeld von Mobilfunk Basisstationen zu ermitteln. Die Verfahren sollen dabei zur Überprüfung der Grenzwerte geeignet sein.

1.2 Hintergrund des Forschungsvorhabens

Die tatsächlich vorliegende Exposition der Bevölkerung im Umfeld von Mobilfunk Sendeanlagen ist oftmals nicht bekannt. Die im Rahmen der immissionsschutzrechtlichen Prüfung zugrunde gelegte Standortbescheinigung macht hierzu keine Aussagen, sondern bestätigt anhand einer konservativen Abschätzung (worst case Ansatz) lediglich die Einhaltung der gesetzlichen Grenzwerte.

Bezüglich einer *Berechnung* der vorliegenden Immissionen 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 Grund sind Berechnungen in der Praxis meist ungenau. Es müssen je nach Anwendungsfall Vereinfachungen gemacht werden, die den tatsächlichen Immissionswert überschätzen (z.B. zur Sicherstellung der Einhaltung der Grenzwerte im Rahmen der Standortbescheinigung) oder unterschätzen (z.B. zur Sicherstellung der Mindestfeldstärke in einem bestimmten Bereich im Rahmen der Funknetzplanung).

Die Hochfrequenzmesstechnik ist prinzipiell ebenfalls gut entwickelt. Es stehen zwar für den gesamten Frequenzbereich grundlegende Messverfahren zur Verfügung, die jedoch unspezifisch bezüglich des zu untersuchenden Funkdienstes formuliert und nicht für ein spezielles Anwendungsgebiet, wie etwa für die Bestimmung von Immissionen durch Mobilfunk Basisstationen in Innenräumen, angepasst sind. Oftmals sind die Verfahren auch primär für Laboranwendungen (z.B. EMV- oder Antennenmesstechnik in künstlichen, reflexionsarmen Umgebungen) oder Anwendungen unter definierten Randbedingungen entwickelt und validiert worden. Speziell für den Mobilfunkbereich besteht großer Klärungsbedarf. Problematisch sind hier zum Beispiel die erheblichen zeitlichen und örtlichen Schwankungen der Feldverteilung, die ein geeignetes Messverfahren und eine spezielle Methodik hinsichtlich der Messdurchführung erfordern. Verlässliche, gut definierte und genormte Verfahren zur Erfassung der tatsächlichen Immissionen, denen die Bevölkerung durch Mobilfunk Basisstationen ausgesetzt ist, existieren derzeit im nationalen und internationalen Rahmen nur ansatzweise.

Unter dem Begriff *Umfeld der Mobilfunk Basisstation* soll in diesem Forschungsvorhaben der Bereich außerhalb des durch die Standortbescheinigung festgelegten Sicherheitsabstandes (in der Regel einige Meter in Hauptstrahlrichtung der Antenne, in andere Richtungen weniger) bis zu einer Entfernung von etwa 200 m von der Mobilfunk Basisstation entfernt verstanden werden. Der Bereich innerhalb des Sicherheitsabstandes wird ausgeklammert, da dieser bereits durch die Standortbescheinigung als jener Bereich klassifiziert worden ist, in dem mit einer Überschreitung der gesetzlichen Grenzwerte zu rechnen ist. In diesem Bereich ist ein Zutritt von Personen beschränkt bzw. ein Aufenthalt der Allgemeinheit nicht zulässig. Eine Überprüfung der Immissionen in diesem Bereich ist deswegen für vorliegendes Forschungsprojekt irrelevant. Der somit für das *Umfeld* gewählte Entfernungsbereich umfasst diejenigen Gebiete, in denen der Erfahrung nach das Interesse der Bevölkerung an der vorliegenden Immissionssituation am größten ist.

1.3 Einordnung des vorliegenden Abschlussberichtes

Der vorliegende Abschlussbericht bezieht sich auf das Arbeitspaket 3 des Forschungsvorhabens. Hierin werden, ausgehend von den Ergebnissen der vorangegangenen Literaturstudie [BOR 02-1] sowie der Analyse der Immissionsverteilung [BOR 04], geeignete Mess- und Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Exposition elektromagnetischer Felder von Mobilfunk Sendeanlagen entwickelt und bezüglich ihrer Eignung und Begrenzung diskutiert.

Bezüglich der *Messverfahren* werden, ausgehend von den Vorgaben der 26. BImSchV und den analysierten typischen Feldverteilungen mit ihren groß- und kleinskaligen örtlichen und zeitlichen Schwankungen, Anforderungen an mögliche Verfahren definiert. Besondere Bedeutung kommt dabei der Frage zu, in wie weit die Verfahren speziell für Vorort Messungen (indoor und outdoor) anwendbar, handhabbar und hinreichend genau sind.

Bezüglich geeigneter Messverfahren werden insbesondere folgende Punkte untersucht:

- Messprinzip, Messgeräte und Messparameter
- Messdurchführung

- Messfehler
- Auswertung und Messbericht.

Diskutiert wird in diesem Zusammenhang auch die *flächendeckende* Überwachung der Immissionen, und zwar

- als kontinuierliches Immissionsmonitoring mit einem Netz feststehender oder mobiler Messstationen, die aneinander angebunden sind und eine automatische Datenerfassung gewährleisten (vgl. bestehendes Netz von Monitoren zur Luftreinheitsüberwachung), bzw.
- als messtechnische Realisierung eines flächendeckenden Immissionskatasters. Es ist insbesondere wichtig zu ermitteln, mit welchem Aufwand und welcher Qualität ein solches Kataster zu realisieren ist.

Bezüglich der *Berechnungsverfahren* werden verschiedene kommerzielle Softwarepakete auf ihre Eignung zur Ermittlung der Exposition der Bevölkerung in der Umgebung von Funkseideanlagen untersucht. Die Bandbreite interessanter Konfigurationen in der Umgebung von Mobilfunkbasisstationen umfasst sowohl das Nahfeld, wo z.B. die Montageumgebung (Mast Hauswand, Dach) einen direkten Einfluss auf die Ausprägung der Richtcharakteristik der Antenne haben kann, als auch das Fernfeld mit Abschattungs-, Dämpfungs- und Beugungsphänomenen an großen Körpern wie zum Beispiel Häusern.

Anhand eines Kataloges von praxisrelevanten Konfigurationen wird die Eignung der Software untersucht.

Wichtige Kriterien bei der Bewertung der Software sind: Aufwand bei der Modellerstellung, numerischer Aufwand, Verfügbarkeit für verschiedene Rechnerplattformen, Genauigkeit der Ergebnisse, Preis-Leistungs-Verhältnis.

Die praxisrelevanten Konfigurationen werden auch messtechnisch untersucht. Anhand eines Vergleichs der Ergebnisse werden Schlussfolgerungen zur Eignung und Genauigkeit der Mess- und Berechnungsverfahren gezogen.

Abschließend erfolgt, wie bei den Messverfahren, eine Diskussion bezüglich einer Realisierbarkeit eines flächendeckenden Immissionskatasters aus rechentechnischer Sicht. Hier sind vor allem Datenverfügbarkeit, Aktualisierungserfordernisse, Genauigkeiten und Aufwandsabschätzungen von Interesse.

Es wird darauf hingewiesen, dass als Erfassungsgrößen von Messung und Berechnung ausschließlich Feldstärken (elektrische Feldstärke E oder magnetische Feldstärke H) bzw. Leistungsflussdichten (S) zum Einsatz kommen. Hierbei handelt es sich um Ersatzwerte, da der Basiswert im Hochfrequenzbereich, die spezifische Absorptionsrate (SAR), messtechnisch nur sehr schwer erfassbar ist. Bei einem Vergleich der ersatzweise verwendeten Feldstärken oder Leistungsflussdichten mit den Grenzwerten ist zu berücksichtigen, dass in der Ableitung der Referenzwerte elektrische Feldstärke, magnetische Feldstärke und elektrische Leistungsflussdichte aus dem Basisgrenzwert bereits diverse Sicherheitsfaktoren enthalten sind.

2 Messverfahren

2.1 Einleitung

Messaufgabenstellungen zur Beurteilung der Exposition durch Mobilfunk Sendeanlagen können sich aus unterschiedlichen Motivationen ergeben:

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 der Mobilfunkexposition 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“.

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 anstelle von worst case Situationen gewählt. Es erfolgt nicht generell eine Bestimmung aller Quellen.

Vorliegende Aufgabenstellung stellt eine Kombination aller vier Kategorien dar: Laut Aufgabenstellung muss das Messverfahren zwingend zur Überprüfung der Grenzwerte geeignet sein (Kategorie 1). Dies impliziert nach den gesetzlichen Bestimmungen der 26. BImSchV [26. BImSchV] automatisch eine Betrachtung des *maximalen* Betriebszustandes der Mobilfunk Sendeanlage.

Allerdings 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 (Sicherheitsabstand bis etwa 200 m) 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). Allerdings soll auch hier im Gegensatz zu Messungen für epidemiologische Fragestellungen primär der Grenzwertüberprüfungsaspekt im Vordergrund stehen (vergleiche hierzu auch die Ausführungen in Abschnitt 4.4 des 2. Zwischenberichtes zu diesem Forschungsprojekt [BOR 04]).

2.2 Ergebnisse der Analyse der Immissionsverteilung

Im 2. Zwischenbericht zu vorliegendem Forschungsprojekt [BOR 04] sind einige wichtige Erkenntnisse bezüglich der zeitlichen und örtlichen Verteilung der Immission im Umfeld von Mobilfunk-Basisstationen gewonnen worden, die einen großen Einfluss auf das zu entwickelnde Messverfahren haben. Diese speziellen Erkenntnisse sollen im folgenden zusammengefasst werden:

1. Die Immissionen an unterschiedlichen Messpunkten in direktem Umfeld von Mobilfunk Basisstationen unterliegen einer großen Streubreite. Die Bandbreite möglicher Immissionen im unmittelbaren Umfeld reicht von Werten weit unterhalb von $1 \mu\text{W}/\text{m}^2$ bis zu einigen $100 \text{ mW}/\text{m}^2$. Grund für diese große Schwankungsbreite sind zahlreiche anlagenseitige und immissionsortseitige Einflussfaktoren, die komplex zusammenwirken und in der Regel eine pauschale Vorhersage der zu erwartenden Immission stark einschränken. Bild 2.2.1 fasst die Einflussfaktoren zusammen. Dominierender Einflussfaktor ist der relative Höhenunterschied zwischen Immissionsort und Sendeanlage. Für die Suche nach Messpunkten, an denen ein Maximum der Immissionen durch eine Basisstation vorliegt, stehen somit Orte im Vordergrund, die sich höhenmäßig in Hauptstrahlrichtung der Sendeanlage sowie horizontal in Sektormitte befinden. Dabei ist auch der Downtilt zu berücksichtigen, der vor allem in innerstädtischen Gebieten (typisch $4\text{-}6^\circ$ bei GSM) signifikant größer sein kann als in ländlichen Gebieten (typisch $0\text{-}2^\circ$ bei GSM).

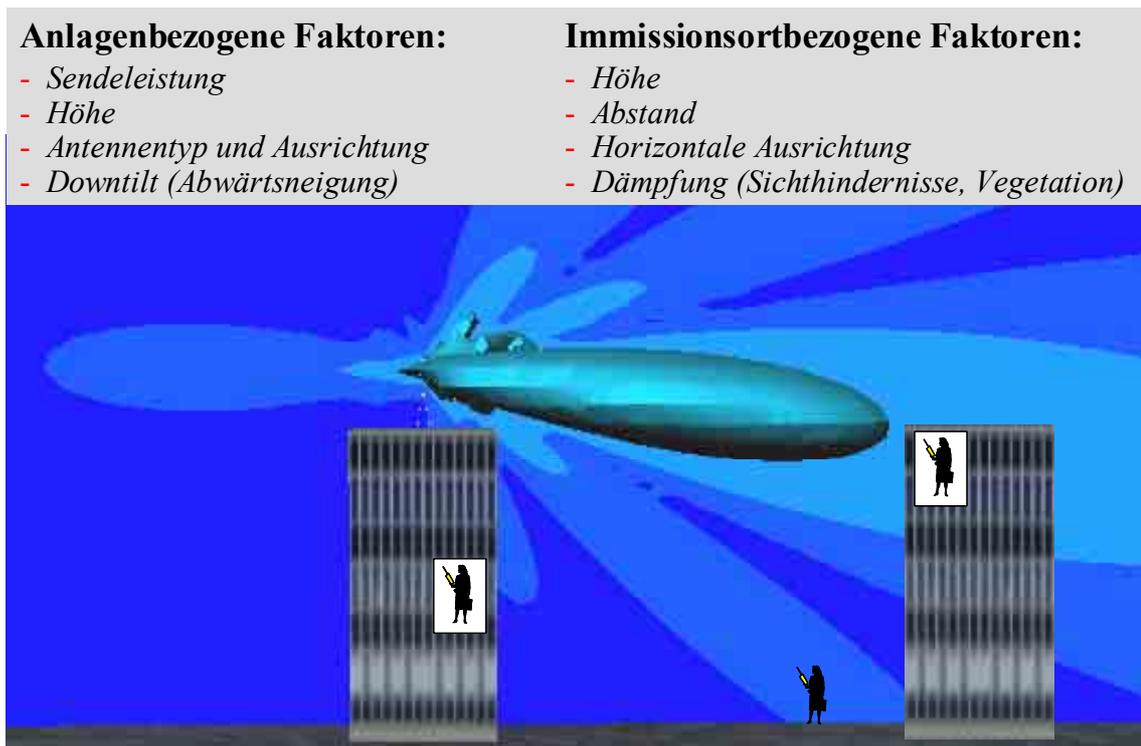


Bild 2.2.1 Einflussfaktoren für die Immission durch Mobilfunk Basisstationen

2. Zusätzlich zu den durch die vorgenannten Einflussfaktoren begründeten *großskaligen* Schwankungen ist die Immissionsverteilung auch innerhalb kleinerer Volumina im Meterbereich stark unregelmäßig. Diese so genannten *kleinskaligen* Schwankungen treten sowohl im Freien, als auch innerhalb von Gebäuden auf, sind aber in Innenräumen wesentlich stärker ausgeprägt. Ursache für diese Schwankungen sind „Fast Fading“ Effekte, bei denen die Funkwellen von der Basisstation zum Empfänger aufgrund von Reflexionen über mehrere Ausbreitungspfade gelangen und die einzelnen Teilwellen dabei interferieren. Die dabei entstehenden konstruktiven oder destruktiven Überlagerungen führen zu örtlichen kleinskaligen Schwankungen im Zentimeterbereich; die Schwankungsamplitude kann dabei mehr als 20 dB betragen. Bild 2.2.2 zeigt beispielhaft als Ergebnis einer numerischen Simulation die Verteilung der elektrischen Feldstärke in einem Innenraum, in den durch das linke Fenster eine ebene Welle der Frequenz 900 MHz einfällt. Damit wird die Immissionsverteilung in einem Raum simuliert, der direkte Sicht zu einer vor dem Fenster platzierten Sendeantenne hat. Der Umstand der kleinskaligen örtlichen Schwankungen muss im Messverfahren geeignet berücksichtigt werden. Schon hier kann abgeleitet werden, dass die Messwertaufnahme *an nur einem Raumpunkt* in Abhängigkeit vom konkreten Ort mit einem nicht mehr tolerierbaren Fehler behaftet sein kann.

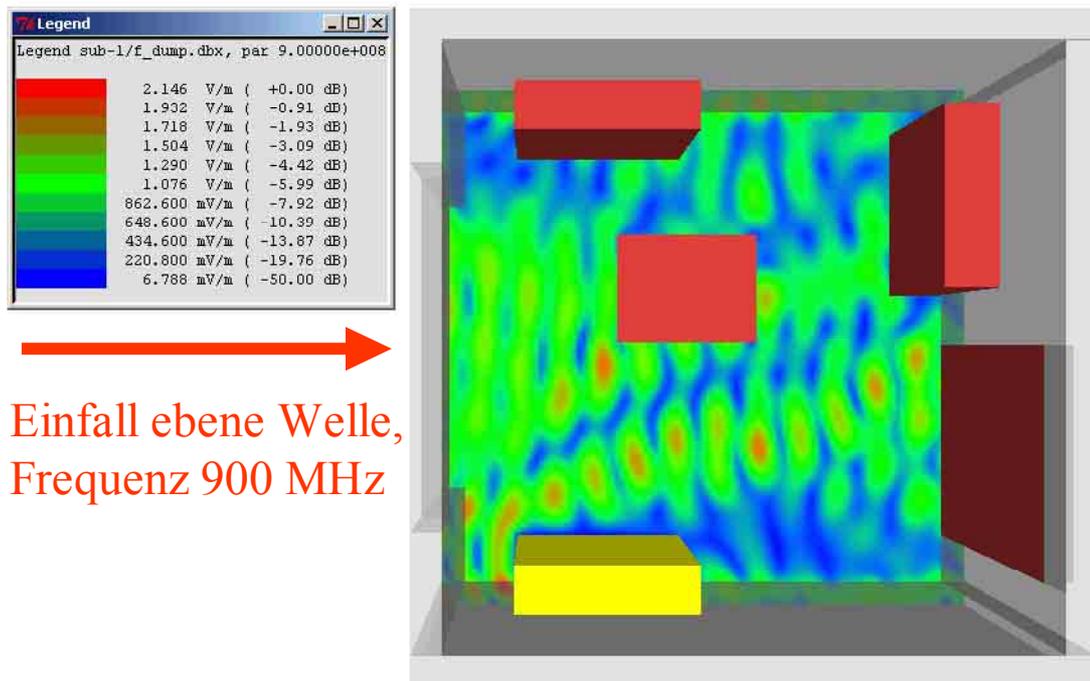


Bild 2.2.2 Verteilung der elektrischen Feldstärke in einem Innenraum, Draufsicht. Durch das linke Fenster fällt eine ebene Welle mit der Frequenz 900 MHz ein. Rot dargestellt sind Holzschränke und eine Holztischplatte, gelb ein Metallschrank.

3. Zusätzlich zu den *örtlichen* Schwankungen treten auch kleinskalige und großskalige *zeitliche* Schwankungen der Immission auf. Diese können anlagenbezogen und ausbreitungswegbezogen sein.

Anlagenseitige Schwankungen sind primär bei Anlagen zu beobachten, die über mehrere Kanäle verfügen und ab dem zweiten Kanal eine Leistungsregelung aufweisen. Diese sorgt dafür, dass entsprechend dem Verkehrsaufkommen sowohl großskalige Schwankungen im Tages- bzw. Wochenverlauf auftreten, als auch darüber liegende kleinskalige Variationen vor allem durch DTX (Discontinuous Transmission) und die verbindungsqualitätsabhängige Leistungsregelung. Dies hat die Konsequenz, dass vor allem in der Nähe mehrkanaliger Anlagen eine Augenblicksmessung die für eine Grenzwertaussage zwingend erforderliche „worst case“ Immissionssituation bei maximaler Anlagenauslastung nur unzureichend beschreibt bzw. unterbewertet. Als Konsequenz sind bei der Messung und in der Auswertung Techniken einzusetzen, die es ermöglichen, die gemessenen Augenblickswerte auf maximale Anlagenauslastung zu extrapolieren. Bild 2.2.3 zeigt am Beispiel einer 24 Stunden Messung einen typischen Verlauf der zeitlichen Schwankungen.

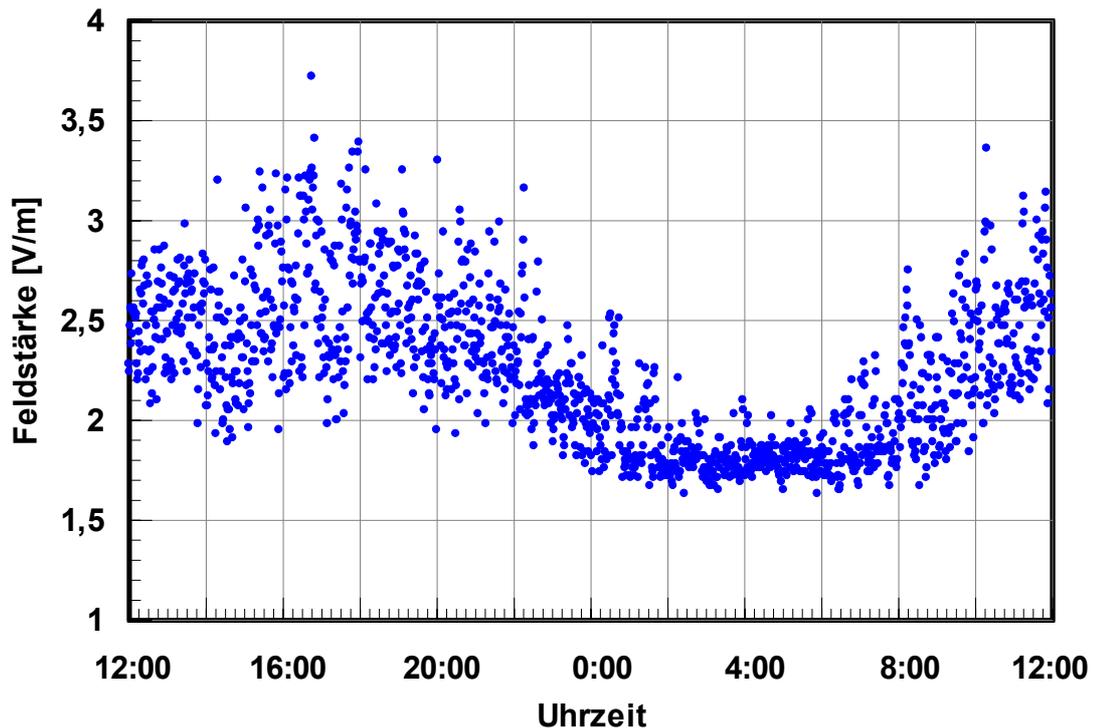


Bild 2.2.3 Ergebnis einer 24 Stunden Messung an einem festen Messpunkt in der Umgebung einer mehrkanaligen GSM Anlage

Ausbreitungswegbezogene zeitliche Schwankungen werden durch sich zeitlich verändernde Eigenschaften des Ausbreitungsweges verursacht (z.B. sich bewegende Personen, vorbeifahrende Autos oder auch windbewegte Bäume). Hierbei handelt es sich prinzipiell um eine zeitliche Änderung des Fast Fading Bildes. Deswegen können zur geeigneten messtechnischen Berücksichtigung dieser Schwankungen die selben Techniken zur Anwendung kommen wie bei den kleinskaligen örtlichen Schwankungen durch Fast Fading.

Großskalige jahreszeitliche Schwankungen im Ausbreitungsweg, wie z.B. durch veränderte Vegetation (Baum mit/ohne Laub) sind prinzipiell durch eine einzelne Vorortmessung schwer zu fassen. Allerdings ist bei Messpunkten mit freier Sicht zur Anlage ein dominanter Ausbreitungsweg vorhanden, der die Immission maßgeblich dominiert. Sich verändernde Reflexionen durch veränderte Vegetation spielt dann nur eine untergeordnete Rolle bzw. sind durch eine Maximalwertsuche innerhalb eines örtlich ausgedehnten Volumens zu fassen. Ist die Vegetation direkt im Ausbreitungsweg und fehlen andere, dominante Reflexionswege, wird die Immissionssituation jahreszeitlich schwanken. Nach [BOR 04] kann die Dämpfung durch einen belaubten Baum durchaus Werte im Bereich 5 dB bis 10 dB annehmen. Im Sinne eines „worst case“ Ansatzes wären dann Messungen in den Herbst- bzw. Wintermonaten sinnvoller als im Sommer.

2.3 Ableitung von Anforderung an Messverfahren

Aus den Erkenntnissen der beiden vorangegangenen Abschnitte sind an ein Messverfahren zur korrekten Ermittlung der von Mobilfunk Basisstationen ausgehenden Immissionen folgende Anforderungen zu stellen. Manche Anforderungen sind eng miteinander verknüpft, d.h. sie können nicht unabhängig voneinander erfüllt werden; andere sind gegenläufig.

1. **Hohe Empfindlichkeit:** Das Verfahren muss prinzipiell über eine solche Empfindlichkeit verfügen, dass Immissionen der Größe, wie sie typischerweise im Umfeld von Mobilfunk Basisstationen vorliegen, noch darstellbar sind. Typische Immissionswerte können in einigen 10 Metern Abstand von der Basisstation je nach Lage bezüglich der Leistungsflussdichte schon unter $1 \mu\text{W}/\text{m}^2$ bzw. bezüglich der elektrischen Feldstärke unter $0,1 \text{ V}/\text{m}$ liegen [BOR 04]. Dies stellt besondere Anforderungen an die eingesetzte Messtechnik.
2. **Frequenzselektivität:** Das Messverfahren muss die von Mobilfunk Anlagen ausgehenden Immissionen von anderen hoch- und niederfrequenten Immissionen (z.B. von Rundfunk oder TV Sendern ausgehende Immissionen) *trennen* können, da in vorliegendem Forschungsvorhaben nicht die kumulative Immission, sondern separat die der Mobilfunk Basisstationen ermittelt und bewertet werden soll.
3. **Einbeziehung aller relevanten Mobilfunkanlagen:** Das Verfahren muss in der Lage sein, die Immissionen *von allen Mobilfunk Sendeanlagen* zu ermitteln, die am Messpunkt einen relevanten Beitrag liefern. Relevante Beiträge liefert oftmals nicht nur die Sendeanlage vor Ort, sondern auch weiter entfernte Anlagen. Eine Unterscheidung der Beiträge unterschiedlicher Anlagen wird nur durch eine Frequenzselektivität der Messung gegeben sein.
4. **Grenzwertüberprüfung:** Das Verfahren muss in der Lage sein, verlässliche Messwerte zu liefern, die direkt mit den normativen Grenzwerten verglichen werden können. Hierzu sind insbesondere die in der 26. BImSchV festgelegten Bedingungen bezüglich Erfassung, Gültigkeit und Interpretation der Grenzwerte zu beachten.
5. **Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung:** Das Verfahren muss es ermöglichen, vom gemessenen Momentanwert der Immission auf den Wert bei *maximaler Anlagenauslastung* extrapolieren zu können. Laut der für Deutschland relevanten Grenzwerte, die in der 26. BImSchV niedergelegt sind, sind die Immissionen „bei höchster betrieblicher Anlagenauslastung“ zu betrachten.
6. **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 zum überwiegenden Teil innerhalb von Wohnungen und nicht nur im Freien befinden. 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 ist ebenso Voraussetzung wie eine möglichst geringe zeitliche Störung der Anwohner am Messort.
7. **Berücksichtigung von örtlichen Schwankungen:** Aufgrund der kleinskaligen örtlichen Schwankungen der Immission muss das Verfahren in der Lage sein, mittels einer besonderen Methodik der Messdurchführung diese Schwankungen in geeigneter Weise in der

Messwerterfassung und -auswertung zu berücksichtigen. Dabei ist auch die im allgemeinen nicht bekannte Lage des Feldstärkevektors im Raum zu beachten.

8. **Berücksichtigung von zeitlichen Schwankungen:** Gerade bei Messpunkten, die keine direkte Sicht auf die Anlage haben, können zeitliche Änderungen im Ausbreitungsweg (vorbeifahrende Autos, sich bewegende Personen, windbewegte Bäume) eine zeitlich schwankende Immission am Messort bewirken. Diese Schwankungen müssen mittels einer geeigneten Methodik der Messdurchführung erfasst werden können. Da es sich hier um eine zeitliche Änderung des Fast Fading Bildes handelt, kommen prinzipiell dieselben Methoden wie für Punkt 7 in Betracht.
9. **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.
10. **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.
11. **Dokumentation:** Die Dokumentation der Ergebnisse hat so zu erfolgen, dass eine Nachvollziehbarkeit der Messungen für Fachpersonal gewährleistet ist.
12. **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 mit Einschränkungen zu rechnen.

2.4 Vorgaben der 26. BImSchV

Laut Aufgabenstellung soll das Messverfahren zur Überprüfung der Grenzwerte geeignet sein. Das bedeutet, dass insbesondere die in der relevanten Personenschutznorm festgelegten Bedingungen bezüglich Erfassung, Gültigkeit und Interpretation der Grenzwerte zu beachten sind.

Die für Deutschland relevanten Grenzwerte sind in der „26. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV)“ vom 16. Dezember 1996 [26. BImSchV] festgelegt. Die 26. BImSchV ist auf Mobilfunk Basisstationen voll anwendbar.

Im folgenden sind diejenigen Anforderungen aus der 26. BImSchV sowie aus den LAI Hinweisen zur Durchführung dieser Verordnung [LAI 04], die bei der Entwicklung und Bewertung von entsprechenden Messverfahren relevant sind, aufgeführt:

- Die Grenzwerte werden angegeben als
 - Effektivwerte der
 - elektrischen und magnetischen Feldstärke,
 - quadratisch gemittelt über 6 Minuten Intervalle.
- Die Messungen sind bei der höchsten betrieblichen Anlagenauslastung durchzuführen; andernfalls sind die Werte entsprechend hochzurechnen.
- Immissionen anderer ortsfester Sendeanlagen sind zu berücksichtigen.
- Die Messungen sind am Einwirkungsort mit der stärksten Immission durchzuführen.
- Die Beurteilung der Messergebnisse erfolgt auf der Basis der maximal gemessenen Werte der Feldstärke oder Leistungsflussdichte am Messort.

2.5 Entwicklung und Bewertung von geeigneten Messverfahren

2.5.1 Grundsätzliche Messverfahren

Bei der Messung hochfrequenter Immissionen wird grundsätzlich zwischen *breitbandigen* und *frequenzselektiven* Messverfahren unterschieden. Der Hauptunterschied besteht darin, dass *breitbandige* Verfahren einen Gesamtwert für die Immission innerhalb eines durch das Messgerät festgelegten Frequenzbereiches ermitteln, wobei nicht zugeordnet werden kann, wie sich die Immissionsanteile frequenzmäßig und damit auch emittentenbezogen aufteilen. 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.

Für breitbandige Messungen werden Handmessgeräte mit Breitbandsonden eingesetzt. Bei frequenzselektiven Messungen finden üblicherweise Spektrumanalysatoren oder Messempfänger sowie passende Empfangsantennen und HF Kabel Verwendung. Die jeweiligen Messgeräte und Hilfsmittel werden in Abschnitt 2.5.3 ausführlich vorgestellt.

Vor allem die bei den breitbandigen Verfahren fehlende Frequenzinformation des Signals führt dazu, dass zur korrekten Ermittlung der Mobilfunk Immissionen vorrangig frequenzselektive Verfahren eingesetzt werden müssen. Aufgrund der fehlenden Frequenzinformation ist es bei breitbandigen Verfahren nicht möglich,

- Mobilfunk Immissionen von anderen hochfrequenten Immissionen zu trennen (wie viel des angezeigten Messwertes resultiert von der Mobilfunkanlage, wie viel des Wertes stammt von z.B. einer nahe gelegenen Rundfunkstation?),
- den gemessenen Momentanwert *korrekt* auf die Immission bei maximaler Anlagenauslastung zu extrapolieren, da der momentane Betriebszustand der Anlage in der Regel nicht bekannt ist, und
- bei frequenzabhängigen Grenzwerten einen korrekten Vergleich des Messwertes mit dem Grenzwert durchzuführen.

Außerdem bestehen bei Breitbandmessgeräten Einschränkungen hinsichtlich ihrer Empfindlichkeit. 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. nicht korrekt 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 nach 26. BImSchV als 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. Typische Immissionswerte bezüglich der elektrischen Feldstärke können in einigen 10 Metern Abstand von der Basisstation je nach Lage schon unter 0,1 V/m liegen [BOR 04]. Damit sind sie durch Breitbandsonden nicht mehr auflösbar.

Trotz dieses generellen Nachteils haben Breitbandsonden durchaus ihre Berechtigung. Aufgrund der guten Handlichkeit der Geräte sind sie insbesondere für Übersichtsmessungen bzw. zur Ermittlung der am höchsten exponierten Orte, an denen dann eine frequenzselektive Feinmessung durchgeführt wird, geeignet.

Dem gegenüber sind Spektrumanalysatoren in der Regel so empfindlich, dass unter Verwendung von geeigneten Antennen Immissionen gemessen werden können, die je nach Frequenzbereich bezüglich der elektrischen Leistungsflussdichte um mindestens 8 Größenordnungen, in den Mobilfunkfrequenzbereichen auch bis 10 Größenordnungen unter den Grenzwerten der 26. BImSchV liegen [BOR 96]. In Zusammenhang mit ihrer Frequenzselektivität sind sie daher bevorzugt für die Detailmessungen einzusetzen.

Den Vorteilen der frequenzselektiven Verfahren (Frequenzselektivität, Empfindlichkeit) steht ein deutlicher Nachteil gegenüber: Frequenzselektive Messungen sind ungleich aufwändiger als breitbandige Messungen. Das betrifft sowohl die finanzielle Seite des Messequipments, die Messdurchführung sowie das know how der mit der Messung Beauftragten. Überblicksmessungen oder das Absuchen großer Areale auf Maximalwerte mit dem frequenzselektiven Verfahren stellen beispielsweise einen beträchtlichen Aufwand dar, der oftmals nicht praktikabel ist. Dem gegenüber sind Breitbandsonden handlich, schnell und unkompliziert einsetzbar.

Seit kurzem gibt es eine neue Generation von tragbaren, handlichen Spektrumanalysatoren auf dem Markt, die die Vorteile von Breitbandsonden (Handlichkeit, isotrope Sonde) mit denen von Spektrumanalysatoren (Frequenzselektivität, Empfindlichkeit) miteinander verbinden sollen. Dies scheint vom Ansatz her eine interessante Alternative zu sein, wobei sich diese Geräte noch in der Praxis bewähren müssen.

Hier soll noch eine Problematik erwähnt werden, über die man sich bei der Durchführung der Messungen zumindest bewusst sein sollte: Wohingegen speziell für den Bereich der Arbeitsschutzmessungen konstruierte Geräte (oftmals Breitbandsonden) eine ausreichende Störfestigkeit gegenüber äußeren elektromagnetischen Feldern aufweisen, wird den ursprünglich aus der EMV Messtechnik stammenden Spektrumanalysatoren bzw. Messempfängern in der Regel nur die Einhaltung der CE Mindestanforderungen attestiert. Dies betrifft eine minimale Störfestigkeit von 3 V/m plus einer 80 %igen Amplitudenmodulation (AM) mit der Frequenz 1 kHz, bei Einsatz im Industriebereich auch bis 10 V/m + 80 % AM. Dies entspricht nach

Addition des Amplitudenmodulationsanteils garantierten Störfestigkeiten von 5,4 V/m bzw. 18 V/m (im Scheitelpunkt der resultierenden Hüllkurve). Einerseits erscheinen diese Störfestigkeiten für die Vielzahl der praktischen Anwendungsfälle (Messungen innerhalb des Sicherheitsabstandes von Mobilfunk Basisstationen ausgenommen) als ausreichend. Von den im vorliegenden Forschungsprojekt in [BOR 04] präsentierten Messreihen war die überwiegende Mehrzahl der Messwerte zumindest unter der Schwelle von 5,4 V/m. Der Maximalwert betrug etwa 10 V/m; hierbei ist aber zu berücksichtigen, dass diese vergleichsweise „hohen“ Werte hauptsächlich durch Hochrechnungen auf den maximalen Anlagenzustand zustande kommen, wohingegen die vor Ort gemessenen Momentanwerte entsprechend niedriger sind. Andererseits sollte berücksichtigt werden, dass für manche elektrischen Geräte nicht unbedingt eine bei den EMV Störfestigkeitsuntersuchungen auferlegte Amplitudenmodulation der worst case ist, sondern diese Geräte z.B. auf mobilfunktypische Pulsmodulationen empfindlicher reagieren können. Diese Störfestigkeitsproblematik ist somit zumindest im Auge zu behalten, wenn vergleichsweise hoch exponierte Messpunkte vorgefunden werden. Gegebenenfalls ist auch der Hersteller des entsprechenden Messequipments zu konsultieren.

2.5.2 Auswahl der Messpunkte

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

- 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.
- 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 Mobilfunkanlage die Grenzwerte überschritten werden oder es soll 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 Kapitel 2.5.1 beschrieben, keine Feinmessungen möglich sind, eignen sie sich jedoch hervorragend dazu, einen Überblick über die vorliegende Immissionsverteilung zu bekommen und diejenigen Orte mit maximaler Immission zu bestimmen, die in einem nachfolgenden Durchlauf mit dem frequenzselektiven 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. Die in vorliegendem Forschungsprojekt durchgeführte Analyse der Immissionsverteilung [BOR 04] liefert allerdings wertvolle Hinweise: So sind primär Orte aufzusuchen, die

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

Mit Hilfe numerischer Simulationen (siehe Kapitel 3) gibt es ebenfalls die Möglichkeit, Orte mit potenziell hohen Immissionen zu ermitteln.

- 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 von Messpunkten 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. Schlafzimmer und Wohnzimmer.

Messungen in Innenräumen sind, sofern möglich, im Sinne einer worst case Erfassung immer bei geöffnetem Fenster bzw. Balkontür durchzuführen, da beschichtetes Glas eine Dämpfung von 20-30 dB aufweisen kann. Für nicht beschichtetes Glas ist beim senkrechten Welleneinfall eine Dämpfung zwar kaum messbar, trotzdem können hier beim schrägen Welleneinfall Mobilfunkimmissionen reflektiert werden, die bei geöffnetem Fenster in die Wohnung gelangen würden.

2.5.3 Messgeräte und Hilfsmittel

2.5.3.1 Frequenzselektives Messverfahren

2.5.3.1.1 Allgemeines Messverfahren

Für die Durchführung von frequenzselektiven Messungen wird benötigt:

- ein Spektrumanalysator bzw. Messempfänger,
- eine auf den zu untersuchenden Frequenzbereich abgestimmte Empfangsantenne,
- HF-Kabel zum Verbinden der Antenne mit dem Spektrumanalysator,
- ggf. Speicherkarten zum Abspeichern der aufgenommenen Spektren.

Bild 2.5.1 zeigt die benötigten Geräte.



Bild 2.5.1 Durchführung einer frequenzselektiven Messung mit Spektrumanalysator und Empfangsantenne (links) und Detaildarstellung eines Ergebnisses auf dem Spektrumanalysator (rechts)

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.

Technisch wird diese Aufspaltung im Spektrumanalysator so realisiert, dass im gesamten eingestellten Frequenzbereich ein Filter mit einer bestimmten Bandbreite (Auflösungsbandbreite, RBW) den Frequenzbereich durchläuft. Bei jeder Frequenz wird derjenige Beitrag, der durch das Filter umfasst wird, als Anzeigewert dargestellt. Messungen 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 fehlerhaft bewertet werden.

Selbstverständlich muss der Spektrumanalysator bzw. Messempfänger für den zu untersuchenden Frequenzbereich geeignet sein. Für vorliegende Aufgabenstellung muss mindestens der Frequenzbereich von 921 MHz bis 2170 MHz umfasst werden. Dafür sind z.B. in der EMV Messtechnik eingesetzte Spektrumanalysatoren, die z.B. den Frequenzbereich von 9 kHz bis 2,9 GHz umfassen, geeignet.

Auch das Hochfrequenzleitungskabel und vor allem die Empfangsantennen müssen für den zu untersuchenden Frequenzbereich geeignet sein.

2.5.3.1.2 *Eingesetzte Antennen*

Als Empfangsantennen für den durch Mobilfunk Basisstationsantennen abgedeckten Frequenzbereich kommen prinzipiell Richtantennen, wie z.B. logarithmisch-periodische Antennen, oder auch dipolartige Antennen mit schwacher Richtwirkung, wie z.B. bikonische Antennen oder Dipole, in Frage.

Bei ungestörten Wellenausbreitungsbedingungen, d.h. idealerweise direkte Sicht zur Sendeantenne ohne Reflexionen (d.h. nur ein Ausbreitungspfad), ergeben beide Antennentypen, eine korrekte Kalibrierung vorausgesetzt, den gleichen Anzeigewert. Liegt hingegen eine stark reflektierende Umgebung ohne direkte Sicht zu den Sendeantennen vor, tragen zur Immission am Messpunkt mehrere, u.U. von der Größe her vergleichbare Teilwellen bei, die aus unterschiedlichen Raumrichtungen einfallen können. Diese werden bei einer schwach richtenden, im Idealfall isotropen Antenne besser erfasst und bewertet als bei einer Richtantenne, die manuell nur auf einen Einfallswinkelbereich orientiert werden kann und aus anderen Bereichen einfallende Teilwellen zwangsläufig unterbewertet.

Diese theoretischen Betrachtungen lassen sich in der Praxis wieder finden: In [RYS 02] sind ausführliche Vergleichsmessungen bei Mobilfunk Basisstationen an verschiedenen Messorten mit verschiedenen Antennen nach unterschiedlichen Verfahren durchgeführt worden. Bild 2.5.2 stellt zwei Ergebnisse aus dieser Vergleichsmessung vor, die sich in den Sichtbarkeitsverhältnissen zur Basisstation unterscheiden: Beim Ergebnis von Bild 2.5.2a handelt es sich um einen Messort, der direkte Sicht zumindest zu denjenigen Antennen hatte, die die Immission am Messort dominieren. In Bild 2.5.2b hingegen war vom Messort keine direkte Sicht zu den Antennen vorhanden. An den Messorten wurde mit Schwenk-, Dreh- und Punktrastermethode gemessen. Diese Verfahren werden unten ausführlich diskutiert.

Bei den Messwerten handelt es sich durchgehend um Ergebnisse von frequenzselektiven Messungen. Bei der Punktrastermethode wurde nur der höchste im Messvolumen gefundene Wert in die Auswertung einbezogen. Mit blauer Farbe sind Messwerte markiert, die mit bikonischen oder Dipolantennen ermittelt wurden. Rote Messpunkte entsprechen Messungen mit logarithmisch-periodischen Antennen. Die dick eingezeichnete waagerechte Linie kennzeichnet den „Referenzwert“, der mangels einer absoluten Referenz als Mittelwert aller frequenzselektiven Messungen am jeweiligen Messort (nach Elimination der zweifelhaften Messresultate) gebildet wurde.

Ein Vergleich der Verfahren soll hier vorerst nicht diskutiert werden; dies erfolgt bei der Untersuchung der unterschiedlichen Messverfahren im Abschnitt 2.5.6.

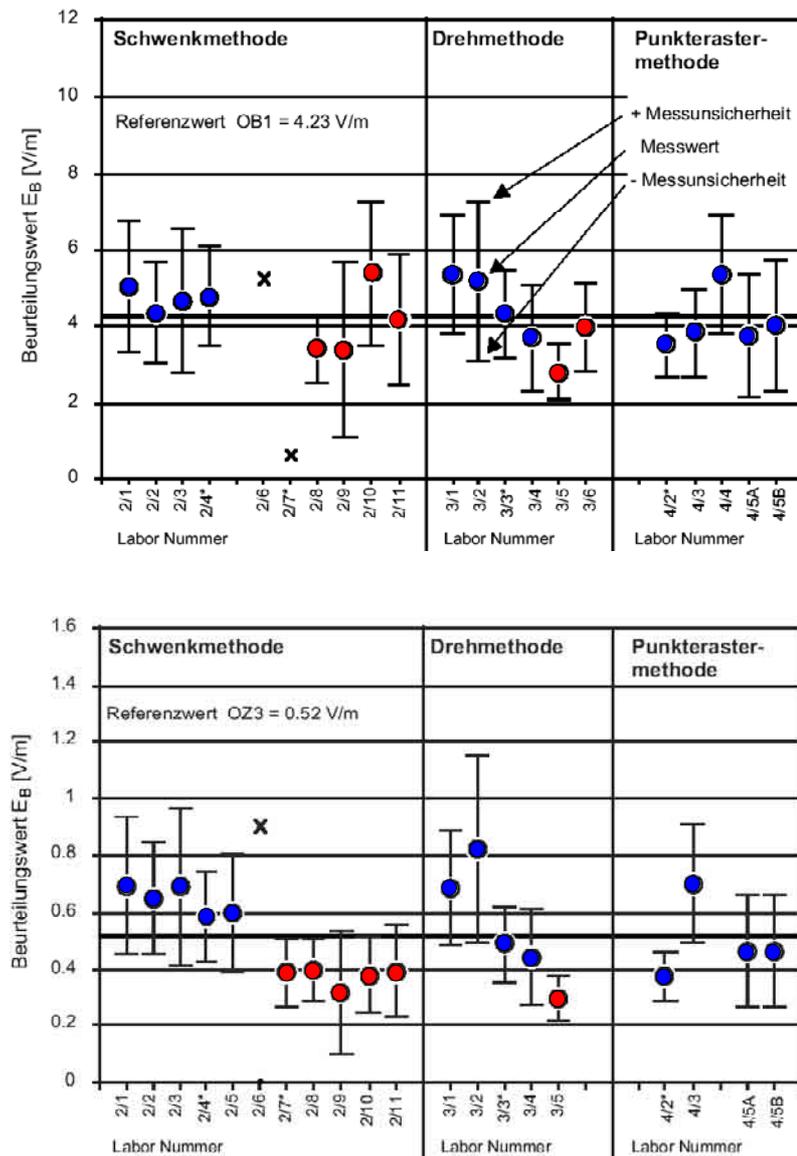


Bild 2.5.2 Ergebnisse von Vergleichsmessungen an Mobilfunk Basisstationen, aus [RYS 02].
 a) oben: Raum mit direkter Sicht zu den die Immission am Messort dominierenden Antennen
 b) unten: Raum ohne Sicht zu den Mobilfunk Basisstationsantennen
 blau gekennzeichnet: Messungen mit bikonischen oder Dipolantennen
 rot gekennzeichnet: Messungen mit logarithmisch-periodischen Antennen

Hier soll eher der Vergleich zwischen Messung mit dipolartigen Antennen (bikonische Antenne oder Dipolantenne) und der logarithmisch-periodischen Antenne im Vordergrund stehen. Die oben abgeleitete Vermutung, dass sich vor allem bei ungünstigen Mehrwegeausbreitungsverhältnissen Unterschiede bei beiden Antennentypen ergeben, wird durch die Messungen bestätigt. Wohingegen in Bild 2.5.2a (Sichtverbindung) bei der Schwenkmethode die Ergebnisse beider Antennentypen im selben Bereich liegen, ist in Bild 2.5.2b (Mehrwegeausbreitung, keine direkte Sicht) eine Tendenz dahingehend zu beobachten, dass die logarithmisch-periodische Antenne kleinere Ergebnisse als die bikonische/Dipolantenne ergibt. Von der Größenordnung her sind jedoch alle Ergebnisse vergleichbar.

Bei der Interpretation dieses Umstandes dürfen aber keine voreiligen Schlüsse gezogen werden. Sicherlich ist die oben erwähnte nicht korrekte Erfassung von aus gegensätzlichen

Raumrichtungen einfallenden Immissionen bei der logarithmisch-periodischen Antennen zum Teil für diesen Effekt verantwortlich. Es fällt aber auf, dass z.B. die Ergebnisse der Punktrastermethode, obwohl alle mit bikonischen Antennen durchgeführt, tendenziell auch wertmäßig unter den Ergebnissen der Schwenkmethode liegen. Dies lässt sich nicht pauschal mit zu niedrigen Punktzahlen der Rastermethode erklären, da vor allem bei den Laboren 4/5A und 4/5B mit 63 bzw. 76 Punkten Punktmengen erreicht wurden, die als durchaus ausreichend erachtet werden, um das Maximum im dadurch aufgespannten Messvolumen zu finden.

Hier wird ein anderer Effekt vermutet, der bei der Diskussion um unterschiedliche Antennentypen ebenso wie die korrekte Berücksichtigung aller möglicher Einfallsrichtungen der Signale kritisch diskutiert werden muss:

Es handelt sich hierbei um eine mögliche Beeinflussung des Messenden auf das Messergebnis, die bei beiden Antennentypen unterschiedlich ausfallen wird. Speziell bei den nur schwach richtenden bikonischen Antennen bzw. bei Dipolen ist durch die „Gleichgewichtung“ unterschiedlicher Einfallsrichtungen eine wesentlich stärkere Beeinflussung des Ergebnisses durch den Messenden im Vergleich zur logarithmisch-periodischen Antenne zu erwarten. Um diese Theorie zu überprüfen, wurden vom IMST Untersuchungen nach folgendem Versuchsaufbau durchgeführt:

Um von äußeren Störeinflüssen unabhängige Ergebnisse zu erhalten und eine „definierte“, reproduzierbare Messumgebung zu schaffen, wurde als Messort die EMV Absorberkammer des IMST ausgewählt. Durch die Absorberbelegung der Kammer an den Wänden und an der Decke werden ungestörte Wellenausbreitungsbedingungen geschaffen, d.h. die Messergebnisse werden nicht durch Wandreflexionen bzw. Resonanzen unreproduzierbar beeinflusst. Das zu messende Feld der Basisstation wurde mit einer logarithmisch-periodischen Antenne erzeugt, die an einen Signalgenerator angeschlossen war (im Vordergrund auf dem Holzstativ von Bild 2.5.3 links). Mit dieser Anordnung wurden sowohl bei vertikaler, als auch bei horizontaler Polarisation Felder bei 945 MHz und 1840 MHz erzeugt (in etwa mittlere Downlinkfrequenzen von GSM 900 und GSM 1800). In 5 m Entfernung wurde auf gleicher Höhe (1,5 m) eine kopolarisierte Empfangsantenne aufgestellt (im Hintergrund von Bild 2.5.3 links bzw. in Bild 2.5.3 rechts). Als Empfangsantenne wurde wahlweise eine logarithmisch-periodische Empfangsantenne, als auch eine bikonische Empfangsantenne verwendet. Die dabei speziell eingesetzten Antennen (logarithmisch-periodische Antenne: Schwarzbeck USLP 9142, bikonische Antenne: Schwarzbeck VUBA 9117) gehören zur typischen Ausstattung bei Immissionsmessungen an Mobilfunk Basisstationen. Die Empfangsantenne wurde an einen Spektrumanalysator außerhalb der Kammer angeschlossen. Als Referenzwert diente der Wert, der sich bei „leerer“ Kammer, d.h. ohne Anwesenheit einer Messperson ergab. Anschließend begab sich eine Messperson in den Raum und bewegte sich auf der Linie Sendean-tenne-Empfangsantenne von hinten aus ca. 3,0 m Entfernung direkt auf die Empfangsantenne zu. Somit konnte die Beeinflussung der Messergebnisse durch den Messenden bei unterschiedlichen Abständen zur Empfangsantenne untersucht werden.

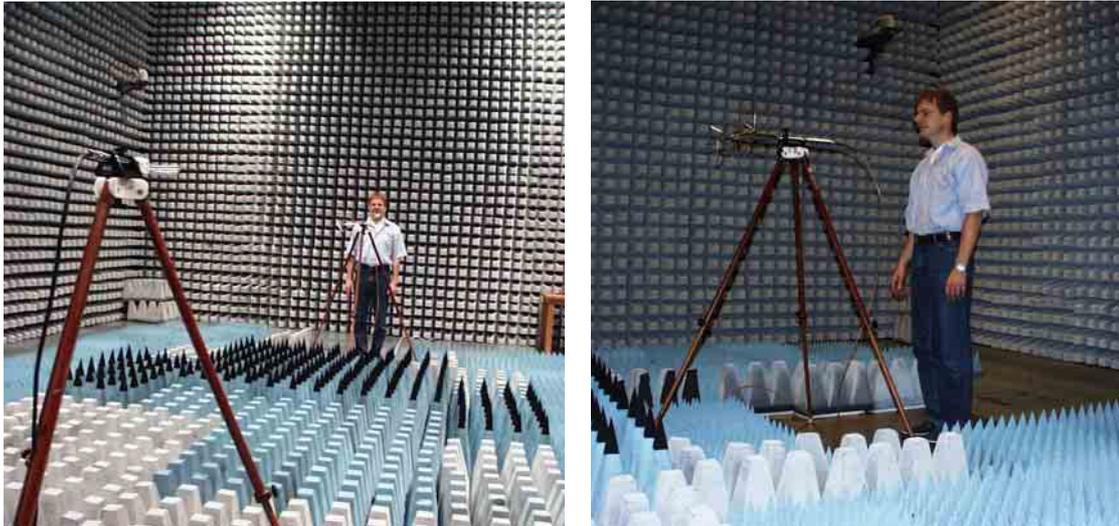


Bild 2.5.3 Versuchsaufbau zur Ermittlung des Einflusses des Messenden auf die Messergebnisse bei unterschiedlichen Antennentypen. Links: Gesamte Messstrecke mit Sendeantenne im Vordergrund und Empfangsantenne im Hintergrund. Rechts: Empfangsantenne.

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

In den Bildern 2.5.4 bis 2.5.7 ist als Ergebnis die Abweichung (Messwert bei Anwesenheit des Messenden) – (Referenzwert bei ungestörter Messumgebung) angegeben. Die logarithmisch-periodische Antenne (logper) ist mit roten Markierungen, die bikonische (bikon) mit blauen Markierungen eingezeichnet. Gemessen wurde an den markierten Punkten; nur der Übersichtlichkeit halber sind die Markierungen durch Linien verbunden.

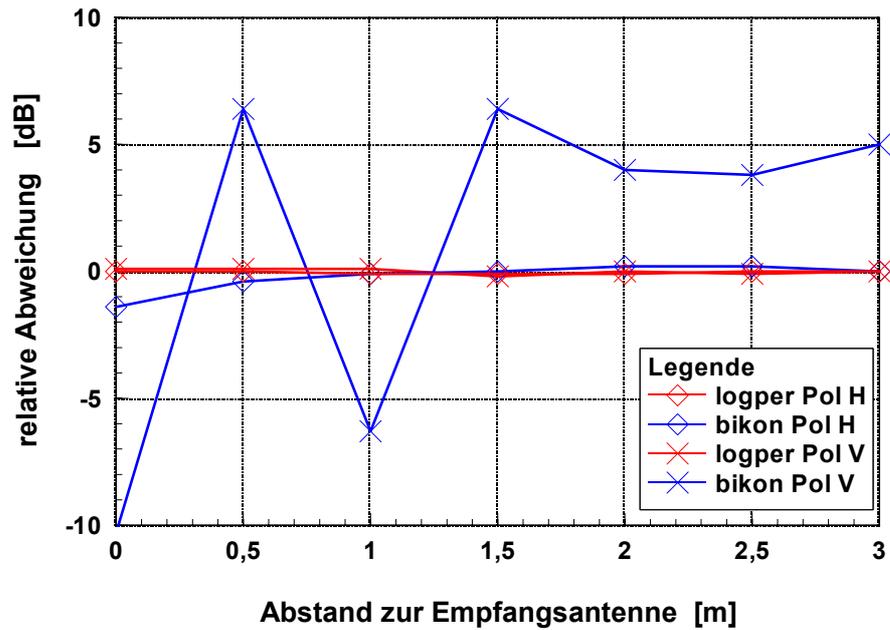


Bild 2.5.4 Relative Abweichung der Messwerte bei Anwesenheit des Messenden in Relation zum ungestörten Fall in Abhängigkeit des Abstands des Messenden zur Empfangsantenne. 945 MHz, ohne Bodenabsorber.

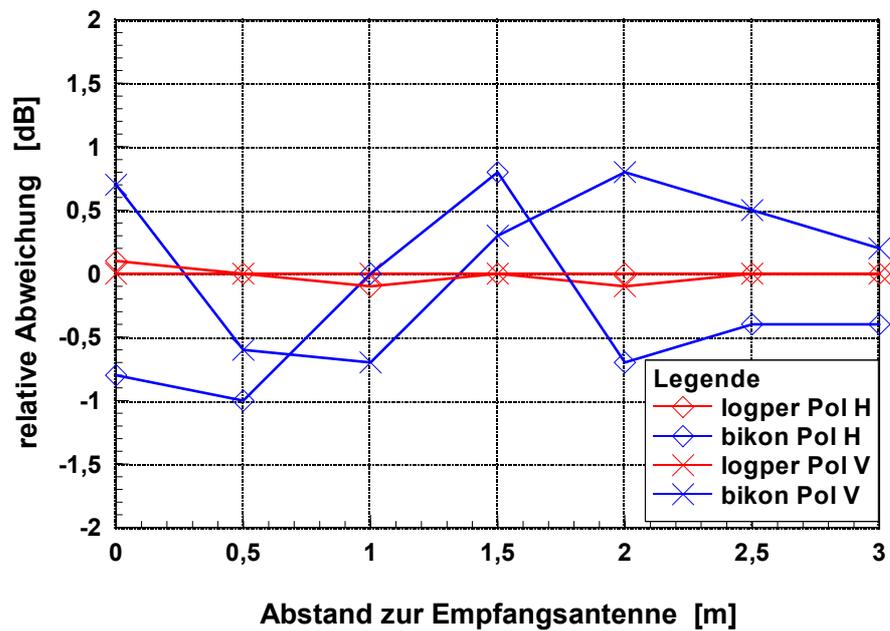


Bild 2.5.5 Relative Abweichung der Messwerte bei Anwesenheit des Messenden in Relation zum ungestörten Fall in Abhängigkeit des Abstands des Messenden zur Empfangsantenne. 945 MHz, mit Bodenabsorbern.

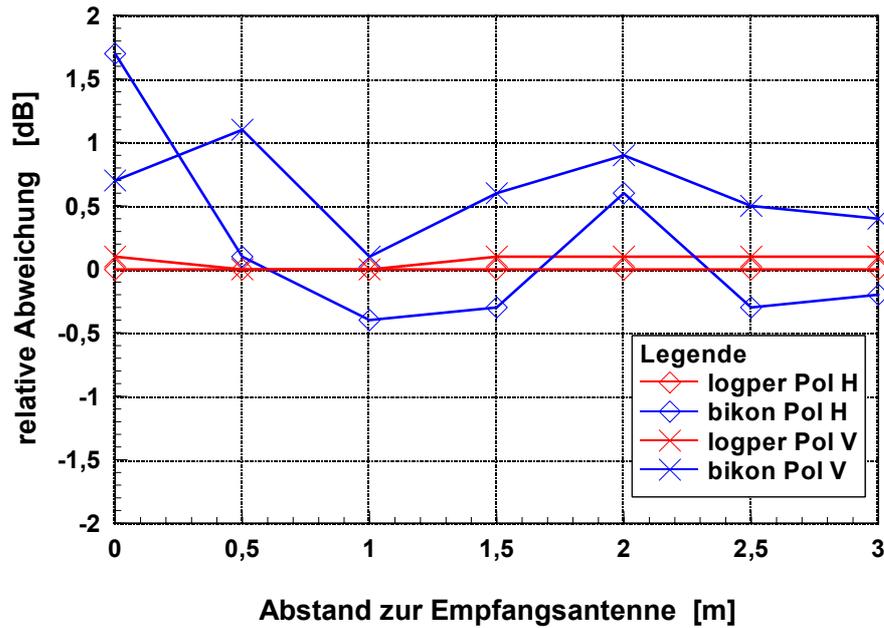


Bild 2.5.6 Relative Abweichung der Messwerte bei Anwesenheit des Messenden in Relation zum ungestörten Fall in Abhängigkeit des Abstands des Messenden zur Empfangsantenne. 1840 MHz, ohne Bodenabsorber.

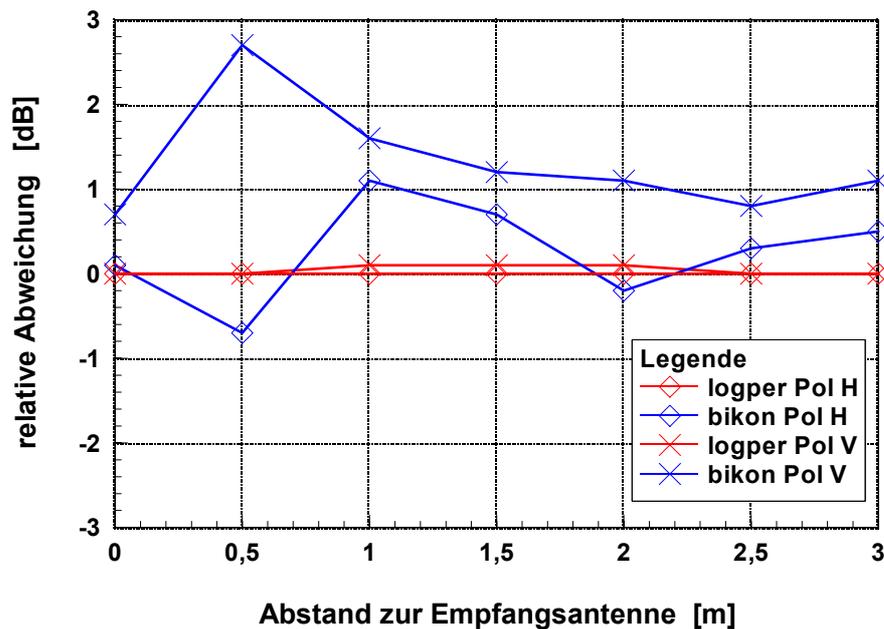


Bild 2.5.7 Relative Abweichung der Messwerte bei Anwesenheit des Messenden in Relation zum ungestörten Fall in Abhängigkeit des Abstands des Messenden zur Empfangsantenne. 1840 MHz, mit Bodenabsorbern.

Als Ergebnis kann festgestellt werden, dass sich die logarithmisch-periodische Antenne durch die Anwesenheit des hinter ihr stehenden Messenden weitgehend unbeeindruckt zeigt. Die maximale relative Abweichung vom ungestörten Fall ist an lediglich einem Messpunkt 0,2 dB und liegt ansonsten bei 0,1 dB oder sogar 0,0 dB. Bei der bikonischen Antenne sieht der Fall anders aus. Offensichtlich findet sich der theoretisch vermutete Einfluss des Messenden

wieder. Die Abweichung zum ungestörten Fall ist bei 945 MHz und vertikaler Polarisation ohne Bodenabsorber am größten und beträgt dort bis zu -10,3 dB. Bedeutsam ist, dass bei zunehmendem Abstand keine monotone Veränderung, sondern eher eine sprunghafte Veränderung der Abweichungen beobachtet werden kann und es auch bei Abständen des Messenden von 3 m noch zu signifikanten Abweichungen kommen kann. Dies deutet auf Reflexion der Sendesignale am Messenden und Überlagerung des reflektierten Signals mit dem direkten Signal an der Empfangsantenne hin. Je nach Abstand des Messenden überlagern sich die Signale konstruktiv oder destruktiv. Bei geringem Abstand des Messenden zur Empfangsantenne kann der Einfluss des Messenden auch als Verzerrung des Empfangsantennendiagramms interpretiert werden. Die Abweichungen bei Einsatz der bikonischen Antenne bei anderen Bodenbelegungen, Polarisationen und Frequenzen sind zwar nicht mehr so groß wie im erwähnten Maximalfall, aber immer noch relevant.

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

Eine unterschiedliche Beeinflussung beider Antennentypen erfolgt in realen Umgebungen nicht nur durch den Messenden, sondern auch durch die „nicht reflexionsfreie“ Messumgebung. Messantennen sind üblicherweise im Freiraum kalibriert; die Kalibrierfaktoren sind streng genommen auch nur für diesen Fall gültig und weichen in realen Messumgebungen davon ab [KRA 03]. Dies ist insbesondere dann festzustellen, wenn man sich mit der Antenne zu dicht an Mobiliar, Wände oder Boden bewegt. Anhand eigener Messungen wurde festgestellt, dass die bikonische Antenne bei Annäherung an einen Metallschrank einen plötzlichen Sprung des Immissionsergebnisses um mehr als 10 dB verursachte, der bei Einsatz der logarithmisch-periodischen Antenne nicht zu reproduzieren war.

Bei den Versuchen wurde beobachtet, dass bei einigen der Szenarien der Pegel am Spektrumanalysator bereits beim Eintreten der Versuchsperson in die Absorberkammer (beachte: die Versuchsperson begab sich nie direkt in den Bereich zwischen Sende- und Empfangsantenne!) bei Abständen von mehr als drei Metern erheblich zu schwanken begann. Dieser Effekt wird häufig auch bei Messungen nach der Punktrastermethode beobachtet, bei der sich der Messende üblicherweise nicht direkt im zu vermessenden Prüfvolumen aufhält: Bei Bewegungen des in der Nähe befindlichen Messpersonals oder durch vorbeigehende Personen sind teilweise deutliche Pegelschwankungen an der Messantenne zu beobachten.

Bei der Schwenkmethode ist der Abstand des Messenden zur handgeführten Messantenne in der Regel wesentlich kleiner als die hier maximal untersuchten 3 m. Bei kleineren Abständen traten tendenziell größere Abweichungen auf. Da diese Schwankungen bei geringfügigsten Positionsänderungen (die Antenne wird in Relation zum vergleichsweise feststehenden Körper des Messenden geschwenkt) wie erwähnt positiv oder negativ in Relation zum „unge-

störten“ Wert sein können, bei den Messungen aber üblicherweise mit der „Maxhold“ Funktion der Maximalwert am Spektrumanalysator festgehalten wird, werden sich diese Einflüsse des Messenden in diesem Fall als „Überbewertung“ der tatsächlichen Immissionsituation bemerkbar machen. Diese Interpretation könnte den anfangs beschriebenen wertemäßigen Unterschied der Resultate der Schwenkmethode im Vergleich z.B. zu den Ergebnissen der Punktrastermethode bei gleichem Antennentyp erklären.

Bleibt jedoch bei Messungen mit der bikonischen Antenne der Abstand zwischen Messperson und Messantenne konstant, kann theoretisch auch unter Verwendung der „Maxhold“ Funktion eine Unterbewertung erfolgen. Diese Gefahr lässt sich durch eine Vergrößerung des Antennenabstands zum Messenden mit einer nichtmetallischen Halterung sowie durch eine kontinuierliche Veränderung des Abstands zur Antenne während des Schwenkens minimieren.

Bereits hier kann deswegen abgeleitet werden, dass

- zur Vergrößerung des Antennenabstands zum Messenden eine nichtmetallische Halterung vor allem bei der bikonischen Antenne dringend geboten ist und
- bei den Messungen generell ein Mindestabstand von etwa 50 cm zu Mobiliar bzw. Wänden einzuhalten ist.

Außer bikonischen Antennen, Dipolantennen und logarithmisch-periodischen Antennen existieren seit kurzem in Verbindung mit den bereits in Abschnitt 2.5.1 erwähnten tragbaren Spektrumanalysatoren auch isotrope Empfangsantennen. Dies bestehen in der Regel aus drei orthogonal im Sondenkopf angeordneten, elektrisch kurzen Dipolen. Diese werden mittels einer Programmablaufsteuerung sequenziell an den Eingang des nachfolgenden Spektrumanalysators geschaltet. Mittels einer Software werden im Nachhinein die Messwertanteile aller drei orthogonalen Dipolelemente geometrisch aufaddiert und zur Anzeige gebracht. Hieraus resultiert eine signifikante Reduzierung der Messzeit vor allem bei der später noch detailliert erläuterten Punktraster- und Drehmethode, da die Polarisierung der Empfangsantenne nicht mehr manuell verändert werden muss. Bei der Schwenkmethode fällt dieser Vorteil nicht so stark ins Gewicht, da man sich durch die Isotropie lediglich das Drehen der Empfangsantenne in verschiedene Polarisationsrichtungen erspart. Hier ist viel mehr zu berücksichtigen, dass die Schwenkgeschwindigkeit äußerst gering zu wählen ist: Pro Messpunkt sind durch die sequenzielle Messung der drei Raumkomponenten drei Sweeps abzuwarten, bis der Sensor an eine neue Position bewegt werden darf. Bei üblichen Sweepzeiten für GSM und vor allem UMTS in der Größenordnung von 100 ms (siehe unten) führt diese zu einer signifikanten Verringerung der möglichen Schwenkgeschwindigkeit. Bezüglich des Einflusses von Messpersonal, Mobiliar und Wänden auf die Messergebnisse gilt prinzipiell das selbe wie für nur schwach richtende Antennen.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass mit logarithmisch-periodischen Antennen einerseits sowie bikonischen Antennen bzw. Dipolen andererseits zwei unterschiedliche Antennentypen eingesetzt werden, die sich bezüglich ihrer Richtwirkung unterscheiden. Beide Antennentypen weisen Vor- und Nachteile auf. In Szenarien mit aus unterschiedlichen Richtungen einfallenden, gleich starken Immissionen (z.B. Innenräume ohne direkte Sicht auf die Sende-

anlage) haben stärker richtenden logarithmisch-periodischen Antennen theoretisch Nachteile. Die schwach richtenden bikonischen Antennen bzw. Dipolantennen weisen dagegen eine teils extrem starke Beeinflussung des Messenden sowie von Mobiliar oder Wänden auf das Messergebnis auf. Diese Beeinflussungen können so stark sein, dass für vorliegende Untersuchungen primär der Einsatz von logarithmisch-periodischen Antennen empfohlen werden muss. Bikonische bzw. Dipolantennen haben dann ihre Berechtigung, wenn für den Einsatz von Mittelungstechniken Antennen mit dipolartigem Charakter gefordert sind. Als Alternative zur manuellen Ausrichtung der Antenne in den drei Raumrichtungen sind mittlerweile auch frequenzselektive Messgeräte mit einer isotropen Sonde verfügbar.

2.5.3.2 *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 2.5.8 zeigt als Beispiel für ein breitbandiges Messgerät das Gerät EMR-300 der Firma Narda Safety Test Solutions mit aufgesteckter E-Feldsonde Typ 18.



Bild 2.5.8 Breitbandiges Feldstärkemessgerät mit aufgesteckter Messsonde

Als Empfangselemente werden im Sondenkopf in der Regel elektrisch kurze Dipole eingesetzt. Die Empfangsspannung jedes Dipols wird über eine Diodenstruktur (seltener: Thermo-

elemente) geleitet und über eine hochohmige Ableitung der Auswerte- bzw. Anzeigeeinheit zugeführt.

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.

Auf der Geräteanzeige wird die (elektrische) Feldstärke angezeigt. Bei einigen Geräten kann eine Umschaltung der Anzeige auf die elektrische Leistungsflussdichte erfolgen.

Laut Vorgaben der 26. BImSchV sollen die Messwerte mit den Grenzwerten in Form von Effektivwerten verglichen werden. Deswegen ist es wünschenswert, dass die Feldstärkemessgeräte möglichst genau den Effektivwert der Feldstärke anzeigen. Die in den Geräten eingebauten Diodengleichrichter stellen bei kleinen Feldstärken eine sehr gute Näherung an einen echten Effektivwertgleichrichter dar. Bei höheren Feldstärken können je nach Modulationsfrequenz höhere oder niedrigere Werte als der Effektivwert angezeigt werden; der Diodengleichrichter kann sowohl in Richtung Mittelwert-, als auch in Richtung Spitzenwertgleichrichter tendieren.

In [KEL] wurden hierzu für eine Geräteserie der Firma Narda Safety Test Solutions (vormals Wandel & Goltermann) einige interessante Untersuchungen durchgeführt, die sich zumindest von ihren Grundaussagen auch auf andere mit Diodengleichrichter arbeitende Feldstärkemessgeräte übertragen lassen. Untersucht wurde hierbei insbesondere, wie weit die angezeigte Feldstärke vom eigentlichen Effektivwert abweicht, wenn unterschiedliche Feldstärken und Signalformen gemessen werden. Für die vorliegenden Untersuchungen sind vor allem folgende Aussagen relevant:

- Besteht das zu messende Immissionssignal aus unterschiedlichen Frequenzen, so ist für den Anzeigefehler entscheidend, wie groß die Feldstärken der Einzelsignale absolut und im Verhältnis zueinander sind und wie groß der Frequenzunterschied der Signale ist. Sind die Feldstärken sehr unterschiedlich, ergeben sich Verhältnisse wie bei einem Träger. Kritischer hingegen sind Signale gleicher Feldstärke. Der Anzeigefehler bei zwei gleichstarken CW-Signalen mit einem Frequenzunterschied von 1 MHz oder größer ist bis Feldstärken von ca. 10 V/m aber vernachlässigbar, er beträgt für die dort eingesetzten Diodentypen bei 10 V/m etwa 0,3 dB. Bei sehr hohen Feldstärken (bis über 600 V/m) ist die Anzeige gegenüber dem „wahren“ Effektivwert um maximal den Faktor 1,39 entsprechend 2,9 dB zu groß. Solche Feldstärken sind für vorliegende Betrachtungen aber nicht mehr relevant. Im Fall von mehr als zwei Einzelsignalen gleicher Amplitude (in [KEL] konkret getestet: 16 Spektrallinien, Abstand $1 \text{ MHz} \pm 100 \text{ kHz}$, zufällige Phasenlage) liegen die Verhältnisse bis 10 V/m ähnlich zu denen bei zwei Einzelsignalen gleicher Amplitude.
- Bei einem gepulsten GSM Signal (Periodendauer 4,6 ms, Tastverhältnis 1:8) wird bei Feldstärken bis etwa 5 V/m maximal ca. 0,5 dB zu wenig und bei Feldstärken bis 10 V/m maximal ca. 1,1 dB zu wenig angezeigt. Hierbei ist aber zu berücksichtigen, dass an GSM Basisstationen mit dem Sendekontrollkanal BCCH stets ein nicht (bzw. nur schwach) gepulster Kanal vorliegt, der in der Regel den stärksten Feldstärkepegel erzeugt. Somit werden in Verbindung mit oben Gesagtem die Anzeigefehler eher geringer sein. Außer-

dem liegt, wie bereits im Abschnitt 2.5.1 erläutert, der überwiegende Teil üblich auftretender Immissionen unter etwa 5 V/m, so dass die damit verbundenen Unsicherheiten als gering einzustufen sind.

Die hier beschriebenen Anzeigefehler sind vergleichsweise gering in Relation zu den Überschätzungen, die man bei breitbandigen Feldstärkemessgeräten notwendiger Weise bei der Hochrechnung auf den maximalen Anlagezustand vornehmen muss. Auf diese Problematik wird in Abschnitt 2.5.7 näher eingegangen.

2.5.3.3 Kalibrierung der Messgeräte

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

Kalibrierung bedeutet:

- bei Breitbandmessgeräten, Spektrumanalysatoren und Messempfängern: 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. Ein Kalibrierintervall von zwei Jahren sollte deswegen nicht unterschritten werden. Für Komponenten, die einer besonders starken äußeren Belastung ausgesetzt sind (z.B. Kabel wegen Trittbeschädigungen) sind kürzere Überprüfungsintervalle anzuraten.

Eine praxiserprobte Vorgehensweise ist es, auch *zwischen* den Kalibrierterminen Verifikationen der gesamten Messkette (Antenne, Kabel, Messgerät) durchzuführen und zu dokumentieren. Hiermit werden alle Glieder der Messkette auf ihre Einsatzbereitschaft hin untersucht. Eine Verkürzung der Zeit zwischen den Kalibrierungen durch diese Verifizierung hat zwei Vorteile:

- Zeigt sich während der Kalibrierung, dass die Messgeräte fehlerhaft sind, so ist der Einfluss des Fehlers auf die vorangegangenen Messungen zu untersuchen. Zeigt beispielsweise der Spektrumanalysator falsche Amplitudenwerte an, so müssen die Ergebnisse der vorangegangenen Messungen (bis zur letzten Kalibrierung) angezweifelt werden. Dieses hätte im Falle einer kostenlosen Wiederholung zumindest finanzielle Konsequenzen. Als wesentlich kritischer könnten sich aber die nichtfinanziellen Konsequenzen erweisen, da solche Messungen oftmals eine breite Öffentlichkeitswirkung haben. Zumindest die Reputation der Messinstitution wäre in diesem Falle nachhaltig beschädigt. Im Fall eines zu großen Kalibrierintervalls wäre eine große Zahl von Messungen betroffen. Durch das Einschleichen der Verifikationen kann dieser Zeitraum u.U. stark verkürzt werden.

- Die Verifikationen sollen ausdrücklich keine vollständigen Kalibrierungen sein. Sie haben den Vorteil, dass sie selber durchgeführt werden können (kein Ausfall des Messequipments während der externen Kalibrierung) und wesentlich kostengünstiger sind als eine Standard Kalibrierung. Trotzdem erhält man als Ergebnis eine gute Sicherheit darüber, ob die Glieder der Messkette in Ordnung sind. Die turnusgemäßen Kalibrierungen der entsprechenden Messmittel sind allerdings trotzdem weiter durchzuführen.

Weiterhin wird empfohlen, sich an angebotenen Ringvergleichen, also an Vergleichsmessungen unterschiedlicher Messstellen an ein und demselben Prüfling (in diesem Fall eine Basisstation) zu beteiligen. Bei der Auswertung ist bezüglich des Vergleichs der Messwerte jedoch eine Vergleichbarkeit der Messvorschriften und Auswertetechniken sicherzustellen. Das betrifft insbesondere die Punkte Maximumsuche vs. Messung an einem festen Messpunkt, Hochrechnung auf maximale Anlagenauslastung vs. Momentanwert sowie Ermittlung von Maximalwerten vs. Einsatz von Mittelungstechniken. Wie bereits in [BOR 02-1, BOR 04] erläutert, gibt es hierbei bislang leider sehr unterschiedliche Verfahrensweisen, so dass eine Messabweichung nicht unbedingt im fehlerhaften Messequipment begründet ist, sondern an der Wahl eines anderen Messverfahrens liegen kann.

2.5.4 Nahfeld Fernfeld Problematik

Ein wichtiger Aspekt bei der Messung ist die Frage, in wie weit 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.

Grundsätzlich sind nur im Fernfeld der Sendeantenne die Feldkomponenten E und H über den Feldwellenwiderstand des freien Raumes $Z_{F0} = 377 \Omega$ miteinander verknüpft:

$$H = \frac{E}{Z_{F0}} \quad (2.5.1)$$

Die elektrische Leistungsflussdichte S in allgemeiner Darstellung mit

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (2.5.2)$$

lässt sich mit Gleichung (2.5.1) nur im Fernfeld dann als

$$S = \frac{E^2}{Z_{F0}} \quad (2.5.3)$$

ausdrücken.

Üblicherweise existieren für die Definition des Fernfeldes verschiedene Abschätzungen in Abhängigkeit der Entfernung r: Bei Abständen r mit

$$r \gg \frac{\lambda_0}{2\pi} \quad (2.5.4)$$

können beim Hertzschen Dipol die radialen Komponenten gegenüber den senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der abgestrahlten Welle stehenden Feldkomponenten vernachlässigt werden. λ_0 bezeichnet hierbei die Freiraumwellenlänge. Beziffert man das „sehr viel größer“ (\gg) als Faktor 20, vereinfacht sich Gleichung (2.5.4) zu

$$r > 3\lambda_0, \quad (2.5.5)$$

d.h. ab diesem Abstand von der Quelle kann von Fernfeldbedingungen ausgegangen werden. Beim GSM 900 Mobilfunknetz bedeutet dies etwa ein Mindestabstand von 1 m.

Für ausgedehnte Antennen, wie z.B. Antennengruppen oder Aperturantennen, kommt die Fernfeldbedingung

$$r > \frac{2D^2}{\lambda_0} \quad (2.5.6)$$

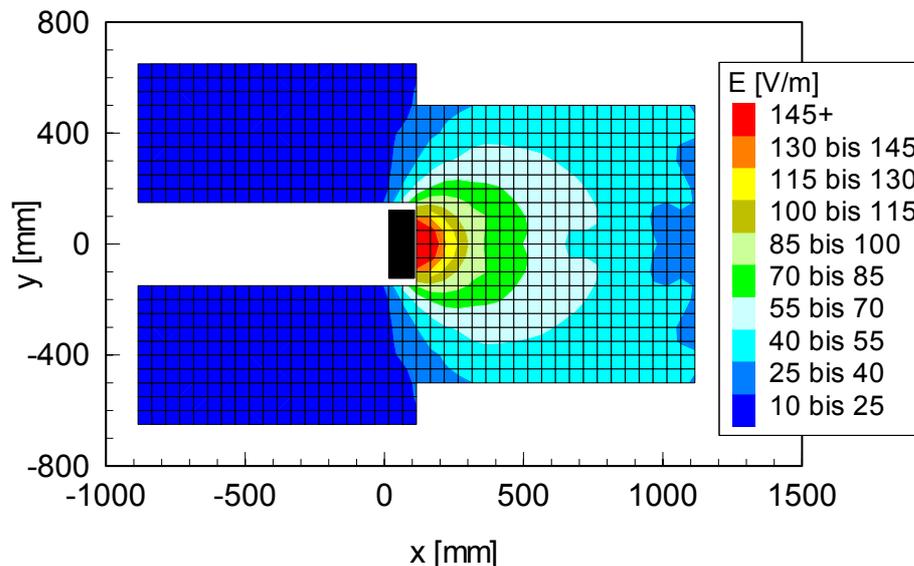
hinzu, wobei D die maximale geometrische Ausdehnung der Antenne beschreibt. Diese Fernfeldbedingung zielt allerdings darauf ab, dass der Phasenfehler über der gesamten Antenne kleiner als $\pi/8$ bleibt, d.h. dass am Messpunkt von einer genügend ebenen Welle ausgegangen werden kann. Ab diesem Abstand ist die Strahlungscharakteristik der Antenne unabhängig vom Abstand. Nach dieser Definition wäre ein Fernfeld für eine handelsübliche Basisstationsantenne (z.B. Kathrein K 735 147) mit einer maximalen Längenausdehnung von 1,3 m bei GSM 1800 erst in mindestens 21 m gegeben. Bei GSM 900 bleiben die Verhältnisse in etwa gleich: Viele Antennen bei GSM 900 haben mit ca. 1,9 m eine Längenausdehnung, die um den Faktor Wurzel 2 größer ist als bei vielen GSM 1800 Antennen. Die Wellenlänge ist bei 900 MHz um den Faktor 2 größer als bei 1800 MHz. Da in Gleichung (2.5.6) die geometrische Ausdehnung quadratisch, die Wellenlänge aber nur linear eingeht, ändert sich am Verhältnis nichts.

In den meisten Messsituationen ist der Mindestabstand von 21 m bei typischen Sicherheitsabständen von etwa 10 m ohnehin gegeben, so dass man hier von Fernfeldbedingungen ausgehen kann. Das bedeutet, dass zur korrekten Erfassung der elektromagnetischen Immissionen die Erfassung lediglich der elektrischen Feldkomponente hinreichend ist, da sich daraus die elektrische Leistungsflussdichte ableiten lässt.

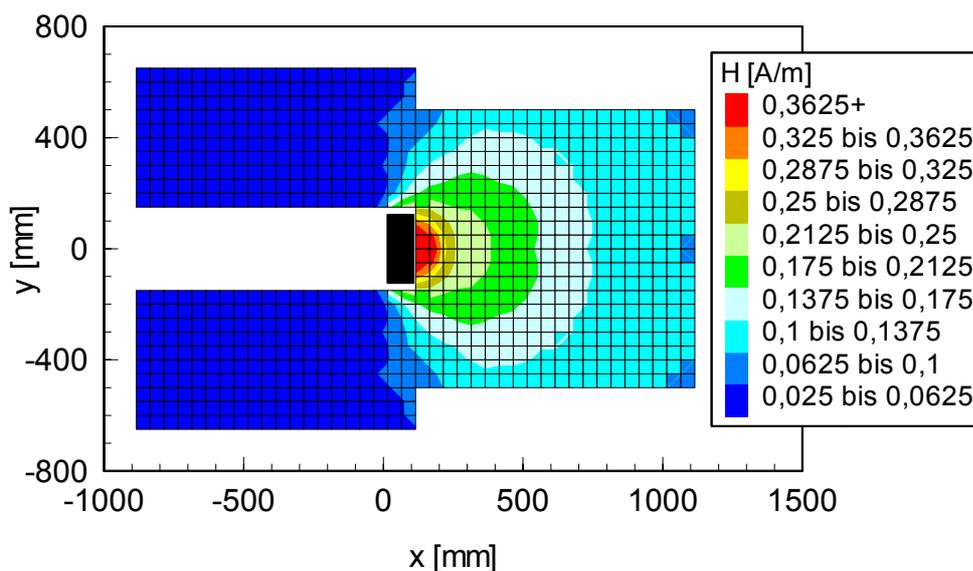
Nur bei wenigen Situationen ist die Notwendigkeit gegeben, in kürzeren Abständen von der Antenne zu messen. Nach Gleichung (2.5.6) wären dann die Komponenten des elektrischen und magnetischen Feldes getrennt zu erfassen. Allerdings ist kritisch zu hinterfragen, ob das Fernfeld für diesen Messzweck tatsächlich aus der Forderung einer entfernungsunabhängigen Strahlungscharakteristik der Antenne bzw. dem Vorliegen von ebenen Wellenbedingungen definiert werden muss. Hinreichend ist vielmehr derjenige Abstand von der Antenne, an dem E und H über Z_{F0} miteinander verknüpft sind.

Zur Ermittlung dieses Abstands wurde mit einer speziellen Nahfeld Feldsondentechnik (DASY Dosimetric Assessment System mit isotropen Nahfeldsonden, Schmid & Partner Engineering AG, Zürich) in einer Laborumgebung das elektrische und magnetische Nahfeld in verschiedenen Ebenen vor einer Basisstationsantenne vermessen [BOR 02-2]. Bild 2.5.9a bzw. b zeigt das elektrische bzw. magnetische Nahfeld in einer Draufsicht auf eine Basisstationsantenne. Bei der Antenne handelt es sich um den Typ Kathrein K 736 078 im Frequenzbe-

reich GSM 900, Bauhöhe 1,3 m. Diese Antenne wurde mit einer Eingangsleitung von 10 W am Antenneneingang (Dauerstrich) bei 947 MHz betrieben.



a)



b)

Bild 2.5.9 Elektrisches (a) und magnetisches (b) Nahfeld der Basisstationsantenne K 736 078, Draufsicht in Antennenmitte

Nach Gleichung (2.5.6) hätte diese Antenne bei 947 MHz einen Fernfeldabstand von etwa 10,7 m. Setzt man jedoch als Kriterium an, in welchem Abstand von der Antenne der Freiraumwellenwiderstand von 377Ω erreicht wird, kommt man auf wesentlich kürzere Abstände. In Bild 2.5.10 ist das Verhältnis von $Z = E/H$ entlang der Hauptstrahlrichtung ($y=0$) als Funktion des Abstands x dargestellt. Schon ab ca. 40 cm Abstand von der Antenne ist die Forderung $Z = Z_{F0} = 377 \Omega$ erfüllt. Die Abweichungen des Wellenwiderstandes E/H von 377Ω bei größeren Entfernungen resultieren aus Dynamikproblemen der Nahfeldsonden bei geringeren Feldstärken bzw. aus geringfügigen Positioniergenauigkeiten (beachte: $x = 0$ mm bezeichnet die Rückseite der Antenne).

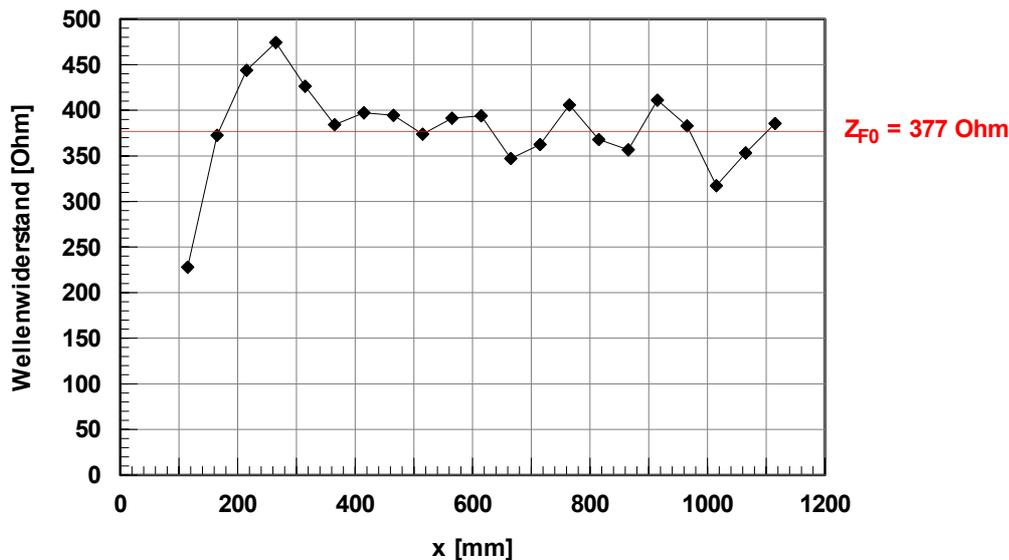


Bild 2.5.10 Wellenwiderstand E/H aus den aufgenommenen Nahfeldern der Antenne K 736 078, abgeleitet bei $y=0$

Somit lässt sich feststellen, dass schon in wesentlich geringeren Abständen als durch Gleichung (2.5.6) vorgegeben für die Messung der Immission die Messwertaufnahme lediglich der elektrischen Feldkomponente hinreichend ist.

2.5.5 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 korrekte Wahl der Messparameter bzw. Geräteeinstellungen relevant und zur Ermittlung eines korrekten Messergebnisses eminent wichtig. Zwar wird bei einigen neueren Geräten eine spezielle Software geliefert, die den angeschlossenen Spektrumanalysator automatisch konfiguriert. Trotzdem sollte das Messpersonal zwingend zumindest über Grundlagenkenntnisse verfügen, welche unterschiedlichen Einstellmöglichkeiten existieren und welchen Einfluss die Parameter auf das Ergebnis der Messung haben. Für die Mehrzahl der bei solchen Messungen eingesetzten Spektrumanalysatoren ist eine automatische Messkonfiguration und Messablaufsteuerung ohnehin nicht gegeben, so dass sich der Benutzer hier Gedanken über die richtige Bedienung seiner Geräte machen muss. Die innerhalb dieses Abschnitts beschriebenen Grundlagen gelten gleichermaßen für Mobilfunk Immissionen und andere hochfrequente Immissionen; die konkret angegebenen Werte sind allerdings nur für die Messung von Mobilfunk Basisstationen gültig.

Vor allem folgende Aspekte sind bezüglich einer korrekten Messung mit dem Spektrumanalysator (bzw. Messempfänger) zu beachten:

2.5.5.1 Auflösungsbandbreite

Die Bandbreite des Filters, mit dem das zu untersuchende Spektrum durchlaufen wird, muss so groß sein, dass das zu messende Signal voll erfasst wird. Als zu messendes Signal sollte bezüglich Mobilfunk Sendeanlagen jeder einzelne Frequenzkanal betrachtet werden. Ist die Filterbandbreite kleiner als die Signalbandbreite, wird nur ein Teilbereich des Signals erfasst und die entsprechende Immission unterbewertet. Die Bandbreite des Messfilters wird auch als Auflösungsbandbreite (engl. *RBW*, resolution bandwidth) bezeichnet.

Der GSM Kanal hat eine spektrale Bandbreite von 200 kHz; dies ist auch gleichzeitig der Kanalabstand. Hier tritt der Spezialfall auf, dass viele Spektrumanalysatoren nicht über diese Bandbreite verfügen, da die geräteinterne Abstufung nur Bandbreiten von 100 kHz oder 300 kHz zulässt. Um das Signal nicht unterzubewerten, wäre der nächsthöhere Wert 300 kHz zu wählen. Allerdings kommt es vor allem im innerstädtischen Bereich oft vor, dass unterschiedliche Frequenzkanäle einer oder verschiedener Sendeanlagen sehr dicht beieinander liegen können. Im gemessenen Spektrum sind bei einer RBW von 300 kHz diese Kanäle dann oft nicht sauber voneinander zu trennen. Hierbei kann dann mit einer RBW von 100 kHz gemessen werden, da so die Kanalseparierung besser möglich ist. Der Messfehler zwischen einer RBW von 100 kHz und 300 kHz fällt in der Regel gering aus (Grund: Die Messfilter sind keine Rechteckfilter, sondern Gaussfilter; das GSM Signal ist ebenfalls kein Rechtecksignal). Die Qualität der 100 kHz und 300 kHz Filter kann jedoch gerätebedingt unterschiedlich sein und sollte vor dem Beginn einer Messkampagne an einem realen GSM Signal ausgetestet werden. Dies kann entweder mit einem GSM-tauglichen Signalgenerator oder Basisstationsimulator, der leitungsgebunden an den Spektrumanalysator angeschlossen wird, erfolgen. Eine andere Möglichkeit besteht darin, die Filterbandbreiten in der Umgebung einer realen Anlage zu überprüfen. Hierbei sollte ein Außenmesspunkt mit freier Sicht zur Anlage gewählt werden. Die Entfernung zur Anlage sollte möglichst kurz sein, damit nur ein dominanter Ausbreitungsweg existiert und das Empfangssignal nicht nur zeitliche Änderungen im Ausbreitungsweg schwankt (z.B. Maststandort auf einem Feld). Mittlerweile gibt es jedoch auch einzelne Spektrumanalysatoren, die auf die Messung von verschiedenen Signalen der modernen Kommunikationstechnik zugeschnitten sind und für GSM z.B. spezielle Kanalfilter von 200 kHz beinhalten. Ist ein solches Gerät verfügbar, sollte diese Einstellung gewählt werden.

Das UMTS Signal hat eine spektrale Bandbreite von etwa 4,6 MHz. Demnach wäre eine entsprechende minimale RBW bzw. die nächsthöhere RBW von 5 MHz einzustellen. Die RBW von 5 MHz bei UMTS stellt vor allem für ältere Analysatoren eine Herausforderung dar. Bei manchen Geräten ist eine RBW von 5 MHz zwar einstellbar, aber nicht über die Pfeiltasten oder den Drehknopf (hiermit sind maximale RBW bis 3 MHz möglich). Die 5 MHz können bei einigen Geräten aber direkt über die Zifferntastatur eingestellt werden. Sofern diese vergleichsweise hohen Bandbreiten nicht realisierbar sind, gäbe es theoretische zwei Ausweichmöglichkeiten: Einige Geräte verfügen über die Möglichkeit, eine Kanalleistungsmessung (channel power measurement) durchzuführen, bei der numerisch über die am Bildschirm dargestellte spektrale Kurve geringerer Auflösungsbandbreite integriert wird. Die zweite Möglichkeit besteht darin, mit einer geringeren Bandbreite zu messen und mittels eines Korrekturfaktors auf die Signalbandbreite zu extrapolieren. Dieser Korrekturfaktor wird beispielsweise auch in der Messvorschrift der RegTP für bundesweite EMVU Messreihen [REGTP 03] angegeben:

$$\text{Korrekturfaktor} = 10 \cdot \log \frac{\text{Signalbandbreite}}{\text{Rauschbandbreite}} \quad (2.5.7)$$

Bei Verwendung eines Gauss-Filters entspricht die Auflösungsbandbreite näherungsweise der Rauschbandbreite. Somit wäre bei einem 4,6 MHz breiten UMTS Signal und Messung mit einer RBW von 3 MHz beispielsweise ein Korrekturfaktor von 1,9 dB zum angezeigten Wert zu addieren. Bei dieser Möglichkeit handelt es sich aber lediglich um eine Abschätzung, deren Genauigkeit von der Signalform und der Beschaffenheit der im Spektrumanalysator vorhandenen Auflösungsfilter abhängt. Wie im nächsten Abschnitt gezeigt wird, ist die UMTS Messung mit älteren Spektrumanalysatoren schon aufgrund des nicht vorhandenen RMS Detektors stark fehlerbehaftet.

2.5.5.2 Detektor

Neben der richtigen Wahl der Auflösungsbandbreite ist auch eine richtige Wahl des Detektors entscheidend für korrekte Messergebnisse.

Bei modernen Spektrumanalysatoren werden zur Anzeige der aufgenommenen Spektren LCD-Displays anstelle von Kathodenstrahlröhren verwendet. Das führt dazu, dass die Auflösung sowohl der Pegel-, als auch der Frequenzachse begrenzt ist. Besonders bei der Darstellung großer Frequenzbereiche enthält dann ein Bildschirmpixel die spektrale Information eines verhältnismäßig großen Teilbereichs. Dabei entfallen auf ein Pixel mehrere Messwerte, so genannte Samples. Welcher der Messwerte dann durch das Pixel dargestellt wird, hängt von der gewählten Bewertung durch den Detektor ab.

Die meisten Spektrumanalysatoren verfügen z.B. über (Max) Peak, Min Peak und Average Detektor; aus EMV Messungen ist darüber hinaus auch der Quasi Peak-Detektor bekannt. Seltener ist der RMS Detektor. Für die im vorliegenden Bericht beschriebenen EMVU Messaktivitäten sind primär der (Max) Peak- und der RMS Detektor von Interesse.

Der (Max) Peak-Detektor bringt den Maximalwert zur Anzeige. Aus den Messwerten, die einem Bildschirmpixel zugeordnet sind, wird derjenige mit dem höchsten Pegel ausgewählt und angezeigt. Der RMS Detektor berechnet hingegen für jedes Pixel aus den zugehörigen Samples die Leistung. Das Ergebnis entspricht der Signalleistung innerhalb des durch das Pixel dargestellten Frequenzbereichs. Mit dem Bezugswiderstand des Analysator ergibt sich der (zeitliche) Effektivwert der Signal-Eingangsspannung. Für detaillierte Informationen sei auf [RAU 00] verwiesen.

Laut Vorgaben der 26. BImSchV stellen die Grenzwerte (zeitliche) Effektivwerte dar. Deswegen wäre prinzipiell ein Effektivwert bzw. RMS Detektor am Spektrumanalysator zu wählen. Dieser Detektortyp findet sich allerdings wie oben beschrieben vorrangig in Geräten der neuen Generation.

Die Messung der Immissionen von GSM Basisstationen basiert, wie weiter unten noch ausführlich erläutert wird, auf einer Vermessung der Immissionen durch die BCCH Kanäle mit anschließender Hochrechnung auf den maximalen Anlagenzustand. Das BCCH Signal weist, wie Bild 2.5.11 darstellt, keine Leistungsregelung auf und ist, von vergleichsweise kurzen Einbrüchen zwischen den Zeitschlitzen abgesehen, zeitlich konstant. Insofern wird

hier ein (in der Regel auf den Effektivwert eines Sinussignals geeicht) (Max) Peak Detektor nahezu die selben Werte anzeigen wie ein RMS Detektor. Eigene Überprüfung an realen GSM Signalen ergaben, dass, korrekte Einstellungen vorausgesetzt, die Abweichungen zwischen beiden Detektorentypen bei einem GSM BCCH Signal unter 0,5 dB liegen.

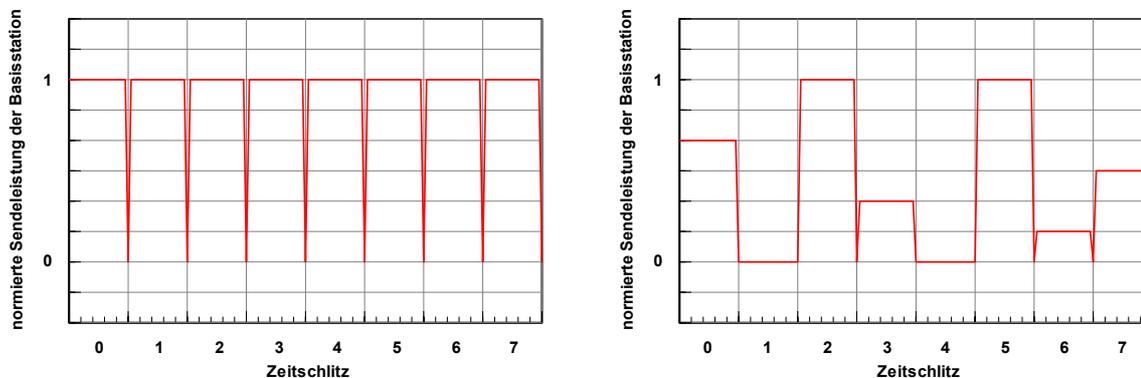


Bild 2.5.11 Signalstruktur bei GSM: BCCH Kanal (links), Kanal 2 und Folgekanäle (rechts)

Anders verhält es sich bei UMTS Signalen: Das UMTS Signal hat einen rauschähnlichen Zustand, bei dem Crestfaktoren theoretisch bis 15 dB auftreten können [WUSCH 04]. Der Crestfaktor beschreibt das Verhältnis zwischen dem kurzzeitigen Spitzenwert und dem Effektivwert des Signals. In der Praxis werden jedoch aus technischen Gründen geringere Crestfaktoren verwendet; realistisch sind Crestfaktoren unter 10 dB. Diese hohen Crestfaktoren führen dazu, dass Peak Detektoren den Effektivwert des Immissionsignals wesentlich überschätzen. Die Überschätzungen können typisch 10 dB betragen [WUSCH 04] und sind damit nicht mehr akzeptabel. Sofern bei UMTS also eine frequenzselektive Messung durchgeführt wird, ist ein RMS Detektor zwingend erforderlich.

Hierbei muss aber angemerkt werden, dass bezüglich der korrekten Messung von UMTS Immissionen noch Forschungsbedarf absehbar ist. Die Definition eines geeigneten Messverfahrens ist Gegenstand eines eigenständigen Forschungsprojektes des Bundesamts für Strahlenschutz.

2.5.5.3 Frequenzbereich

Bei Wahl eines sehr großen Frequenzspans (Stoppfrequenz - Startfrequenz = *Frequenzspan*) im Verhältnis zur Auflösungsbandbreite besteht die Gefahr einer inkorrekten Frequenzangabe der gemessenen Immission. Grund hierfür ist, dass die Messwertanzeige und -ausgabe bei Spektrumanalysatoren durch die Pixelauflösung der LCD-Bildschirme begrenzt ist. Üblich sind Geräte mit 401 oder 801 Pixeln für die Frequenzachse; bei modernen Geräten können weitaus mehr Pixel vorhanden sein. Eine inkorrekte Frequenzangabe führt zwar nicht zu einer Unterbewertung der gemessenen Immissionen, kann aber die Zuordnung von Immissionen zu ihren Quellen oder eine Kanalzuordnung speziell für GSM Mobilfunkimmissionen erschweren. Als grober Richtwert für den Frequenzspan sollte folgende Einstellung gewählt werden:

$$\text{Frequenzspan} \leq \text{RBW} \cdot \text{Anzahl der Pixel der Frequenzachse} . \quad (2.5.8)$$

Üblicherweise sind die Funktionen „Wahl des Frequenzspans“ wie auch die Wahl von Auflösungsbandbreite, Videobandbreite und Sweep Time automatisch gekoppelt (Auto Couple). Zumindest bei der Wahl der oben beschriebenen Einstellungen für die Auflösungsbandbreite muss diese Funktion jedoch deaktiviert werden, so dass hier auch für den Span eine mögliche Fehlerquelle besteht.

Die Start und Stopfrequenzen sind entsprechend den Downlink Frequenzen der Basisstationsantennen zu wählen, d.h. sie umfassen vollständig den Frequenzbereich, der laut Frequenzzuweisungstabelle für den entsprechenden Funkdienst für die Kommunikationsrichtung Basisstation – Handy zugewiesen ist. Dies ist bei

- GSM 900: 935 MHz – 960 MHz,
- GSM-R: 921 MHz – 960 MHz,
- GSM 1800: 1805 MHz – 1880 MHz,
- UMTS: 2110 MHz – 2170 MHz

2.5.5.4 Videobandbreite

Zusätzlich zum Filter, mit dem die Auflösungsbandbreite eingestellt wird, existiert ein nachgeschaltetes Videofilter, mit dem die Bildschirmanzeige geglättet werden kann und so z.B. Signale nahe an der Rauschgrenze übersichtlicher dargestellt werden können. Die Bandbreite dieses Videofilters (engl. *VBW*, video bandwidth) sollte bei sinusförmigen Signalen in etwa gleich der RBW sein, bei gepulsten Signalen mit extrem kleinen Puls/Pausenverhältnis (z.B. Radarsignale) muss sie wesentlich größer als die RBW sein, da ansonsten das Signal „gemittelt“ und die Amplitude unterbewertet wird. Für Messungen an Mobilfunk Basisstationen sollte als Richtwert die VBW gleich groß oder größer als die RBW eingestellt werden.

2.5.5.5 Sweep Time

Als Messparameter geht auch die Zeit ein, mit der das Messfilter durch den Frequenzbereich geschoben wird. Diese Zeit wird *Sweep Time* genannt und ist auch in die automatische Kopplung der Parameter einbezogen.

Eine kurze Sweep Time ist auf der einen Seite für die Durchführung der Messungen vonnöten, sofern zur Maximalwertsuche Techniken eingesetzt werden, die eine Bewegung der Antenne durch den Raum erfordern (Schwenkmethode oder Drehmethode, siehe unten). Die Sweep Time muss prinzipiell kurz gegenüber der Bewegungsgeschwindigkeit der Antenne gewählt werden, da ansonsten örtliche Maxima der Immission leicht übersehen werden können. Bei üblichen Sweep Times von einigen 10 ms stellt dies prinzipiell kein Problem dar. Anders sieht die Lage bei den bereits oben erwähnten Spektrumanalysatoren mit isotroper Spezialsonde aus. Die eingestellte Sweep Time verdreifacht sich in der Realität, da zur Erreichung der Isotropie vom Gerät automatisch drei sequenzielle Messungen zur Abdeckung aller drei Polarisationsrichtungen durchgeführt werden. Wird hierbei die Sweep Time zu groß gewählt, kann dies zum erwähnten Übersehen von örtlichen Maxima führen.

Eine zu kurze Sweep Time auf der anderen Seite führt dazu, dass das Messfilter sich nicht korrekt auf die zu messende Frequenz einschwingen kann und dann der Messwert amplituden- und frequenzmäßig nicht korrekt angezeigt wird.

Sofern bei den Messungen ein RMS Detektor genutzt wird, ist mit eher größeren Sweep Times zu messen: Bei zu schnellen Sweeps stehen für die Berechnung des RMS Wertes pro Frequenzpixel zu wenig Samples zur Verfügung; das Signal wird falsch bewertet. Typische Sweep Times sollten hier im Bereich von 100 ms pro Sweep liegen [WUSCH 04]. Es ist hierbei darauf zu achten, dass bei den Default Werten vom Gerät oftmals zu kurze Sweep Times vorgegeben sind. Das heißt, dass auch in diesem Fall die Auto Couple Funktion deaktiviert werden muss!

Insgesamt ist die korrekte Wahl der Sweep Time also ein Kompromiss zwischen ausreichend hoher Messgeschwindigkeit zur Durchführung von Schwenk- oder Drehmethode einerseits und einer ausreichend langen Sweep Time zum korrekten Einschwingen der Filter und der ausreichenden Erfassung von Samples/Pixel im Falle der Verwendung eines RMS Detektors.

2.5.5.6 Sonstiges

Vor Beginn der Messungen ist der Spektrumanalysator (Messempfänger) einige Minuten warmlaufen zu lassen. Nähere Auskünfte sind in der Bedienungsanweisung der Geräte zu entnehmen. Eine zu kurze Warmlaufzeit kann zu merklichen Amplitudenungenauigkeiten in der Messwertanzeige führen. Außerdem sind Messungen bei Umgebungstemperaturen, die außerhalb des in der Gerätebeschreibung spezifizierten Temperaturbereiches liegen, fehlerbehaftet und deswegen zu vermeiden.

2.5.5.7 Zusammenfassung

Tabelle 2.5.1 fasst die oben abgeleiteten Aspekte in konkrete Empfehlungen zur Wahl der Messparameter zusammen.

System	Startfrequenz [MHz]	Stopfrequenz [MHz]	RBW [kHz]	Mindest-VBW [kHz]	Detektor	Sweep-Time [ms]
GSM 900	935	960	100-300 ¹⁾	100-300 ²⁾	Peak oder RMS	100 ³⁾
GSM-R	921	960	100-300 ¹⁾	100-300 ²⁾	Peak oder RMS	100 ³⁾
GSM 1800	1805	1880	100-300 ¹⁾	100-300 ²⁾	Peak oder RMS	100 ³⁾
UMTS ⁴⁾	2110	2170	5000 ⁵⁾	5000 ²⁾	RMS	100

Tabelle 2.5.1 Empfohlene Einstellungen für die Messparameter bei frequenzselektive Messungen

- 1) Die korrekte Kanalbandbreite für GSM beträgt 200 kHz. Falls diese Filtergröße nicht vorhanden ist, sollte mit 300 kHz gemessen werden oder, sofern das Spektrum dicht belegt ist, auch mit 100 kHz. In diesem Falle sind aber die dadurch entstehenden, gerätespezifischen Messfehler zu quantifizieren.
- 2) Die VBW ist gleich oder größer der RBW zu wählen.
- 3) Die 100 ms gelten streng genommen nur für die Verwendung des RMS Detektors. Bei Anwendung des Peak Detektors sind auch kürzere Sweep Times möglich; hier kann auf die Auto Couple Funktion des Spektrumanalysators zurückgegriffen werden.
- 4) Die Einstellungen gelten nur für eine *frequenzselektive* Messung von UMTS.
- 5) Die Bandbreite von 5 MHz kann auch durch Kanalleistungsmessung oder Messung bei geringerer RBW und Erweiterung um einen Korrekturfaktor erreicht werden. Vor allem bei letzterer Methode sind aber gerätespezifische Messfehler zu erwarten.

2.5.6 Messdurchführung

2.5.6.1 Einleitung

Neben den Einstellungen der Messparameter hat vor allem die konkrete *Messdurchführung* einen großen Einfluss auf das Messergebnis. In diesem Punkt ist die Spannweite bislang praktizierter Verfahren sehr groß und führt in der Regel zu sehr stark voneinander abweichenden Ergebnissen unterschiedlicher Messkampagnen. Die Spannweite der Messergebnisse ist dabei so groß, dass es oftmals wenig Sinn macht, die Ergebnisse unterschiedlicher Messreihen unreflektiert miteinander zu vergleichen, ohne genaue Hintergründe vor allem bezüglich Messdurchführung und Messauswertung hinterfragt zu haben.

Die Vielzahl der praktizierten Methodiken bezüglich der Messdurchführung kann in drei Hauptklassen eingeteilt werden:

1. Messung der Immission an einem festen Punkt,
2. Suche des Maximums der Immission innerhalb eines Messvolumens und
3. Ermittlung eines gemittelten Wertes in einem Messvolumen.

Wie bereits in Abschnitt 2.2 gezeigt, kann die Immission gerade in Innenräumen örtlich sehr stark schwanken. Erfolgt die Messwertaufnahme lediglich an einem festen Punkt, sind Unterbewertungen der Immission von mehreren Größenordnungen (!) möglich. Da die Forderung einer Verfahrenseignung *zur Grenzwertüberprüfung* mit einer Maximalwertsuche verbunden ist und die Beurteilung auf Basis der maximal gemessenen Werte erfolgen soll (Abschnitt 2.4), müssen Verfahren nach Punkt 1 für vorliegende Aufgabenstellung ausgeschlossen werden.

Die Frage, ob durch die Messung eine Maximalwertermittlung oder eine Mittelwertbildung verfolgt werden soll, ist eine grundlegende Frage mit entscheidender Bedeutung für das zu definierende Messverfahren. Auf der einen Seite verlangen die für Deutschland maßgebliche 26. BImSchV bzw. ihre Durchführungshinweise ausdrücklich, dass die Messungen „am Einwirkungsort mit der größten Immission durchzuführen“ seien und die „Beurteilung der Messergebnisse ... auf der Basis der maximal gemessenen Werte der Feldstärke oder Leistungsflussdichte am Messort“ erfolgt [26. BImSchV, LAI 04]. Auf der anderen Seite basieren die Grenzwerte der 26. BImSchV auf den Vorgaben der ICNIRP [ICNIRP 98], die die abgeleiteten Referenzwerte als über den gesamten Körper des exponierten Individuums gemittelte Werte ansieht; allerdings unter der wichtigen Bedingung, dass die Basisgrenzwerte für die lokale Exposition nicht überschritten werden dürfen.

Dieser Aspekt wurde bereits im 1. Zwischenbericht zu vorliegendem Forschungsvorhaben [BOR 02-1] aufgegriffen und mit dem Auftraggeber diskutiert. Zum damaligen Zeitpunkt wurde vom Auftraggeber vorgegeben, *beide* grundsätzlichen Verfahren in die weitere Betrachtung der Messverfahren aufzunehmen. Deswegen werden im folgenden sowohl Verfahren vorgestellt und auf ihre Anwendbarkeit hin untersucht, die für eine Maximalwertermittlung, als auch für eine Mittelwertbildung in Frage kommen. Als praktikabel bezüglich der Messdurchführung haben sich die Verfahren Schwenkmethode, Drehmethode und Punktrastermethode erwiesen.

Prinzipiell sind die vorgestellten Verfahren sowohl für die Messung mit Breitbandsonden, als auch mit Spektrumanalysatoren geeignet. Ausführlich werden im folgenden die Methoden für die Messung mit dem Spektrumanalysator diskutiert.

2.5.6.2 Vorstellung und Bewertung der Verfahren

2.5.6.2.1 Schwenkmethode

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 wird das Spektrum mit der „Maxhold“ Funktion des Messgerätes kontinuierlich erfasst. Es resultiert ein „Maxhold“ Spektrum, aus dem für jeden Sendekanal BCCH die zugehörige Feldstärke abgelesen und für die Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung ausgewertet werden kann. Die Bewegung der Antenne muss bezogen auf die Sweep Time des Spektrumanalysators langsam erfolgen.

Hierbei ist zu beachten, dass sich die Immissionen der einzelnen Basisstationen (und der einzelnen Kanäle) im allgemeinen so überlagern, dass die Frequenzkanäle an *unterschiedlichen* Punkten im Rastervolumen ihre Maxima haben. Mit der Schwenkmethode erhält man also gewissermaßen ein worst case Spektrum, da bei der nachfolgenden Auswertung alle (örtlich verschiedenen) Maxima der einzelnen Frequenzkanäle als an einem Punkt vorhanden betrachtet und aufaddiert werden. Die Ortsinformation der einzelnen Maxima geht hiermit verloren. Ein möglicher Fehlereinfluss ist aber als gering einzuschätzen, da der jeweils auszumessende Downlinkfrequenzbereich und die damit verbundene Veränderungen der Ausbreitungsbedingungen für die verschiedenen Frequenzen eines Bandes begrenzt sind. Der Frequenzunterschied zwischen GSM 900 auf der einen und GSM 1800 / UMTS auf der anderen Seite ist jedoch so groß, dass für jedes dieser Systeme ein eigener Durchlauf der Schwenkmethode anzuraten ist.

Beim Schwenken soll die Antenne immer einen minimalen Abstand von 50 cm zu Wänden, Boden, Decke und Mobiliar einhalten. Diese Forderung erwächst aus der Tatsache, dass übliche Messantennen am Freifeld, d.h. ohne Vorhandensein von reflektierenden Gegenständen, kalibriert sind. Die Nähe von Gegenständen oder Personen (siehe auch Abschnitt 2.5.3.1.2 zum Einfluss des Messenden auf verschiedene Antennentypen) ändert die Empfangseigenschaften der Antenne und führt, da für diese „gestörte“ Umgebung kein entsprechender Kalibrierfaktor vorliegt, zu einem fehlerhaften Messergebnis.



Bild 2.5.11 Durchführung der Schwenkmethode mit bikonischer Antenne in Halterung

Bei der Schwenkmethode sind grundsätzlich logarithmisch-periodische Antennen, bikonische Antennen und Dipolantennen einsetzbar. Die Vor- und Nachteile dieser Antennentypen sind bereits ausführlich behandelt worden. Zur Reduzierung des Einfluss des Messenden vor allem

bei bikonischen und Dipolantennen ist die Benutzung einer nichtmetallischen Halterung zur Vergrößerung des Antennenabstands zum Körper dringend geboten.

Speziell bei der Nutzung der logarithmisch-periodischen Antenne muss der Schwenkvorgang sehr sorgfältig durchgeführt werden. Da diese Antennen über eine ausgeprägte Richtwirkung verfügen, muss sichergestellt werden, dass während des Schwenkvorgangs die Antenne überall im Messvolumen in jede Richtung und Polarisation orientiert wird. Durch den Schwenkvorgang kann es auch stellenweise zu einer teilweisen Kompensation des im Abschnitt 2.5.3.1.2 beschriebenen Effekts der nicht exakten Bewertung von Signalen aus unterschiedlichen Richtungen bei richtenden Antennen kommen. Durch die Bewegung der Antenne im Raum werden mehrere Orte abgetastet, an denen sich das Einfallswinkelspektrum auf unterschiedliche Art und Weise zusammensetzt.

Aufgrund der Aktivierung des „Maxhold“-Modus während des Schwenkvorgangs ist mit dieser Methode eine Maximalwertsuche, aber keine Volumenmittelung möglich.

Das Verfahren ist einfach, unkompliziert und schnell durchführbar; die Messzeit pro Raum bewegt sich im Bereich einiger Minuten.

2.5.6.2.2 Drehmethode

Bei der *Drehmethode* wird die Messantenne auf einer kreisförmigen Bahn um einen Drehpunkt bewegt. Dabei soll der Mittelpunkt der Antenne einen Kreis von mindestens 1,0 m Durchmesser beschreiben. Diese Drehung wird mit vier verschiedenen Polarisationen der Antenne (horizontal, vertikal, +45°, -45°) und auf drei Höhen (0,75 m, 1,25 m und 1,75 m) wiederholt [BUWAL 01]. Während des ganzen Vorgangs wird das Spektrum mit der „Maxhold“-Funktion des Messgerätes kontinuierlich erfasst. Die Spektren für die einzelnen Polarisationen und Messhöhen können separat abgespeichert werden. Die Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung erfolgt, indem als Immission für jeden einzelnen Kontrollkanal BCCH der höchste ermittelte Feldstärkewert aus den Einzelmessungen verwendet wird. Die Werte der verschiedenen Polarisationen werden im Gegensatz zur Punktrastermethode nicht zu einer Resultierenden verknüpft.

Für diese Messungen ist zweckmäßigerweise ein (nichtmetallisches) Stativ zu verwenden.

Die Spektren der einzelnen Polarisationen und Höhen können separat abgespeichert werden. Hierdurch sind weitere Einzelauswertungen möglich.

Bezüglich Drehgeschwindigkeit und Abstand der Antenne zu Wänden u.ä. gilt das bei der Schwenkmethode Gesagte.

Bei der Drehmethode sind sinnvoller Weise vorrangig schwach richtende Antennen, also bikonische oder Dipolantennen, einzusetzen. Stark richtende Antennen bergen die Gefahr, dass pro abgefahrenem Punkt nicht alle möglichen Einfallsrichtungen der Immissionen korrekt berücksichtigt werden können.



Bild 2.5.12 Durchführung der Drehmethode

Vorteil dieses Verfahren ist die potenzielle Automatisierbarkeit unter Verwendung eines Antennenpositionierers. Nachteilig in der Praxis ist jedoch, dass ein Kompromiss zwischen Abtastgenauigkeit und Messaufwand gefunden werden muss: Kleine Drehradien vermindern die Gefahr, dass Feldstärkemaxima, die *innerhalb* des umfassten Messzylinders liegen, übersehen werden. Allerdings kann dadurch das Messvolumen so klein werden, dass es nicht zum Auffinden des Immissionsmaximums in einem Innenraum ausreicht. Der Drehvorgang ist dann an mehreren Orten im Raum zu wiederholen. Bei größeren Drehradien kehren sich die Verhältnisse entsprechend um. Die Einhaltung von Mindestabständen zu Wänden bzw. zum Mobiliar kann dazu führen, dass entweder Mobiliar entfernt werden muss oder Raumbereiche ausgespart werden müssen und ggf. manuell nachgemessen werden müssen. Die Automatisierung ergibt darüber hinaus in der Praxis keine Zeitvorteile.

Eine Mittelung ist nur eingeschränkt, z.B. über die verschiedenen Höhen, möglich.

2.5.6.2.3 Punktrastermethode

Bei der Punktrastermethode wird das Messvolumen mit der Messantenne in einem fixen Punktraster abgetastet. Für die Rasterung gibt es mehrere Vorschläge: Nach [BUWAL 01] können z.B. drei Messhöhen (0,75 m, 1,25 m und 1,75 m) jeweils mindestens 20 Rasterpunkte vermessen werden. Andere Vorschläge gehen sowohl von kleineren Punktzahlen, als auch von deutlich größeren mit komplizierteren Geometrien aus (siehe unten). Es ist eine dipolartige Empfangsantenne zu verwenden und diese nacheinander in die drei orthogonalen Raumrichtungen zu orientieren. Die Messwerte werden für jeden Kontrollkanal BCCH geometrisch aufsummiert und zu einer Resultierenden verknüpft.

Aus den Ergebnissen der Punktrastermethode ist es sowohl möglich, einen Maximalwert im untersuchten Volumen zu bestimmen, als auch volumenmäßige Mittelungen durchzuführen. Von den drei vorgestellten Möglichkeiten ist die Punktrastermethode die einzige, die eine korrekte Mittelung über einzelne Messpunkte ermöglicht.



Bild 2.5.13 Durchführung der Punktrastermethode; Ausrichtung der Antenne auf einen Rasterpunkt

Diese Methode setzt Antennen mit dipolartiger Strahlungscharakteristik voraus.

Durch die zeitliche Nacheinandermessung der Raumkomponenten werden zeitlich inhomogene Felder (z.B. durch Bewegung von Personen im Raum, siehe oben) nicht korrekt erfasst. Vorteilhaft ist hingegen, dass im Gegensatz zu den anderen beiden Methoden für jede zu messende Frequenz (Mobilfunkkanal) genau derjenige Gitterpunkt angegeben werden kann, an dem sich das zugehörige Immissionsmaximum ausbildet.

Die feine Abtastung eines großen Volumens gestaltet sich bei der Punktrastermethode aber sehr kompliziert, da pro Messpunkt die Antenne in drei orthogonale Richtungen ausgerichtet werden muss und somit für eine mit der Schwenkmethode bzw. der Drehmethode vergleichbare Abtastung eines Raumes ein sehr hoher Zeitaufwand entsteht. Wird hingegen das abzutastende Volumen reduziert oder die Maschenweite des Rasters erhöht, wird die Gefahr einer Unterbewertung der Immission durch Nichttreffen des lokalen Maximums höher. Auf diesen Umstand wird weiter unten anhand eines Messbeispiels eingegangen

Wie oben beschrieben, gestattet einzig die Punktrastermethode eine Mittelung über spezielle Flächen oder Volumina. Als Mittelungsgeometrien werden in den diesbezüglichen Untersuchungen verschiedenste geometrische Figuren vorgeschlagen und ausgewertet; die Vielfalt reicht von horizontal oder vertikal ausgerichteten Linien und Ebenen über Würfel bis hin zu „Dummy“-Phantomen und detaillierten Mensch Nachbildungen. Bild 2.5.14 zeigt einige der vorgeschlagenen Geometrien.

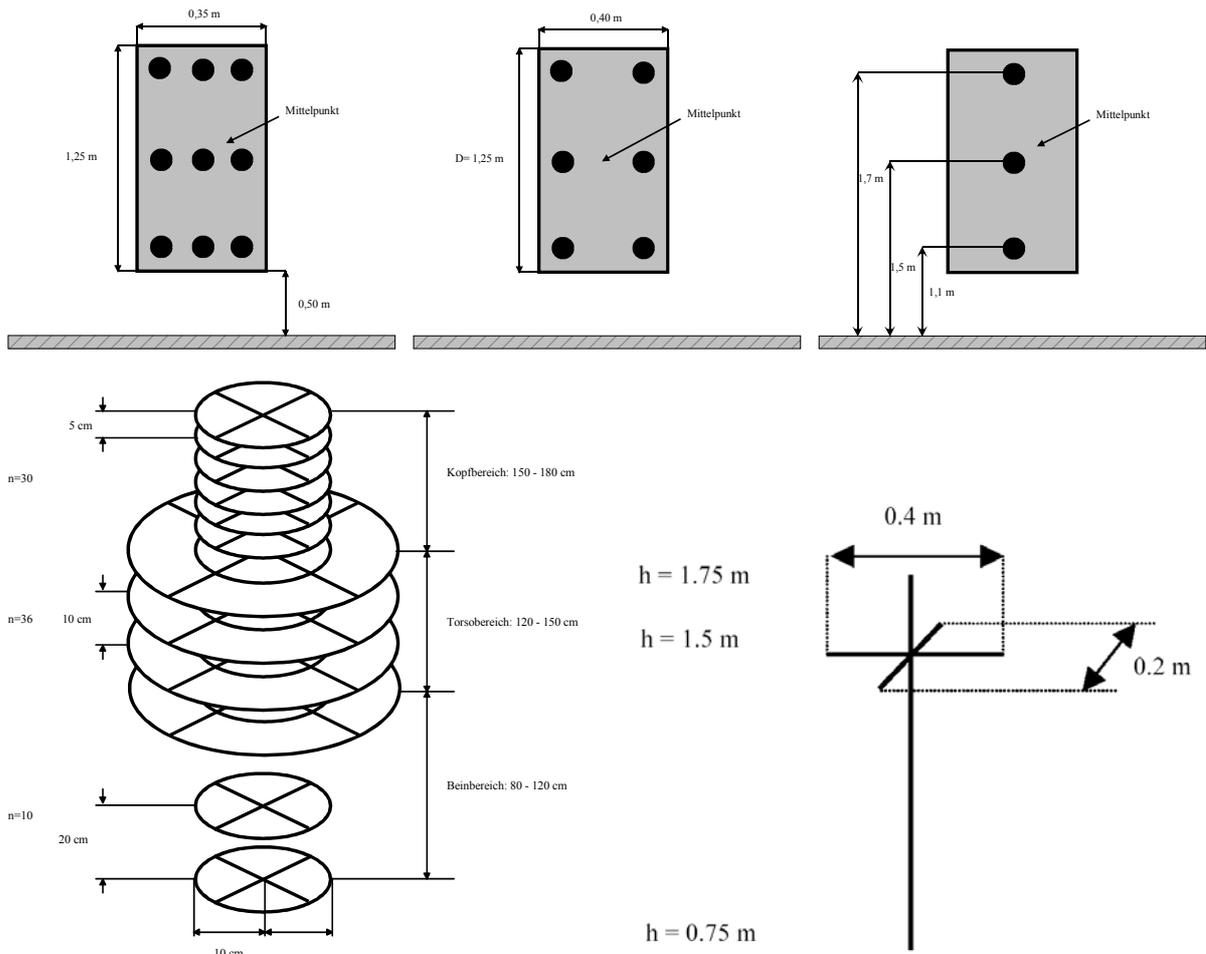


Bild 2.5.14 Verschiedene vorgeschlagene Messraster für eine Mittelung der Messwerte. Oben links: [ANFR/DR-15]; oben Mitte: [prEN 50400]; oben rechts: [CEPT 04]; unten links: [SICTA 01] (76 Messpunkte auf den Schnittpunkten der Linien mit den Kreisen sowie im Zentrum der Kreise), unten rechts: [LEH 03] (24 Messpunkte auf der vertikalen Achse alle 10 cm und auf den horizontalen Ästen alle 5 cm)

Auf die Möglichkeiten und Begrenzungen von Mittelungen wird im Abschnitt 2.5.6.7 näher eingegangen.

2.5.6.3 Korrekte Erfassung der Polarisation

Basisstationsantennen senden ihre Signale üblicherweise linear polarisiert ab. Bei der Schwenkmethode wird die (linear polarisierte) Empfangsantenne manuell auf das Maximum orientiert, d.h. in Richtung des Polarisationsvektors. Auch bei der Punktrastermethode mit einer (sequenziellen) Orientierung der Empfangsantenne in drei orthogonale Richtungen erfolgt bei entsprechender geometrischer Aufaddierung der drei Komponentenrichtungen die Erfassung des Feldes korrekt. Bei der Drehmethode werden nur die Polarisierungen H, V, +45° und -45° abgefahren, aber nicht weiter verknüpft, sondern das Maximum aus allen Polarisationsrichtungen gebildet.

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

Ellipsoid, der mit drei Hauptachsen beschrieben werden kann. Es ist hierbei die Frage, ob sich Unterschiede in der korrekten Erfassung des maximalen Effektivwertes des elektrischen Feldstärkevektors bei den drei Verfahren ergeben.

Streng genommen sind nur isotrope Feldmessenrichtungen, bei denen auch die Phaseninformation ausgewertet wird, in der Lage, beliebige Polarisierungen richtig zu erfassen. Für Vorort-Immissionsmessungen existieren entsprechende phasenauswertende frequenzselektive Geräte aber noch nicht. Auch die bereits oben angesprochenen frequenzselektiven Einrichtungen mit isotroper Sonde realisieren die Isotropie nur dadurch, dass die drei orthogonalen Ebenen sequenziell gemessen werden. Eine Auswertung der Phase findet nicht statt.

Bei allgemeiner Lage des Polarisationsellipsoids führt die sequenzielle Punktrastermethode im Allgemeinen zu einer leichten *Überschätzung* der maximalen effektiven Feldstärke, wohingegen der Einsatz der Schwenkmethode zu einer Unterschätzung führt, da hier die Messantenne lediglich entlang der größten Hauptachse im Ellipsoid ausgerichtet wird. Der Grad der Über- bzw. Unterschätzung ist von der Form und Lage des Polarisationsellipsoids, d.h. u.a. von der Stärke der Abweichung von der linearen Polarisation abhängig. Im Extremfall einer ideal zirkularen Polarisation unterschätzt die Schwenkmethode die maximale effektive Feldstärke um 3 dB, wohingegen die Punktrastermethode das korrekte Ergebnis anzeigt. Im Realfall wird aber der Fehler der Schwenkmethode wesentlich kleiner als 3 dB sein, da die zirkulare Polarisation bei Mobilfunk Basisstationen ein sehr unwahrscheinlicher Spezialfall ist.

2.5.6.4 Genauigkeit

Um die Genauigkeit der einzelnen Verfahren beurteilen zu können, wurden Vergleichsmessungen an zwei unterschiedlichen Konfigurationen durchgeführt: Es wurde sowohl ein Messort gewählt, bei dem direkte Sicht zur Sendeantenne bestand (ein dominanter Ausbreitungspfad), als auch ein Messort ohne Sicht zur Basisstationen (Mehrwegeausbreitung, mehrere, unter Umständen gleichgroße Teilimmissionen). Gemessen wurde ein BCCH Kontrollkanal bei GSM 900.

Für die Punktrastermethode wurde ein Raster nach Bild 2.5.15 gewählt: Im linken Teil ist eine Aufsicht über das gewählte Punktraster einer Ebene dargestellt. Die Maschenweite beträgt 25 cm und wurde so gewählt, dass sie in keinem ganzzahligen Verhältnis zur halben Wellenlänge des zu messenden Signals steht. Die aus 21 Einzelpunkten bestehende Ebene bildet einen Kreis nach, so dass bei der Anwendung der Drehmethode eine optimale Vergleichbarkeit beider Messvolumina gewährleistet ist. Gemessen wurde in drei Ebenen, die sich in 0,75 m, 1,25 m und 1,75 m über dem Fußboden befinden (Bild 2.5.15 rechts).

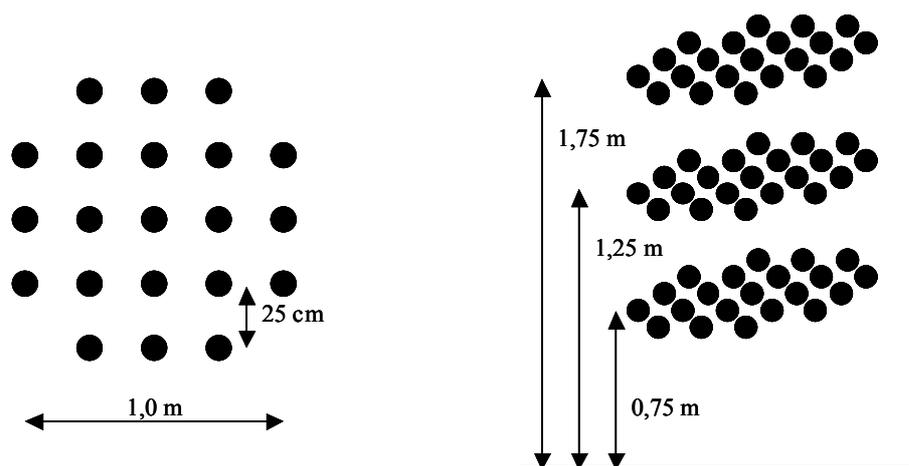


Bild 2.5.15 Wahl des Punktrasters: Draufsicht (links) und Anordnung der Ebenen im Raum (rechts)

Das durch das Punktraster aufgespannte Volumen, in etwa ein Kreiszyylinder von 1 m Durchmesser und 1 m Höhe, der 0,75 m über dem Fußboden beginnt, wurde auch als Messvolumen für die Schwenkmethode verwendet, damit Messwertunterschiede durch Erfassung nicht vergleichbarer Messorte ausgeschlossen bleiben. Die Messungen wurden alle mit der bikonischen Antenne durchgeführt. Bei der Punktrastermethode erfolgte zusätzlich zur Ermittlung des Maximalwertes eine Bildung des (leistungsmäßigen) Mittelwertes über alle Messpunkte.

Methode	Szenario Sichtverbindung		Szenario keine direkte Sicht	
	Maximalwert	Mittelwert	Maximalwert	Mittelwert
Schwenkmethode	87,1 dB μ V/m	-	87,1 dB μ V/m	-
Drehmethode	86,7 dB μ V/m	-	86,4 dB μ V/m	-
Punktrastermethode	87,9 dB μ V/m	84,7 dB μ V/m	87,6 dB μ V/m	84,8 dB μ V/m

Tabelle 2.5.2 Ergebnisse der Vergleichsmessungen der drei Messmethoden

Bereits hier wird sichtbar, dass alle drei Methoden, sofern das Punktraster eng genug ist und alle Methoden mit genügend Sorgfalt durchgeführt werden, zu gleichen Ergebnissen kommen. Durch eine Mittelwertbildung kann der Messwert gegenüber dem Maximum erheblich abgesenkt werden.

Die hier sichtbaren Tendenzen stehen in guter Übereinstimmung mit anderen Untersuchungen. Bereits in Abschnitt 2.5.3.1.2 wurden Ergebnisse ausführlicher Vergleichsmessungen aus der Schweiz an verschiedenen Messorten mit verschiedenen Antennen nach unterschiedlichen Verfahren vorgestellt [RYS 02]. Im Bild 2.5.2 ist bereits zu erkennen, dass auch hier die drei eingesetzten Methoden vergleichbare Ergebnisse liefern. Diese Tendenz war auch an zwei weiteren Messorten festzustellen, die in [RYS 02] im Detail dokumentiert sind. Die dortigen Ergebnisse sind in Tabelle 2.5.3 statistisch zusammengefasst, wobei die Messresultate auf den Mittelwert aller Messungen am jeweiligen Messortes normiert wurden.

Messmethode	Anzahl der Messwerte	Standardabweichung [%]
Schwenkmethode	34	22
Drehmethode	22	29
Punktrastermethode (mit Extraktion des Maximalwertes)	18	21

Tabelle 2.5.3 Ergebnisse eines Schweizer Vergleichs von unterschiedlichen Messmethoden, aus [RYS 02]

An dieser Art der Auswertung ist deutlich zu erkennen, dass die drei Methoden vergleichbare Streuungen aufweisen und aus diesem Grund bezüglich der Genauigkeit keine eindeutige Präferenz für die eine oder andere Methode begründet werden kann.

Ähnliche Untersuchungen, die zu den selben Ergebnissen gelangen, finden sich z.B. in [WUSCH 02].

Die oben beschriebenen Untersuchungen am 21 Punkte Raster in drei Ebenen bieten vor allem bei der Punktrastermethode ein interessantes Datenmaterial für weitere Auswertungen: In Übereinstimmung mit einer z.B. von [CEPT 04] vorgeschlagenen Mittelungsgeometrie über drei übereinander stehende Punkte (siehe Bild 2.5.14, oben rechts) wurde bei der Punktrastermessungen folgende Auswertung durchgeführt: Aus den drei Ebenen mit je 21 Punkte werden 21 Punktreihen mit drei übereinander liegenden Punkten extrahiert und sowohl die jeweiligen Maximalwerte, als auch die Mittelwerte bestimmt. Obwohl hier mit den gewählten Höhen nicht exakt die gleiche Geometrie vorliegt wie in [CEPT 04], können trotzdem interessante Erkenntnisse gewonnen werden. Bild 2.5.16 zeigt das Ergebnis für beide Szenarien. Hier bezeichnen die Marker die Ergebnisse an der jeweiligen Punktreihe. Der Übersichtlichkeit halber wurden die Markerpositionen mit Linien verbunden.

Obwohl das Messvolumen mit einem Durchmesser von 1 m relativ begrenzt erscheint, gibt es von Punktreihe zu Punktreihe signifikante Unterschiede bezüglich der ermittelten Messwerte. Beispielsweise liegen beim Szenario mit direkter Sicht der „größte Maximalwert“ (Reihe 3 und der „kleinste Maximalwert“ (Reihe 11) um ca. 4 dB auseinander. Dies bedeutet, dass man bei der Punktrastermethode nur mit einem relativ engen Gitter und ausreichend viel Gitterpunkten sicher das Maximum treffen wird. Gleiches gilt für die Mittelwerte (leistungsmäßig gemittelt), wobei hier bedeutsam ist, dass die Punktreihe mit dem größten Einzelwert nicht unbedingt mit der Punktreihe übereinstimmen muss, die den größten über die drei Punkte gemittelten Wert aufweist. So ist beispielsweise im Szenario ohne direkte Sicht der maximale Mittelwert in Reihe 10 ca. 2 dB größer als in Reihe 15, die den größten Maximalwert aufweist). Erfolgt also die Wahl der „Mittelungsebene“ anhand eines vorher bestimmten Ortes mit maximaler Immission, sind Fehlbewertungen möglich.

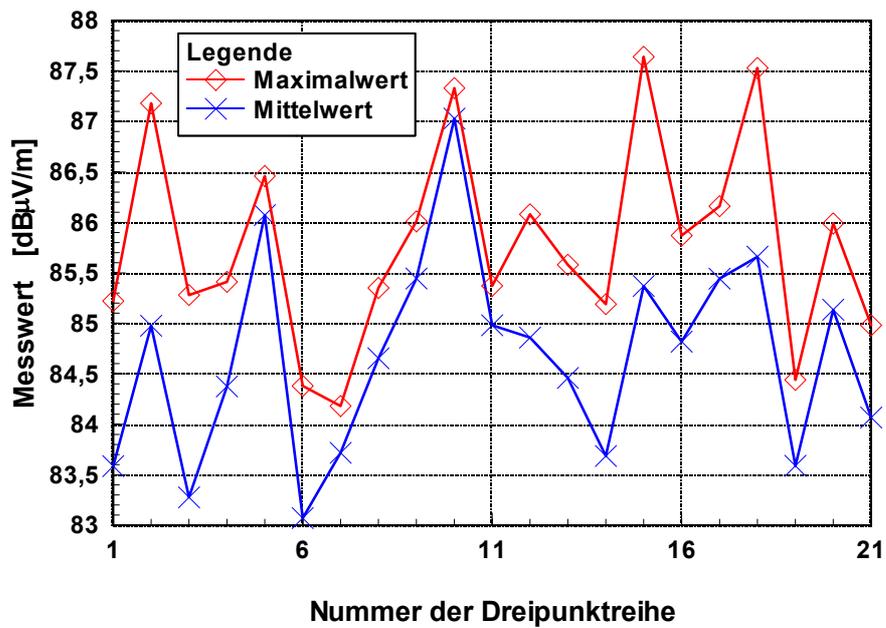
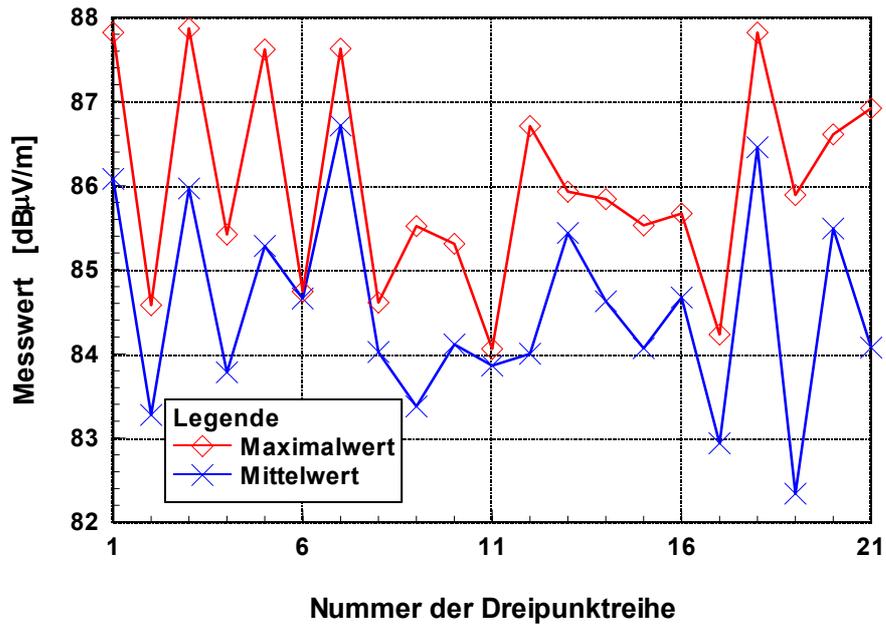


Bild 2.5.16 Mittel- und Maximalwerte für die Messungen mit Punkrastermethode nach Geometrie Bild 2.5.15. Es wurden 21 Punktreihen mit drei übereinander stehenden Punkten gebildet. Szenario mit direkter Sicht (oben) und ohne Sicht (unten) zur Basisstationsantenne

2.5.6.5 Zeitlicher Aufwand

Die drei Messverfahren unterscheiden sich bezüglich ihres Aufwands teilweise beträchtlich. Bei den im vorigen Abschnitt vorgestellten eigenen Messungen wurden etwa folgende Zeiten benötigt. Die Zeiten gelten pro Messort, d.h. für die vollständige Untersuchung des gesamten Messvolumens.

- Schwenkmethode: 5 Minuten
- Drehmethode: 20 Minuten
- Punktrastermethode: ca. 1 Stunde pro Ebene, d.h. 3 Stunden insgesamt

Sicherlich lassen sich durch Automatisierungen z.B. bei der Drehmethode und auch bei der Punktrastermethode Einsparungen erzielen. Vor allem bei der Punktrastermethode war hier der Zeitaufwand beträchtlich, da

- eine relativ große Punktzahl gewählt wurde,
- die Antenne manuell von einem zum nächsten Punkt bewegt werden musste (inkl. Einjustierung per Lot),
- die Antenne manuell in ihrer Polarisationsrichtung verändert werden musste.

Bezüglich der Punktzahl ist ein Kompromiss zwischen Aufwand und Genauigkeit zu finden, da wie oben dargestellt eine zu starke Reduzierung der Punktzahl die Messfehler im Sinne einer Unterschätzung der tatsächlichen Immissionen vergrößert.

Bezüglich der Polarisationsänderung sind mittlerweile Systeme auf dem Markt, die über eine automatische Antennenausrichtung verfügen (z.B. [HAI 04]). Die Bewegung der Antenne von einem Rasterpunkt zum nächsten erfolgt zwar üblicherweise manuell, kann aber durch Vorbereitung eines (nichtmetallischen) Stativs oder Gerüsts ebenfalls verkürzt werden. Im Hinblick auf die Änderung der Polarisationsrichtung der Antenne sind auch die mehrfach angesprochenen frequenzselektiven Messgeräte mit isotroper Sonde eine interessante Alternative.

Trotz möglicher zeitlicher Einsparungen wird, sofern ein Rasterabstand maximal im Bereich der Wellenlänge vorausgesetzt wird, die Punktrastermethode immer den weitaus meisten zeitlichen Aufwand kosten, wohingegen die Schwenkmethode am einfachsten durchzuführen ist. Zeitliche Reduzierungen sind bei der Punktrastermethode bei Verzicht auf eine Maximalwerterfassung auch durch Vorgabe eines reduzierten Mittelungsgitters möglich. Auf die Mittelung wird in Abschnitt 2.5.6.7 detailliert eingegangen.

2.5.6.6 Reproduzierbarkeit

Zur Beurteilung der Reproduzierbarkeit wurden für ein und denselben Messort zeitlich getrennt Messungen mit der Schwenkmethode von verschiedenen Messpersonen durchgeführt. Die Schwenkmethode wird bezüglich der Reproduzierbarkeit als am kritischsten erachtet, da bei Drehmethode und Punktrastermethode die Orte und Polarisierungen fest vorgegeben sind und keiner subjektiven, d.h. vom Messpersonal und der besonderen Art der Messdurchführung abhängenden Einflüsse aufweist (Ausnahme: Einfluss des Messenden).

Es wurden jeweils 10 Messungen mit der Schwenkmethode sowohl mit der bikonischen, als auch mit der logarithmisch-periodischen Antenne durchgeführt. Gemessen wurde ein BCCH Kontrollkanal bei GSM 900. An den 10 Messungen waren abwechselnd drei Messpersonen beteiligt. Bild 2.5.17 zeigt das Ergebnis.

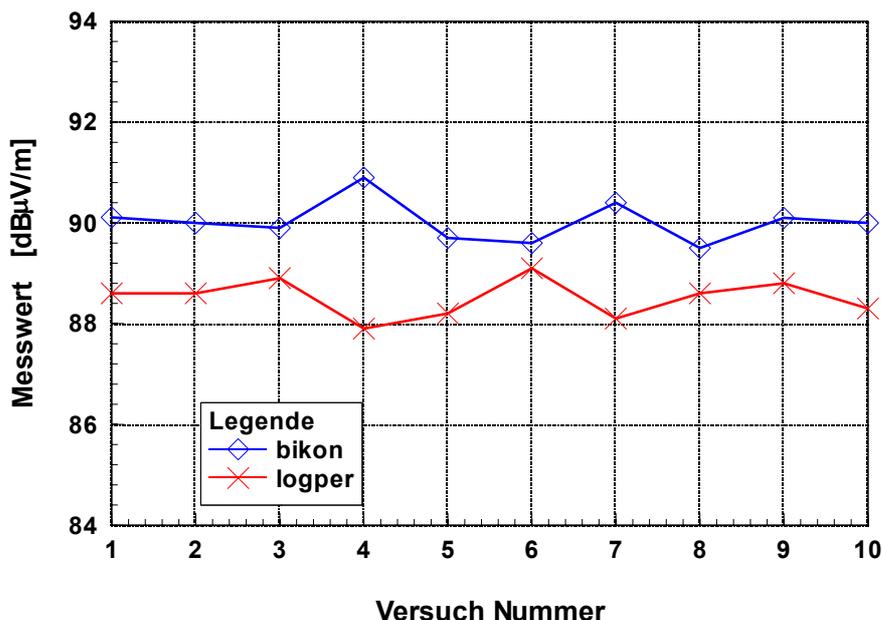


Bild 2.5.17 Reproduzierbarkeit der Schwenkmethode; 10 Messungen mit unterschiedlichem Messpersonal

Die Reproduzierbarkeit ist als sehr gut zu bezeichnen. Die maximale Schwankungsbreite beträgt etwa 1,5 dB. Wie bereits oben ausführlich diskutiert, sind hier wieder Absolutwertunterschiede zwischen der logarithmisch-periodischen (logper) und der bikonischen (bikon) Antenne zu sehen, wobei letztere tendenziell etwas höhere Werte anzeigt. Als Gründe werden wiederum eine mögliche Beeinflussung des Messenden sowie eine unterschiedliche Erfassung von Mehrwegesignalen vermutet.

Die Aussage der guten Reproduzierbarkeit wird auch durch vergleichbare Untersuchungen in [RYS 02] und [WUSCH 02] bestätigt. Für die schon oben diskutierten Schweizer Vergleichsmessungen sind die Ergebnisse in Tabelle 2.5.3 dargestellt, wobei hier auch die Streuung durch unterschiedliche Messdurchführende und verschiedene Messtechniken erfasst wurde. In [WUSCH 02] wird bezüglich der Reproduzierbarkeit der Schwenkmethode aus verschiedenen Einzelmessungen eine Standardabweichung von 14 % (feldstärkebezogen) angegeben.

2.5.6.7 Möglichkeiten und Grenzen der Mittelung

In diesem Abschnitt sollen unbeachtet von Aufwands- oder Normvorgabeaspekten die Möglichkeiten und Grenzen von Mittelungstechniken diskutiert werden.

Wie bereits in [BOR 04] ausgeführt, sind zu dieser Thematik z.B. in [LEH 03, NEU 03] umfangreiche Untersuchungen durchgeführt worden, die folgende Fragen klären sollten:

- Ist das Mittelungsergebnis für ein festes Expositionsszenario von der Mittelungsgeometrie abhängig? Wie groß ist die Spanne zwischen größtem und kleinstem erfassten Wert innerhalb einer Geometrie?

- Was ist die optimale Anzahl der Punkte innerhalb einer Mittelungsgeometrie? Hierbei wurden auch Geometrien untersucht, die deutlich feiner gerastert waren als die in Bild 2.5.14 dargestellten.
- Welche Mittelungsgeometrie ergibt die geringste Abweichung des ermittelten Mittelwertes vom „wahren“ Mittelwert eines Bewertungsvolumens? Hier wurden größere Raumbereiche fein abgetastet und verschiedene Mittelungsgeometrien durch diese Punktwolke „hindurchgeschoben“. Dabei wurde auch erfasst, wie groß die Schwankungsbreite ein und derselben Mittelungsgeometrie an verschiedenen Positionen innerhalb der Punktwolke sind. Neben den in Bild 2.5.14 dargestellten Geometrien kamen auch andere Geometrien, z.B. horizontale und vertikale Linien, Ebenen und Würfel zum Einsatz.

Bei diesen Untersuchungen wurde festgestellt, dass für ein und dasselbe Messvolumen die Mittelwerte sehr stark *von der verwendeten Mittelungsgeometrie* abhängen. Der Grund dafür ist, dass einige Mittelungsgeometrien ihre Punkte primär in vertikaler Richtung verteilen, wohingegen andere auch eine relevante horizontale Ausdehnung haben.

Nun ist es jedoch, wie in [BOR 04] gezeigt, sehr vom Expositionsszenario abhängig, wie sich die Energie in vertikaler Richtung und in horizontaler Raumrichtung verteilt. Damit ist eine Abhängigkeit der „optimalen“ Mittelungsgeometrie vom Expositionsszenario gegeben.

Nicht nur der Mittelwert, sondern auch die Häufigkeitsverteilung der an den Gitterpunkten der Geometrie erfassten Feldstärken kann sich durch unterschiedliche Geometrien grundlegend verändern, da jede Mittelungsgeometrie quasi jeweils nur einen „Ausschnitt“ aus der „wahren“ räumlichen Häufigkeitsverteilung in einem ausgedehnten Volumen darstellt. Die umfangreichen Untersuchungen führen die Autoren von [LEH 03] sogar zu der Vermutung, dass die Messgeometrie einen *stärkeren* Einfluss auf die Häufigkeitsverteilung der Feldstärke hat als unterschiedliche Expositionsszenarien.

Hinzu kommt, dass praktikable Mittelungsgeometrien in der Punktzahl begrenzt sein müssen, um den Messaufwand in vernünftigen Dimensionen zu halten. Insofern müssen Geometrien gefunden werden, die

- eine möglichst geringe Punktzahl aufweisen (keinesfalls mehr als 10) und
- den menschlichen Körper dennoch ausreichend nachbilden, um der Aussage in [ICNIRP 98] bezüglich der Mittelung im Körpervolumen nachzukommen.

Beide Forderungen erscheinen nach gegenwärtigem Erkenntnisstand nicht sinnvoll verknüpfbar. Mit abnehmender Punkteanzahl bzw. reduzierter Maschenweite wird die durch Fast Fading örtlich kleinskalig schwankende Feldverteilung unterabgetastet, was je nach Aufbau und Lage der vereinfachten Mittelungsgeometrie zu einer deutlichen Abweichung vom „wahren“ Mittelwert führen kann. Auch diese Abweichung hängt prinzipiell vom Expositionsszenario ab, d.h. der Fragestellung, ob die Messungen im Freiraum oder in Räumen, innerhalb oder außerhalb der Hauptstrahlrichtung, mit oder ohne direkter Sicht zur Basisstation usw. stattfinden. Die in [BOR 04] durchgeführten Fast Fading Berechnungen haben gezeigt, dass je nach Szenario starke Feldstärkeschwankungen mal in der vertikalen und mal in der horizontalen Richtung auftreten. Auf keinen Fall wird es sinnvoll sein, in Abhängigkeit vom Messort diesen zuerst zu „klassifizieren“, um dann die optimale Mittelungsgeometrie festzulegen und nach dieser dann punktweise Messungen durchzuführen. Die

damit dem Messteam offen stehenden Freiheitsgrade würde die Gefahr von unterschiedlichen Bewertungen eröffnen und der Idee eine „Normierung“ der Messvorschriften zuwider laufen.

Es wird erwartet, dass die internationalen Forschungen auf diesem Gebiet noch eine Zeitlang fortgesetzt werden. Die Untersuchungen sind sehr aufwändig sowie zeit- und kostenintensiv und nehmen bereits die Form von Grundlagenforschung an: Es muss eine Vielzahl von repräsentativen Expositionsszenarien gebildet werden, mehrere Beispielorte pro Szenario festgelegt werden, und an diesen Orten eine möglichst feine punktweise, kleinskalige (im Zentimeterbereich) Abtastung der Feldstärken vorgenommen werden. Es entsteht eine Fülle von Datenmaterial, das dann auf die Sinnhaftigkeit von verschiedenen, möglichst einfachen, dabei aber doch den menschlichen Körper nachbildenden Mittelungsgeometrien zu überprüfen ist.

Nach dem oben Gesagten ist aber zu erwarten, dass eine einfache und für alle Expositionsszenarien einheitliche optimale Geometrie schwer zu finden sein wird, da die Feldverhältnisse in realen Umgebungen äußerst komplex sind. Das gilt insbesondere auch für den Fall, dass sich, z.B. bei mehrkanaligen Anlagen oder Standortmehrfachnutzung, Felder unterschiedlicher Frequenzen zu einem komplexen Gesamtverlauf überlagern und somit eine Frequenzabhängigkeit in die Verteilung der Immission einbringen. Deswegen wird auch unter dem Aspekt von Aufwand und Interpretation der 26. BImSchV bezüglich der Mittelung eingeschätzt, dass derzeit die *Maximalwertermittlung* der sinnvollste Weg zur mess- und berechnungstechnischen Expositionsermittlung ist.

2.5.6.8 Fazit

Mit der Schwenkmethode, der Drehmethode und der Punktrastermethode stehen drei praxiserprobte, taugliche Methodiken zur Messdurchführung zur Verfügung. Alle drei Verfahren liefern unter gleichen Randbedingungen bei sorgfältiger Durchführung identische Ergebnisse. Hierbei wird allerdings vorausgesetzt, dass bei der Punktrastermethode das Messraster fein genug ist.

Bezüglich des zeitlichen Aufwandes ist die Punktrastermethode am aufwändigsten und die Schwenkmethode am schnellsten. Bei Punktrastermethode und Drehmethode können sich je nach Messort Platzprobleme ergeben.

Die Streuung der Ergebnisse der drei Methoden bei Messung durch unterschiedliche Labore ist vergleichbar. Insbesondere ist die Streuung der relativ aufwändigen Drehmethode und Punktrastermethode nicht kleiner als bei der einfacher durchzuführenden Schwenkmethode.

Allerdings ist die Punktrastermethode die einzige, die eine Mittelung innerhalb eines Messvolumens ermöglicht. Eine genauere Betrachtung zeigt jedoch, dass die „optimale“ Mittelungsgeometrie sehr stark vom Expositionsszenario abhängt und keine „allgemein gültige“ Geometrie angegeben werden kann. Durch die Reduzierung der Punktzahl auf praktikable Werte steigt die Sensibilität des Mittelungsergebnisses gegenüber Expositionsszenario sowie Art und Lage der Mittelungsgeometrie. Aus diesen Gründen wird eingeschätzt, dass die Schwenkmethode derzeit die am besten geeignete Methode für vorliegende Aufgabenstellung ist. Damit soll jedoch die Punktrastermethode mit anschließender Mittelung nicht pauschal von einer weiteren Betrachtung hinsichtlich ihres Einsatzes für Immissionsmessungen an

Basisstationen ausgeschlossen werden. Unter Umständen ist es mit weiteren Forschungsanstrengungen möglich, eine einfache und den menschlichen Körper ausreichend repräsentierende Mittelungsgeometrie bei praktikabler Punktzahl zu finden. Zum augenblicklichen Stand erweist sich jedoch die Schwenkmethode als optimale und praktikabelste Methode für vorliegende Aufgabenstellung – die Ermittlung der Immission durch Mobilfunk Basisstationen mit Eignung zur Grenzwertüberprüfung.

Die Reproduzierbarkeit der Schwenkmethode kann als sehr gut bezeichnet werden. Voraussetzung ist hier jedoch eine sehr sorgfältige Durchführung des Schwenkvorgangs, da alle Polarisierungen und Einfallsrichtungen im Messvolumen erfasst werden müssen.

2.5.6.9 Breitbandiges Messverfahren

Grundsätzlich ist auch bei der Messung mit einem breitbandigen Feldstärkemessgerät eine Maximalwertsuche möglich. Viele Messgeräte verfügen ebenfalls über eine „Maxhold“-Funktion, mit der der größte Wert im Messvolumen gespeichert werden kann. Die Aktivierung dieser Funktion ist jedoch aus folgenden Gründen mit Vorsicht zu behandeln:

1. Breitbandsonden benötigen eine gewisse Zeit, um sich auf den Messwert an einem festen Ort einzupendeln.
2. Ein Schwenk kann, wenn überhaupt, dann nur sehr langsam erfolgen, d.h. wesentlich langsamer als mit den oben beschriebenen Antennen. Ursache dafür ist, dass bei zu schnellen Schwenks bei einigen Geräten nicht reale, völlig überhöhte Werte angezeigt werden. Grund hierfür ist nach Herstellerangabe die Bewegung der Sonde im Erdmagnetfeld, die in der Sonde eine von der Bewegung abhängige Spannung induziert, die dann fälschlicherweise als Immission gewertet wird.

Vor allem wegen des zweiten Grundes ist eine kontinuierliche Messung während einer Bewegung des Messgerätes stark eingeschränkt. Die Punktrastermethode, d.h. ein diskretes Messen der Werte in einem festen Punktraster, ist hingegen möglich. Bei isotropen Sonden entfällt die Notwendigkeit der Positionierung des Messgerätes in alle drei Raumrichtungen, so dass hier ein Zeitvorteil gegenüber nicht isotropen Sonden entsteht.

Neben der Maximalwertsuche bieten moderne Breitbandmessgeräte auch die Möglichkeit der Abspeicherung der Messwerte an diskreten Messpunkten und einer nachfolgenden Mittelung. Hierbei ist aber, wie oben diskutiert, die geringe Empfindlichkeit und fehlende Frequenzselektivität zu beachten. Letzteres führt bei der Auswertung zu unrealistisch hohen worst case Annahmen bezüglich der Hochrechnung auf maximale Anlagenauslastung.

Beim Betrieb der Breitbandsonden muss darauf geachtet werden, dass einige Gerätetypen nicht einstrahlungsfest gegen niederfrequente Felder, z.B. des technischen Wechselstroms 50 Hz, sind. Dies würde beim Vorliegen eines entsprechend starken Feldes zu einer Überschätzung der Mobilfunkimmissionen führen. Das jeweils einzusetzende Gerät ist deswegen vor Gebrauch z.B. auf 50 Hz Festigkeit zu prüfen, z.B. durch Annäherung an einen elektrischen Verbraucher höherer Leistung. Einige Gerätetypen besitzen extra zuschaltbare 50 Hz Filter, die bei Vorliegen eines Störfeldes aktiviert werden sollten.

2.5.7 Auswertung

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

- Wie werden aus den originär mit dem Spektrumanalysator gemessenen Spannungs- bzw. Leistungspegeln Feldstärke- oder Leistungsflussdichtewerte berechnet?
- Wie erfolgt die Extrapolation der gemessenen Augenblickswerte auf den Zustand bei maximaler Anlagenauslastung? Hierbei sind auch die Besonderheiten zu berücksichtigen, die sich aus der mobilfunktypischen Betriebsart Frequency Hopping ergeben.
- Ggf. Durchführung der Mittelung; dies ist bereits oben ausführlich behandelt worden.

2.5.7.1 Umrechnung der Messwerte auf Leistungsflussdichten bzw. Feldstärken

Die Grenzwerte sind üblicherweise als elektrische (E) bzw. magnetische Feldstärke (H) definiert. Oftmals wird als Immissionsgröße aber auch die elektrische Leistungsflussdichte (S) angegeben. Dies ist als gleichwertig zur Feldstärkeangabe zu betrachten, da E, H und S im Fernfeld dieselbe Information beinhalten und sich ineinander umrechnen lassen. 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. Die Dämpfungsfaktoren des HF-Zuleitungskabels werden als Kabelfaktoren und die Eigenschaften der Empfangsantenne als Antennenfaktoren k in den Spektrumanalysator eingegeben. Liegen die Antennenwerte nur als Gewinnfaktoren vor, so können sie bei einem 50 Ohm System mit der Gleichung

$$k[\text{dB/m}] = -29,774 + 20 \cdot \lg f [\text{MHz}] - g_i [\text{dB}] \quad (2.5.9)$$

in Antennenfaktoren umgerechnet werden. Der Antennenfaktor bezeichnet als Wandlungsmaß das Verhältnis zwischen der elektrischen Feldstärke, in der sich die Antenne befindet, zur anliegenden Hochfrequenzspannung U am Antennenfußpunkt:

$$K = \frac{E}{U} \quad (2.5.10)$$

Im Gegensatz zu Gleichung (2.5.9) beschreibt Gleichung (2.5.10) nichtlogarithmierten Größen.

Die Korrekturfaktoren für Kabel und Antenne sind (in logarithmierten Einheiten) *positiv* in den Spektrumanalysator einzugeben, so dass die Messwertanzeige um den entsprechenden

Faktor *erhöht* wird. Wird der Spektrumanalysator ohne Korrekturfaktoren in der Anzeigart Spannung [dB μ V] betrieben, so kann nach dem Aktivieren der Korrekturfaktoren das Messergebnis direkt als elektrische Feldstärke in [dB μ V/m] interpretiert werden.

Das Verfahren der Eingabe der Korrekturfaktoren hat den Vorteil, dass die gesamte Messwertanzeige bereits vor Ort in einer Feldstärkedarstellung vorliegt und somit ohne aufwändige Umrechnungen direkt eine Vorabschätzung der vorliegenden Immissionssituation erfolgen kann.

Ist die Eingabe der Korrekturfaktoren in das Gerät nicht möglich oder nicht gewollt, ist die Umrechnung wie folgt vorzunehmen:

$$P = S \cdot A_w \quad (2.5.11)$$

$$A_w = \frac{\lambda_0^2}{4\pi} \cdot G_i \quad (2.5.12)$$

$$\lambda_0 = \frac{c_0}{f} \quad (2.5.13)$$

$$S = \frac{P \cdot 4\pi \cdot f^2}{c_0^2 \cdot G_i} \quad (2.5.14)$$

$$E = \sqrt{S \cdot Z_{F0}} \quad (2.5.15)$$

Dabei bedeuten:

P	am Spektrumanalysator gemessene Leistung in W,
S	für Grenzwertaussage benötigte Leistungsflussdichte in W/m ² ,
E	für Grenzwertaussage benötigte elektrische Feldstärke in V/m,
Z _{F0}	Freiraumwellenwiderstand,
A _w	Antennenwirkfläche der an den Spektrumanalysator angeschlossenen Empfangsantenne in m ² ,
λ_0	Wellenlänge des mit der Antenne gemessenen Feldes in m,
G _i	isotroper Gewinn der Empfangsantenne, ohne Einheit,
f	Frequenz des mit der Antenne gemessenen Feldes in Hz,
c ₀	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum, c ₀ \approx 3·10 ⁸ m/s.

Zur Berechnung der zur Normüberprüfung dienenden Leistungsflussdichte S bzw. elektrische Feldstärke E ist in Gleichung (2.5.14) für P die gemessene Leistung und die entsprechende Frequenz f einzusetzen. Für den Gewinn G_i der Empfangsantenne wird der frequenzabhängige isotrope Antennengewinn abzüglich der frequenzabhängigen Dämpfung des jeweils verwendeten Kabels eingesetzt. G_i sowie die Kabeldämpfung sind Ergebnisse der Kalibrierung dieser Messmittel.

2.5.7.2 Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung (Spektrumanalysator)

2.5.7.2.1 Vorgehen bei GSM Anlagen

Laut Vorgaben der 26. BImSchV sind „die Messungen ... bei der höchsten betrieblichen Anlagenauslastung durchzuführen; andernfalls sind die Werte entsprechend hochzurechnen“.

Da in der Regel nicht davon ausgegangen werden kann, dass vom Betreiber die Anlage für die Zeit der Messungen in den maximalen Betriebszustand gefahren werden kann, muss die Extrapolation auf andere Art und Weise erfolgen.

Die *GSM Sendetechnik* hat einige markante Details, die man sich bei der Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung zunutze machen kann:

Eine GSM Basisstation sendet in der Regel auf mehreren, fest zugeordneten Frequenzen. Jede Frequenz bildet einen physikalischen Kanal. Für jeden Sektor (bzw. jede Funkzelle) der Basisstation gibt es einen Kanal, der ständig

- konstant mit maximaler Leistung sendet und
- bei dem alle Zeitschlitze belegt sind, auch wenn kein Gespräch über diesen Kanal läuft.

Dieser sog. BCCH (Broadcast Control Channel, Sende Kontrollkanal) hat u.a. verschiedene Steuerungsfunktionen hinsichtlich der augenblicklichen Position der Mobilstation (Local Area Code), Netzbetreiber, Zugriffsparameter, Liste der benachbarten Zellen usw. Der BCCH bestimmt durch sein permanentes Vorhandensein die minimale in einer Funkzelle mögliche Immission.

Zusätzlich zum BCCH können ein oder mehrere sog. Nutz- oder Gesprächskanäle (TCH, Traffic Channel) hinzukommen, über die vorwiegend nur Gespräche übertragen werden. Diese zeichnen sich dadurch aus, dass im Gegensatz zum BCCH

- nur dann gesendet wird, wenn Gespräche zu übertragen sind,
- in Gesprächspausen das Sendesignal ausgetastet wird (sofern DTX = Discontinuous Transmission aktiviert),
- nur in denjenigen Zeitschlitzen gesendet wird, in denen ein Gespräch läuft, und
- die Sendeleistung von Zeitschlitz zu Zeitschlitz unterschiedlich sein kann entsprechend der Verbindungsqualität zwischen Handy und Basisstation (intelligente Leistungsregelung).

Vor allem die TCH sind dafür verantwortlich, dass die Sendeleistung der Basisstation zeitlich nicht konstant ist, sondern vom Gesprächsaufkommen und der Verbindungsqualität abhängt. Auf dem Spektrumanalysator im Normalbetrieb (Max hold nicht aktiviert) erkennt man die BCCH daran, dass sie *ständig* als Immissionslinie mit konstanter Amplitude im Spektrum vorhanden sind, wohingegen die TCH nur ab und zu und in der Amplitude unterschiedlich groß im Spektrum erscheinen.

Die Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung kann also derart erfolgen, dass zunächst die Immission durch die BCCH Kanäle gemessen wird und diese dann mit der maximal möglichen Anzahl der Kanäle extrapoliert wird. Dieses Vorgehen hat den Vorteil, dass die in den normativen Vorgaben angegebene 6-Minuten-Mittelung bei der Immissionserfassung umgangen werden kann, da mit dem BCCH ein Kanal vermessen wird, der zumindest anlagenseitig leistungsmäßig nicht schwankt.

Für eine solchermaßen korrekte Bestimmung der maximal möglichen Immission einer Anlage ist die konstruktive Mitarbeit der Netzbetreiber notwendig. Nur wenn

- die Anzahl der Sektoren (Zellen) pro Basisstation,

- die bei der RegTP beantragte, maximale Anzahl der Kanäle pro Sektor (Zelle) und
- die Frequenzen der unterschiedlichen Kanäle (BCCH und TCH)

bekannt sind, kann eine Zuordnung der im Spektrum gemessenen Immissionen auf die unterschiedlichen Kanäle der Station(en) erfolgen. Bei dieser Abfrage sollte auch in Erfahrung gebracht werden, ob sich die Anlage zum Zeitpunkt der Messung in einem gegenüber dem Normalbetrieb veränderten Betrieb befand; dies ist entsprechend in die Auswertung einzubeziehen.

Beim Beispiel nach Bild 2.5.18 handelt es sich um eine Station mit drei Sektoren bei je zwei Kanälen pro Sektor, von denen während der Messung jedoch Kanal 2 von Sektor 2 zum Zeitpunkt der Messung nicht aktiv war. Das Spektrum sei bereits um den Antennenfaktor und den Kabelfaktor korrigiert, d.h. es ist direkt die Immission am Messort dargestellt.

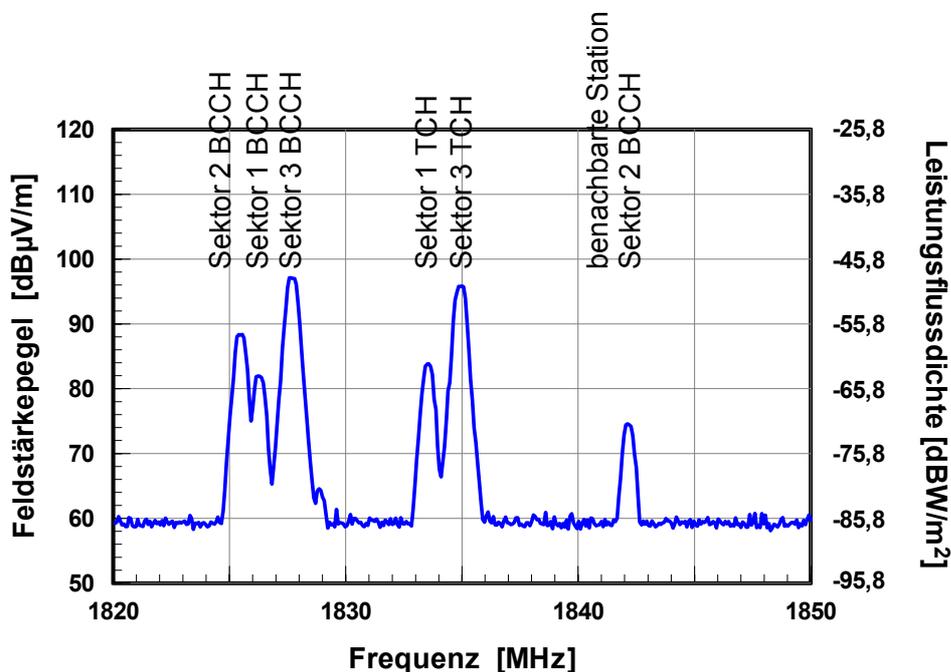


Bild 2.5.18 Kanalzuordnung einer Basisstationsmessung bei GSM 1800

Da auch bei Messpunkten in unmittelbarer Nähe einer Basisstation (Hauptsendeanlage) die Immissionen durch umliegende Basisstationen (Nebensendeanlagen) einen wesentlichen Beitrag zur Gesamtimmission liefern können, sind für eine korrekte Erfassung der *Gesamtimmissionen* im Mobilfunkbereich (sofern dies die Aufgabenstellung ist) auch die Frequenz- und Kanalinformationen dieser Anlagen von Interesse.

Beim Einholen der Betreiberinformation muss berücksichtigt werden, dass durch die Netzbetreiber in regelmäßigen Abständen sog. Frequenzplanwechsel vorgenommen werden. Dies bedeutet, dass aus versorgungstechnischen Gründen die Frequenzbelegung der Kanäle von Zeit zu Zeit wechselt. Insofern muss das Einholen der Betreiberinformation immer unter Nennung des konkreten Messdatums erfolgen. Die detaillierten Frequenzinformationen sind *nicht* in der Standortbescheinigung der RegTP enthalten.

Mit der Kenntnis der Frequenzen der BCCH und TCH ist eine Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung folgerichtig durchführbar: Setzt man voraus, dass die TCH mit maximal derselben Leistung wie die BCCH gesendet werden, kann am Messpunkt die Immission jedes einzelnen TCH *theoretisch* maximal so groß wie die durch den BCCH werden. Somit wird zur Ermittlung der maximal möglichen *Leistungsflussdichte* für jeden Sektor

- die durch den BCCH erzeugte Leistungsflussdichte identifiziert und mit der Anzahl der möglichen Kanäle (BCCH + TCH) multipliziert,
- im Spektrum die Immissionen durch die TCH herausgestrichen.

Dieses Vorgehen ergibt die maximal mögliche Leistungsflussdichte im betrachteten Sektor.

Mit den anderen Sektoren der Anlage ist gleichermaßen zu verfahren. Die maximale Gesamtleistungsflussdichte durch die komplette Anlage ergibt sich durch Summierung der maximalen Leistungsflussdichten der einzelnen Sektoren. Mit den Leistungsflussdichten durch benachbarte Stationen ist, sofern relevant, gleichermaßen zu verfahren. Somit ergibt sich für die maximale Gesamtleistungsflussdichte:

$$S_{\max, \text{gesamt}} = \sum_{i=1}^n (S_{i, \max} \cdot N_i) \quad . \quad (2.5.16)$$

Dabei bezeichnet N die Anzahl der Kanäle pro Sektor (Zelle) und n die Zahl der Sektoren. n ist nicht auf die Sektorzahl der Hauptsendeanlage begrenzt, sondern erstreckt sich auch auf Nebensendeanlagen.

In Bild 2.5.19 ist dieses Verfahren veranschaulicht.

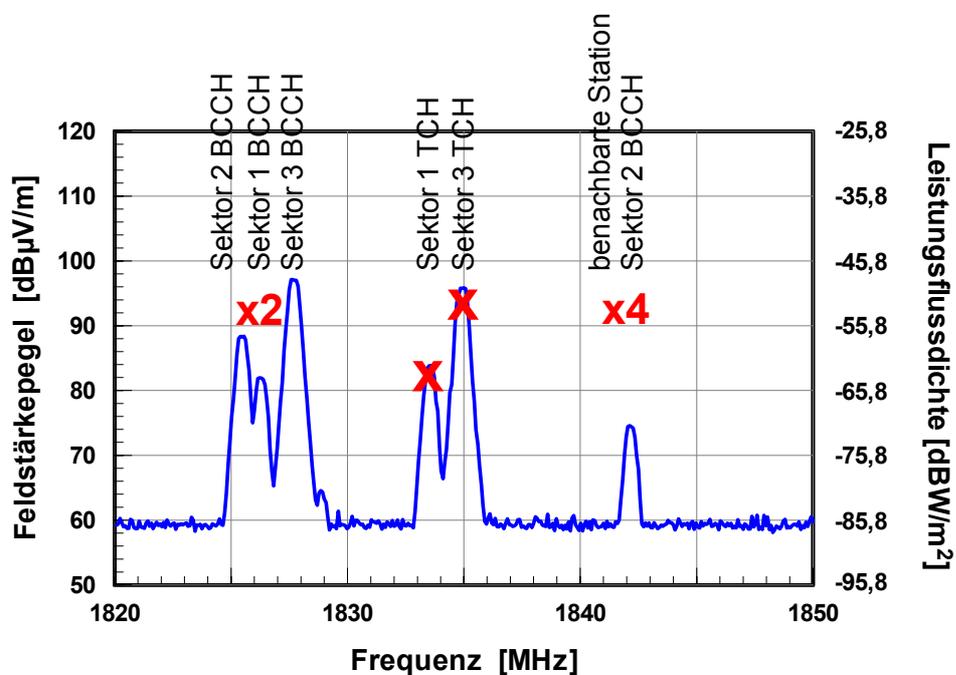


Bild 2.5.19 Ermittlung der maximalen Gesamtimmission für das Spektrum aus Bild 2.5.18

Die im Spektrum vorhandenen zweiten Kanäle von Sektor 1 und 3 werden eliminiert; die Immissionen von den BCCH (Kanal 1 der einzelnen Sektoren) mit der maximalen Kanalzahl

(in diesem Fall 2) multipliziert und aufsummiert. Hinzu kommt die Immission durch die benachbarte Station, bei der im vorliegenden Fall nur Sektor 2 messbar ist. Sektor 2 verfüge über maximal 4 Kanäle. Somit ergibt sich für die maximale Gesamtimmission in diesem Frequenzbereich:

$$\begin{aligned} \text{maximale Gesamtimmission (Leistungsflussdichte) } S_{\text{max,gesamt}} = & \\ & 2 \times \text{Leistungsflussdichte durch Sektor 1 BCCH} + \\ & 2 \times \text{Leistungsflussdichte durch Sektor 2 BCCH} + \\ & 2 \times \text{Leistungsflussdichte durch Sektor 3 BCCH} + \\ & 4 \times \text{Leistungsflussdichte durch Sektor 2 BCCH der Nachbarstation.} \end{aligned} \quad (2.5.17)$$

Die Multiplikation der Immissionen durch die BCCH und Aufsummierung darf nur für den Fall erfolgen, dass die Gesamtimmission als *Leistungsflussdichte* S ausgedrückt wird.

Wird die Gesamtimmission als *elektrische Feldstärke* E ausgedrückt, dann wird

- die Gesamtimmission eines Sektors durch Multiplikation der Feldstärke des BCCH mit der Quadratwurzel der Kanalzahl dieses Sektors gebildet und
- die Gesamtimmissionen der Sektoren geometrisch aufsummiert:

$$E_{\text{max,gesamt}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (E_{i,\text{max}} \cdot \sqrt{N_i})^2} \quad (2.5.18)$$

In Tabelle 2.5.4 werden die Berechnungen für die elektrische Feldstärke und die elektrische Leistungsflussdichte am Beispiel von Bild 2.5.19 demonstriert:

	Elektrische Feldstärke E				elektrische Leistungsflussdichte S			
	Sektor 1	Sektor 2	Sektor 3	Nachbarstation	Sektor 1	Sektor 2	Sektor 3	Nachbarstation
Messpegel	82,0 dB μ V/m	88,4 dB μ V/m	97,1 dB μ V/m	74,6 dB μ V/m	-63,8 dBW/m ²	-57,4 dBW/m ²	-48,7 dBW/m ²	-71,2 dBW/m ²
Messwert linear	0,0126 V/m	0,0263 V/m	0,0716 V/m	0,0054 V/m	$4,2 \cdot 10^{-7}$ W/m ²	$1,8 \cdot 10^{-6}$ W/m ²	$1,4 \cdot 10^{-5}$ W/m ²	$7,6 \cdot 10^{-8}$ W/m ²
Hochrechnungsfaktor	Wurzel 2			2	2			4
extrapolierte Immission	0,0178 V/m	0,0372 V/m	0,1013 V/m	0,0107 V/m	$8,4 \cdot 10^{-7}$ W/m ²	$3,7 \cdot 10^{-6}$ W/m ²	$2,7 \cdot 10^{-5}$ W/m ²	$3,1 \cdot 10^{-7}$ W/m ²
Gesamtimmission	0,1099 V/m				$3,2 \cdot 10^{-5}$ W/m ²			

Tabelle 2.5.4 Berechnungsbeispiel der Extrapolation der Konfiguration nach Bild 2.5.19

Gerade im innerstädtischen Gebiet ist das GSM 900 bzw. 1800 Frequenzspektrum in der Regel eng belegt. Deshalb wird hier empfohlen, bei der Auswertung nicht so vorzugehen,

dass nur die BCCH im Spektrum lokalisiert werden und *alle anderen* Spektrallinien weggestrichen werden, bevor mit der Kanalanzahl extrapoliert wird. Oftmals können auch weiter entfernte Stationen, für die u.U. nur teilweise Auskünfte der Betreiber vorliegen, einen nennenswerten Immissionsbeitrag liefern. Diese würden dann bei Konzentration auf die „bekannten“ BCCH aus der Bewertung herausfallen. Es ist vielmehr so vorzugehen, dass neben den bekannten BCCH auch die bekannten TCH identifiziert werden und nur diese eliminiert werden. Die im Spektrum verbleibenden, nicht zuzuordnenden Immissionen sind in die Summenbildung mit aufzunehmen.

In der Praxis kann es in Einzelfällen vorkommen, dass nicht der BCCH, sondern ein TCH die stärkste Immission von einer Zelle erzeugt. Grund hierfür sind die unterschiedlichen Frequenzen von TCH und BCCH. So können z.B. die Ausbreitungsbedingungen bei unterschiedlichen Frequenzen leicht verändert sein. Außerdem arbeiten Sendeleistungsverstärker und vor allem die Sendeanenne nicht bei allen Frequenzen gleich, so dass es dazu kommen kann, dass einige Frequenzen mit etwas stärkerer Intensität abgestrahlt werden können als andere. Dieser Fall ist in der Auswertung zu berücksichtigen: Wird bemerkt, dass die Immission eines TCH stärker als durch den BCCH der selben Zelle ist, hat die Hochrechnung nicht mit dem BCCH, sondern auf Basis des entsprechenden TCH zu erfolgen. Der Erfahrung nach sind dies aber Einzelfälle; wobei die Überschreitung der Immission durch den TCH gegenüber dem BCCH in der Regel kleiner 1 dB ist. Größere Abweichungen deuten auf Messfehler, z.B. zu schnelles Schwenken der Antenne in Relation zur Sweep Time des Spektrumanalysators hin. Unter diesem Gesichtspunkt hat auch der theoretisch mögliche Fall, dass ein zum Zeitpunkt der Messung gerade nicht aktiver TCH eine größere Immission als der BCCH erzeugen könnte, in der Gesamtbilanz des Messergebnisses einen lediglich marginalen Einfluss und ist mit dem Messunsicherheitsbudget (siehe unten) abgedeckt.

Ein weiterer Spezialfall ergibt sich, wenn die Anlage seitens des Betreibers nicht mit der maximal beantragten, sondern einer geringeren Sendeleistung pro Sektor gefahren wird. Das Verhältnis beider Sendeleistungen ist dann in die Hochrechnung einzubeziehen, da laut Vorgaben der maximal mögliche Betriebszustand relevant für eine Grenzwertaussage ist.

In seltenen Einzelfällen gibt es Anlagenkonfigurationen, bei denen für einen Sektor (Zelle) der BCCH und die TCHs nicht von ein und derselben Antenne, sondern von zwei unterschiedlichen, einige Meter voneinander separierten Antennen abgestrahlt werden. Sofern vom Messpunkt direkte Sicht zu beiden Antennen besteht und der Abstand des Messpunktes zur Anlage wesentlich größer als der Abstand zwischen beiden Antennen ist, ist dieser Fall ohne Auswirkung auf die Immissionsmessung. In den anderen Fällen kann diesem Spezialfall insofern Rechnung getragen werden, dass wie oben erwähnt die Hochrechnung nicht pauschal auf Basis des BCCH, sondern des immissionsstärksten Kanals (BCCH oder TCH) erfolgt.

Einige Netzbetreiber verwenden in ihren Mobilfunksystemen Frequency Hopping. Frequency Hopping ist eine Frequenzsprung Technik, die zur Interferenzminimierung dient. Beim sogenannten Synthesizer Frequency Hopping (SFH) sind mehr Frequenzen in der Luft, als physikalische Kanäle vorhanden sind. Wird eine Zelle beispielsweise mit vier Kanälen (ein BCCH und drei TCH) versorgt, können dafür z.B. insgesamt sieben unterschiedliche Fre-

quenzen zugeordnet sein. Da der BCCH nicht springt, stehen für die drei TCH insgesamt sechs Frequenzen zur Verfügung.

Im Amplitudenspektrum erscheinen dann in der Betriebsart „Max hold“ auf sechs Hopfrequenzen Spektrallinien, obwohl physikalisch nur drei TCH Kanäle vorhanden sind. Würden die Einzelmissionen einfach aufsummiert werden, wird die Gesamtmission überbewertet, da aus der „Max hold“ Position nicht ermittelt werden kann, dass es sich eigentlich nur um drei TCH handelt.

Zur korrekten Ermittlung der maximalen Gesamtmission hat die Extrapolation nicht auf Basis der Anzahl der Hopfrequenzen, sondern auf Basis der Anzahl der tatsächlich vorhandenen physikalischen Kanäle zu erfolgen. Auch hier sind entsprechende Angaben über eventuell eingesetzte Hopstechniken vom Netzbetreiber vonnöten.

2.5.7.2.2 Vorgehen bei UMTS Anlagen

Für das derzeit im Aufbau befindliche UMTS System ist eine Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung ebenso wichtig wie bei GSM, da im Regelbetrieb auch hier das Sendesignal der Basisstation in seiner Amplitude stark schwankt.

Das bei GSM verwendete Verfahren ist auf UMTS jedoch nicht ohne weiteres übertragbar. Anders als bei GSM, wo die einzelnen Gesprächsteilnehmer über Zeitschlitze bzw. unterschiedliche Frequenzen separiert werden, handelt es sich bei UMTS um ein CDMA System. Hierbei erfolgt die Separierung der Teilnehmer durch unterschiedliche Codes (CDMA = Code Division Multiple Access). Die Beiträge aller Teilnehmer werden in einem Signalgemisch zusammen in einem gemeinsamen Kanal übertragen. Somit sind mit einem Spektralanalysator, der nur den Frequenzbereich und in begrenztem Umfang auch den Zeitbereich von Signalen, nicht jedoch den Codebereich auflösen kann, die einzelnen Teilnehmer bzw. die einzelnen Kanäle nicht mehr separierbar.

Aufgrund der Neuartigkeit der UMTS Technologie haben sich noch keine vollständig ausgetesteten und verifizierten Messverfahren etabliert. Trotzdem bestehen erste Messerfahrungen im Messen von UMTS Immissionen an realen Anlagen. Hierbei sind zwei Trends erkennbar:

1. Die Messung erfolgt, vergleichbar mit GSM Anlagen, frequenzselektiv. Damit ist eine Unterscheidung der vier Netzbetreiber im Spektrum möglich, jedoch keine Unterscheidung unterschiedlicher Anlagen des selben Betreibers. Mit den in Abschnitt 2.5.5 beschriebenen Parametern wird die Immission im UMTS Kanal ausgemessen. Auch bei UMTS gibt es einige Signalisierungskanäle, die unabhängig vom Datenverkehr ständig eine Immission verursachen. Im Sinne einer worst case Abschätzung wird die zu einem Zeitpunkt gemessene Gesamtmission nur als diejenige interpretiert, die von der Signalisierung erzeugt wird. Der Anteil der permanent vorhandenen Signalisierungsleistung ist von den Netzbetreibern zu erfragen. Nach Empfehlungen des UMTS Gremiums 3GPP (3rd Generation Partnership Project) beträgt sie etwa 3-4 W [COST 281, WUSCH 04]. In Kenntnis der Maximalleistung pro Kanal kann eine worst case Abschätzung auf maximale Anlagenauslastung erfolgen.

Dieses Vorgehen wird die real vorliegende Immissionsituation mehr oder weniger deutlich überschätzen, da

- kein Datenverkehr angenommen wird,
- die Immissionen umliegender Anlagen des selben Betreibers als Immissionen der Hauptsendeanlage interpretiert werden müssen.

Diese Methode ist deswegen nur orientierend im Sinne einer Aussage „Grenzwert eingehalten“ anzusehen. Im augenblicklichen Zustand der UMTS Netze (relativ wenig Gesprächs- und Datenauslastung) hat sie durchaus ihre Berechtigung. In einem späteren Regelbetrieb des UMTS Netzes ist sie jedoch als nicht mehr brauchbar anzusehen, da die tatsächliche Immission wesentlich überschätzt wird.

2. Eine wesentlich exaktere, wenngleich nicht mehr mit üblichen Messmitteln der Hochfrequenzmesstechnik mögliche Messart ist die *codeselektive* Messung. Mittels spezieller Messgeräte, die nicht im Frequenzbereich, sondern im Codebereich messen, ist es möglich, den Immissionsanteil des sog. CPICH Kanals zu ermitteln. Dieser ist ein Kanal, der bei UMTS vergleichbare Aufgaben übernimmt wie der BCCH bei GSM. Er sendet ständig mit (zur Zeit noch) konstanter Leistung und bestimmt z.B. die maximale Ausdehnung einer Zelle. Bei Kenntnis des Verhältnisses von Gesamtleistung pro Kanal zur CPICH Leistung kann auch hier auf Anlagenvolllast extrapoliert werden.

Der CPICH ist in der Regel nur einmal pro Anlage/Sektor vorhanden. Die CPICH Signale der einzelnen Zellen werden vom codeselektiven Messgerät durch eine individuelle Scramblingcodenummer unterschieden. Somit können die Beiträge unterschiedlicher Anlagen und Sektoren separat erfasst werden. Normalerweise beträgt die Sendeleistung des CPICH etwa 2 Watt [WUSCH 04].

Diese Messmethodik ist nach derzeitigem Stand diejenige, die die größte Chance hat, sich bei Immissionsmessungen an UMTS-Anlagen durchzusetzen, da es im Unterschied zu den spektralen Messungen hier möglich ist, Messungen im Livebetrieb einer UMTS Station durchzuführen und trotzdem zuverlässig auf maximale Anlagenauslastung hochrechnen zu können.

Entsprechende codeselektive Messgeräte, sog. PN Scanner, kommen derzeit vermehrt auf den Markt. Die Systeme unterscheiden sich vor allem hinsichtlich Software und Dekodiergeschwindigkeit der CDMA Signale. Optimal ist eine Software, die nach erfolgter Dekodierung die Immission durch den CPICH Kanal gesondert ausweist. Eine hohe Dekodiergeschwindigkeit (mehrere Dekodierungen pro Sekunde) ist Voraussetzung für eine Anwendung der Schwenkmethode. Erfolgen die Dekodierungen zu langsam, kann die Schwenkmethode nicht mehr oder nicht zuverlässig eingesetzt werden, da eine „lückenlose“ Analyse des Messvolumens durch die geringe Dekodiergeschwindigkeit „ausgebremst“ wird.

Ein System, das diesen Anforderungen bezüglich einer speziell für den EMVU Bereich optimierten Software sowie einer ausreichend schnellen Dekodiergeschwindigkeit in hohem Maße entspricht, wird z.B. in [RS 04-1] vorgestellt. Als HF Frontend kann wahlweise auch ein geeigneter Spektrumanalysator eingesetzt werden.

Bei der Definition eines praktikablen und erprobten Messverfahrens für UMTS gibt es noch einigen Forschungsbedarf. Hierfür ist seitens des Bundesamtes für Strahlenschutz ein eigenes Forschungsvorhaben geplant, das sich dieser Problematik im speziellen widmen soll.

2.5.7.2.3 Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung (Breitbandmessgerät)

Aufgrund der fehlenden Frequenz- und Codeinformation ist mittels Breitbandmessgerät bei GSM und UMTS Anlagen eine exakte Ermittlung der maximal möglichen Immission nicht möglich. Trotzdem ist in gewissem Maße eine worst case Abschätzung möglich, die aber voraussetzt, dass am Messpunkt Immissionen vorliegen, die deutlich über der Anzeigeschwelle des Breitbandmessgerätes liegen. In diesem Fall kann in einem worst case Ansatz der Anzeigewert so interpretiert werden, als ob die gemessene Immission lediglich von den BCCH kommt und kein TCH aktiv war (GSM) bzw. im Falle von UMTS nur die Signalisierung aktiv ist und kein Verkehrsaufkommen vorliegt. Hierfür ist lediglich die Information einzuholen, über wie viel Kanäle die Anlage pro Sektor verfügt bzw. im Falle von UMTS der Anteil der Signalisierungskanäle an der Gesamtleistung. In der Realität wird mit diesem Verfahren die vorliegende Immissionssituation aber deutlich überschätzt, da in der Regel nicht ausgeschlossen werden kann, dass zusätzlich zur Signalisierung auch Verkehr vorliegt sowie andere HF Quellen zum gemessenen Wert einen relevanten Beitrag liefern. Somit ist bei dieser Methode bei entsprechend geringer Größe der gemessenen Immissionen lediglich eine Aussage „Grenzwert unterschritten“ möglich. Liegt der extrapolierte Wert hingegen über dem Grenzwert, heißt dies aufgrund der fehlenden Spektral- bzw. Code- und Auslastungsinformation nicht automatisch, dass der Grenzwert tatsächlich überschritten ist. Insbesondere ist eine exakte Ermittlung der Immissionsgröße bei maximaler Anlagenauslastung nicht möglich. Insofern können Breitbandmessungen hier nur orientierenden Charakter haben.

2.5.8 Dokumentation

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

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

Folgende Gliederung hat sich als geeignet erwiesen:

2.5.8.1 Administrative Angaben

Hier sind folgende Daten aufzuführen:

- Auftraggeber, Auftragnehmer mit den entsprechenden Anschriften und Kontaktpersonen,
- Messzeit, Messort, beteiligte Personen,

- eindeutige Nummerierung des Berichtes,
- eindeutige Bezeichnung der gemessenen Anlage

2.5.8.2 *Gegenstand der Messung*

Hier ist zu beschreiben, was der Hintergrund und Gegenstand der Messung war. Als grobe Orientierung können die im Abschnitt 2.1 angegebenen Kategorien dienen.

Darüber hinaus ist darzulegen, ob

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

2.5.8.3 *Daten der untersuchten Mobilfunk Sendeanlage*

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

Die Dokumentation der Sendeanlage sollte mit Fotos hinterlegt werden.

2.5.8.4 *Auswahl der Messpunkte*

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

2.5.8.5 *Verwendete Messgeräte*

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

2.5.8.6 *Eingesetztes Messverfahren*

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

- ob frequenzselektiv oder breitbandig oder codeselektiv gemessen wurde,

- ob eine Maximalwertermittlung am Messpunkt stattfand und wenn ja mit welchem Verfahren (z.B. Schwenkmethode).

2.5.8.7 Messergebnisse

Hier sind die Messergebnisse getrennt für jeden einzelnen Messpunkt anzugeben. Repräsentative Messplots können die Daten ergänzen (z.B. im Anhang). Im einzelnen sind zu dokumentieren:

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

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

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

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

2.5.8.8 Grenzwerte und Vergleich zu den Messwerten

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

2.5.8.9 Messunsicherheit

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

Die gesamte Messunsicherheit setzt sich aus zwei Beiträgen zusammen:

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

Die nachfolgenden Betrachtungen zur Berechnung der Messunsicherheit basieren auf dem „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“ [GUM], der hier als aktueller Stand der Technik verstanden wird. Relevant für die Ermittlung der Gesamtmessunsicherheit ist die sog. Ermittlungsmethode B, bei der nach folgenden Schritten vorgegangen wird:

In einem ersten Schritt werden alle Einzelkomponenten zusammengetragen, die durch einen Fehlerbeitrag zu einer Gesamtmessunsicherheit beitragen. Dieses können z.B. Toleranzen von Messgeräten (nach Herstellerangaben) sein. Für jede einzelne potentielle Fehlerkomponente wird deren Standardunsicherheit $u(x_i)$ berechnet. Dabei ist zu unterscheiden, ob die Fehlerkomponenten normal- (Gauss), rechteck- oder U-verteilt sind.

Bei einer Rechteckverteilung sind alle Messwerte innerhalb eines Bereiches e_+ bis e_- um den Mittelwert gleich wahrscheinlich; die Standardunsicherheit beträgt

$$u(x_i) = \frac{e_+ - e_-}{2\sqrt{3}}. \quad (2.5.19)$$

Bei Normalverteilung im Bereich $\pm e$ mit Vertrauensniveau 95 % ($k=2$) ist

$$u(x_i) = \frac{e}{2}, \quad (2.5.20)$$

bei U-förmiger Verteilungsfunktion hingegen

$$u(x_i) = \frac{e_+ - e_-}{2\sqrt{2}}. \quad (2.5.21)$$

Mit den Standardunsicherheiten der Einzelkomponenten kann die kombinierte Standardunsicherheit $u_c(y)$ der Messgröße y durch Bildung des geometrischen Mittelwertes berechnet werden. Wenn die Größe der Einzelkomponenten nicht der der Messgröße entspricht (z.B. Auswirkung einer Antennenfehlpositionierung auf die angezeigte Feldstärke), dann muss sie erst konvertiert werden durch

$$u_i(y) = c_i \cdot u(x_i) \quad (2.5.22)$$

mit dem Konvertierungsfaktor c_i . Die kann zum Beispiel durch partielle Ableitung der Messgröße nach der Einzelkomponente erfolgen.

Die kombinierte Standardunsicherheit für m Einzelkomponenten ist dann

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m u_i^2(y)} . \quad (2.5.23)$$

Diese Formel der Berechnung gilt für unkorrelierte Eingangskomponenten, was im allgemeinen vorausgesetzt werden kann.

Zur Angabe der erweiterten Messunsicherheit U wird die kombinierte Standardunsicherheit mit dem Erweiterungsfaktor k multipliziert. Der Erweiterungsfaktor bestimmt das Vertrauensniveau. Beim empfohlenen Vertrauensniveau von 95 % ist k=2.

$$U = k \cdot u_c(y) . \quad (2.5.24)$$

Dies bedeutet, dass mit 95 %iger Wahrscheinlichkeit der reale Wert der Messgröße im Bereich des angezeigten Messwertes $\pm U$ liegt.

Nach diesen Vorgaben sind entsprechende Messunsicherheitsbetrachtungen für die eingesetzten Messverfahren aufzustellen. Bei Breitbandsonden sind z.B. folgende Unsicherheitsbeiträge zu berücksichtigen [BUWAL 02]:

- Unsicherheit der Kalibrierung,
- Linearitätsabweichung,
- Frequenzgang,
- Isotropieabweichung,
- Modulationseinfluss,
- Temperaturabhängigkeit.

Bei frequenzselektiven Messungen sind außer dem Spektrumanalysator auch die Antenne und das Zuleitungskabel zu berücksichtigen. Da die Verhältnisse hier komplizierter als bei Breitbandsonden sind, wird im folgenden ein Beispiel einer typischen Messunsicherheitsberechnung für eine frequenzselektive Messung angegeben. Dabei treten folgende Einzelkomponenten auf:

Messgerät:

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

Antenne

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

Kabel:

Hier gilt das für die Antennen Gesagte.

Zusätzlich ergeben sich jedoch durch Anschluss des Kabels an Antenne und Spektrumanalysator Fehlanpassungen, die ebenfalls berücksichtigt werden müssen. Eine Beschreibung zum speziellen Vorgehen ist z.B. in [BUWAL 02] enthalten.

Für eine typische Messausrüstung (hier: Spektrumanalysator HP 8593EM, logarithmisch-periodische Antenne Schwarzbeck USLP 9142) kann beispielsweise folgendes Messunsicherheitsbudget nach Tabelle 2.5.5 aufgestellt werden:

In der Komponente „Antennentyp“ sind oben untersuchte Faktoren wie Einfluss des Messenden, inkorrekte Berücksichtigung aller Empfangsrichtungen und mögliche Unterschiede des Freifeldantennenfaktors in realen Umgebungen berücksichtigt. Diese Komponente taucht bei anderen Publikationen in diesem Themenbereich (z.B. [BUWAL 02, WUSCH 02]) nicht auf. Sie wird aber aufgrund der Diskussion im Abschnitt 2.5.3.1.2 für sinnvoll gehalten, sofern nicht nachgewiesen werden kann, dass die verwendete Antenne einerseits das gesamte Einfallswinkelspektrum vollständig erfasst und andererseits die Rückwirkungen des Messenden sowie von Raumwänden und Mobiliar auf die Antennenausgangsspannung vernachlässigbar sind. Hierfür werden 2 dB abgeschätzt.

Die Probennahme ist mit einem pauschalen Unsicherheitsbeitrag berücksichtigt, der sich aus den Erfahrungen von Abschnitt 2.5.6.6 sowie z.B. [BUWAL 02] begründet.

Die Angabe der Einflussfaktoren vor allem beim Spektrumanalysator bzw. Messempfänger erfolgt leider nicht bei allen Herstellern in gleicher Weise. Dementsprechend finden sich in anderen Veröffentlichungen (z.B. [BUWAL 02, WUSCH 02]) teilweise andere Bezeichnungen wie: Absolutfehler, Linearitätsfehler des Eingangssattenuators, Linearitätsfehler des ZF-Verstärkers und Linearitätsfehler der Anzeige. Außerdem ist es von Messgerät zu Messgerät unterschiedlich, ob ein Temperatureingang zusätzlich als Messunsicherheit zu berücksichtigen ist oder ob der Temperatureinfluss bereits in den Beiträgen der anderen Komponenten enthalten ist.

Bei der Aufstellung des Fehlerbudgets ist darauf zu achten, dass nicht die laut Kalibrierbericht tatsächlich gemessenen Abweichungen der Messgröße von der Normgröße, sondern die Spezifikationen laut Herstellerhandbuch verwendet werden.

Komponente	Einflussfaktor	Spezifizierte Unsicherheit [dB]	Verteilung	Divisor	Standardunsicherheit [dB]
Empfänger	Kompressionspunkt	0,5	Normal	2	0,25
Empfänger	Frequenzgang	1,5	Normal	2	0,75
Empfänger	Referenzlevel	0,6	Normal	2	0,30
Empfänger	Anzeigege nauigkeit	0,7	Normal	2	0,35
Empfänger	Modulationsabhängigkeit (geschätzt)	0,5	Rechteck	1,73	0,29
Empfänger	Ablesege nauigkeit	0,05	Rechteck	1,73	0,03
Kabel	Absolutkalibrierung	0,2	Normal	2	0,10
Kabel	Interpolation	0,1	Rechteck	1,73	0,06
Antenne	Absolutkalibrierung	1,5	Normal	2	0,75
Antenne	Interpolation	0,1	Rechteck	1,73	0,06
Fehlanpassung	Kabel-Empfänger	0,2	U-förmig	1,41	0,14
Fehlanpassung	Antenne-Kabel	0,4	U-förmig	1,41	0,28
Fehlanpassung	Antenne-Empfänger	0,3	U-förmig	1,41	0,21
Antennentyp	Umgebung	2	Normal	2	1
Probennahme	Reproduzierbarkeit	1,2	Normal	2	0,60
Kombinierte Standardunsicherheit					1,73
Erweiterte Messunsicherheit (k=2)					3,47

Tabelle 2.5.5 Beispiel für Messunsicherheitsbudget bei frequenzselektiven Messungen

Messunsicherheiten in dieser Größenordnung mögen auf dem ersten Blick sehr groß erscheinen. So bedeuten ± 3 dB z.B., dass der tatsächliche Wert im Bereich von 50 % bis 200 % (bezogen auf die Leistungsflussdichte) bzw. von 70 % bis 140 % bezogen auf die Feldstärke des angegebenen Messwertes liegen kann. Sie sind jedoch für Feldstärkemessungen im Hochfrequenzbereich typisch und können zwar durch modernere Messgeräte mit kleineren Unsicherheitsbeiträgen geringfügig minimiert, aber nicht signifikant verringert werden.

Nachdem die Messunsicherheit nach dieser Vorgehensweise bestimmt ist, ergibt sich die Frage, wie mit ihr weiter umzugehen ist. Hierzu gibt es zwei Varianten:

1. Die Messunsicherheit wird im Messbericht angegeben, jedoch nicht auf die Messergebnisse aufgeschlagen. Das Messergebnis wird als unter dem Grenzwert liegend betrachtet, wenn der reine Messwert unter dem Grenzwert liegt, wobei die gesamte Messunsicherheit eine vorgegebene Schwelle nicht übersteigen darf, die Messergebnisse also nicht „beliebig unsicher“ werden dürfen.
2. Die Messunsicherheit wird auf die Messergebnisse aufgeschlagen und es ergibt sich ein Beurteilungswert, der als Endergebnis in der Dokumentation angegeben wird. Der Grenzwert ist nur dann eingehalten, wenn Messwert + Messunsicherheit unterhalb des Grenzwertes sind.

Mit dieser Problematik wird derzeit recht unterschiedlich umgegangen: Variante 1 findet üblicherweise in der EMV Messtechnik Anwendung. Allerdings gibt es mit dem normierten SAR Messverfahren von Handys [EN 50360] auch Beispiele aus dem EMVU Messbereich. Außerdem wird dieses Verfahren aktuell verbindlich für Immissionsmessungen an Basisstationen in der Schweiz verwendet [BUWAL 02], obwohl in einem früheren Vorentwurf das Verfahren nach Variante 2 vorgeschlagen wurde [BUWAL 01]. Auch im geplanten Cenelec Standard prEN 50401 [prEN 50401] sollen die Bewertungsergebnisse direkt mit den Grenzwerten verglichen werden, was als ein Vorgehen nach Variante 1 interpretiert wird.

Die Hinweise zur Durchführung der 26. BImSchV [LAI 04] geben an, dass „die Einhaltung eines Grenzwertes ... nur dann gegeben [ist], wenn alle Messwerte zuzüglich der gesamten Messunsicherheit unterhalb des Grenzwertes liegen“. Ähnlich äußert sich die für berufliche Exposition relevante BGR B11 [BGR]. Dies heißt aber genau genommen nicht automatisch, dass alle gemessenen Werte um die Messunsicherheit vergrößert und als Endresultat angegeben werden müssen, sondern bezieht sich lediglich auf die Festlegung, wann ein Grenzwert eingehalten ist und wann nicht.

Sicherlich ist für die Beantwortung dieser Frage auch relevant, ob die sowohl bei der Festlegung der Basisgrenzwerte, als auch bei der Ableitung der Feldstärkegrenzwerte angesetzten Sicherheitsfaktoren bereits Unsicherheiten bei der Erfassung der Immissionen berücksichtigen. Hierzu war in den einschlägigen Dokumenten keine eindeutige Aussage zu finden.

Aus technischer Sicht handelt es sich bei der Messunsicherheit um eine Plus-Minus-Angabe. Es ist üblich, einen Messwert mit diesem Messunsicherheitsintervall anzugeben und nicht z.B. nur den Maximalwert des Intervalls, in dem sich der tatsächliche Wert bewegen kann. Ein genereller Aufschlag der Messunsicherheit auf das Messergebnis kann lediglich aus risikokommunikativen Aspekten erfolgen, sofern bei vorliegender, sensibler Problematik stets worst case Annahmen kommuniziert werden sollen. Spätestens hier wird jedoch die fachlich-technische Ebene dieser Fragestellung verlassen und eine politische Dimension erreicht. Die Untersuchungen und Empfehlungen des Auftragnehmers solle auf die fachlich-technische Ebene beschränkt bleiben.

Aus technischer Sicht wird hier dafür plädiert, die Messunsicherheiten zwar anzugeben, aber bei Unterschreitung einer Schwelle von z.B. ± 4 dB nicht auf die Messergebnisse aufzuschlagen. Dafür spricht auch die Tatsache, dass bei vorliegender Problematik eine Zahl von worst case Annahmen gemacht werden, die die *tatsächliche* Exposition und die dadurch im Menschen hervorgerufenen Wirkungen der elektromagnetischen Strahlung stark überschätzt:

1. Bei der Ableitung der Basisgrenzwerte sind bezüglich der (thermischen) Wirkungen elektromagnetischer Strahlung auf den Menschen Sicherheitsfaktoren berücksichtigt.
2. Bei der Ableitung der Feldstärkegrenzwerte aus den Basisgrenzwerten sind bezüglich der Orientierung des Menschen im elektromagnetischen Feldes worst case Annahmen angesetzt, die sicherstellen, dass bei Einhaltung der Feldstärkegrenzwerte immer auch die Basisgrenzwerte eingehalten werden (der Umkehrschluss gilt hier nicht!).
3. Bei der Messung werden insbesondere durch die Suche nach Orten stärkster Exposition im Raum sowie durch die Hochrechnung auf den maximalen Anlagenzustand worst case Szenarien angesetzt, die eine durchschnittliche raum- und zeitgemittelte Exposition im menschlichen Körper weit überschätzen.

2.5.8.10 Ergebnis

Das Endergebnis der Messung, d.h. eine Aussage bezüglich der auf maximale Anlagenauslastung hochgerechneten Messwerte und ihre Relation zu den Grenzwerten, ist kurz und prägnant darzustellen.

2.6 Katasteransätze

Im Zusammenhang mit den Immissionen durch Mobilfunk Basisstationen werden oftmals Überlegungen bezüglich einer messtechnischen Realisierung eines flächendeckenden Katasters geäußert. Hier soll, vergleichbar z.B. mit dem bestehenden Netz von Monitoren zur Überwachung der Luftreinheit, ein vergleichbares Netz von Messstellen errichtet werden, die über eine Zentralstelle miteinander verbunden sind und ihre Ergebnisse – für jedermann transparent – z.B. im Internet zur Verfügung stellen.

Vor allem folgende Faktoren sind es, die ein solches Monitoring attraktiv machen:

- Im Gegensatz zu den „zeitdiskreten“ Werten einer Momentanmessung oder einer Maximalangabe „lebt“ die Immissionslinie, d.h. der zeitliche Verlauf der aufgenommenen Immissionen. Auslastungsabhängige Schwankungen schlagen sich direkt auf den Verlauf der Immissionslinie nieder und sind sichtbar.
- Singuläre momentane Messwerte oder daraus „theoretisch extrapolierte“ Maximalwerte lassen sich oftmals schlechter vermitteln als kontinuierliche Messwerte. Ein Unterschreiten von Grenz- oder Richtwerten wird bei *kontinuierlich* ermittelten Verläufen u.U. leichter „geglaubt“, da die Messwerte quasi lückenlos auch diejenigen Zeitabschnitte abdecken, die bei den Augenblicksmessungen nicht erfasst werden. Bei Momentanwertmessungen bleibt bei vielen Betroffenen ein Gefühl der Unsicherheit, dass eventuelle Höchstwerte übersehen wurden, unbeschadet der Tatsache, dass eine *korrekte* Extrapolation der Momentanwerte auf maximale Anlagenauslastung die weitaus sicherere Methode der Ermittlung von maximalen Immissionen darstellt.
- Oftmals existieren bei Bürgern dahingehende Befürchtungen, dass ohne ihr Wissen Manipulationen, Veränderungen bzw. Erweiterungen an der Anlage vorgenommen werden, die zu einer Erhöhung der Immissionen im Vergleich zum ursprünglich gemessenen Wert führen. Diese ließen sich nur durch eine kontinuierliche Überwachung feststellen.

Leider ist die Idee eines kontinuierlichen Feldmonitorings, z.B. als Netz fest installierter Messpunkte mit zentraler Auswertung und Internetanbindung, bei vertretbarem Aufwand nur mit erheblichen Einschränkungen zu realisieren.

Grund dafür ist zum einen, dass aus Kostengründen als Messgeräte *Breitbandmessgeräte* verwendet werden müssen. Diese haben, wie bereits oben dargelegt, oftmals eine Empfindlichkeitsschwelle von etwa 1 V/m. Das bedeutet, dass die kontinuierlich aufgenommene Immissionslinie nur dann tatsächlich „lebt“, wenn die Immissionen am Messort über dieser Schwelle liegen. Je nach Hintergrund der Messpunktwahl können damit folgende Szenarien entstehen:

1. Als Messpunkte werden sog. Sensible Orte gewählt, d.h. Punkte innerhalb von Kindergärten, Schulen, Krankenhäusern o.ä. Gerade hier zeigt aber die messtechnische Erfahrung, dass diese Orte sehr oft zu den vergleichsweise gering exponierten gehören und deren Immissionen unter der Empfindlichkeitsschwelle des Messgerätes liegen. Hieraus folgt, dass als Immission über der Zeit nur das Rauschen des Messgerätes zu sehen ist, d.h. die Immissionslinie „lebt nicht“. Damit ist ein wesentlicher der oben aufgeführten Vorteile der Monitoringmethode nicht gegeben; die Akzeptanz der Messungen sinkt. Ein solches Monitoring-System ist beispielsweise an 15 Messpunkten in Katanien/Italien installiert; die Ergebnisse können über www.rfwatch.com abgerufen werden. Hier zeigt sich, dass an etwa 2/3 der Messstellen die Immissionslinie nicht lebt, sondern das Grundrauschen des Messgerätes zeigt.
2. Die Messpunkte werden an Orten bestimmt, an denen die Immission merklich größer als 1 V/m ist. Diese stimmen allerdings nur in wenigen Fällen mit denjenigen Orten überein, an denen ein kontinuierliches Monitoring seitens der am Monitoring Interessierten als sinnvoll erachtet wird. Damit geht das Monitoring an der eigentlichen Intention der Messungen vorbei.

Zum anderen ist, auch wenn Messpunkte mit für eine sichere Messgeräteanzeige genügend hoher Immission gefunden werden können, die Aussagekraft solcher Messungen beschränkt. Wie in [BOR 04] dargestellt, unterliegen Mobilfunk Immissionen sowohl einer großskaligen, als auch einer kleinskaligen örtlichen Variation. Das heißt, dass ein an einem festen Ort aufgenommener Wert nur für diesen festen Ort repräsentativ ist, aber nicht für seine Umgebung. In einigen Zentimetern Abstand kann der Immissionswert völlig anders sein. Dies ist ein grundsätzlicher Unterschied z.B. zu den Luftgüteparametern, die eine wesentlich geringere örtliche Variabilität aufweisen.

Hinzu kommt der bereits oben angesprochene, prinzipielle Nachteil von Breitbandmessgeräten – die fehlende Frequenzselektivität.

Die Kosten für ein solches Monitoring beinhalten Breitbandmessgeräte, Aufwendungen für Suche geeigneter Messpunkte, Installation der Geräte, Anbindung an eine Zentralstelle sowie Aufbau und Pflege eines geeigneten Internetportals. Aspekte wie Diebstahlschutz und Sicherung gegen Vandalismus sind ebenfalls zu beachten. Für ein Netz aus 10 Messstellen sind Kosten in der Größenordnung von 150.000 – 200.000 Euro nicht unrealistisch.

Bei Inkaufnahme bestimmter Einschränkungen bieten sich folgende Alternativen an:

1. Unter Umständen können einzelne Orte gefunden werden, die stark genug exponiert sind und trotzdem aus risikokommunikativer Sicht interessant für eine Langzeitmessung sind. An diesen Messpunkten können sequenziell Langzeitmessungen von z.B. 24 Stunden oder 7 Tagen durchgeführt werden. Solche Langzeitmessungen können wichtige Informationen über die zeitliche Variabilität der Immissionen von Mobilfunk Basisstationen liefern. Durch die sequenzielle Organisation der Messungen hält sich der gerätemäßige Aufwand in Grenzen. Die Einschränkungen hinsichtlich fehlender Frequenzselektivität, mangelnder Repräsentativität des speziellen Messpunktes für eine weiter ausgedehnte Region und die Notwendigkeit des Vorhandenseins solcher speziellen Messpunkte verbleiben jedoch.
2. Durch den Einsatz mittlerweile verfügbarer, frequenzselektiver Messgeräte mit I-sotropsonde und Softwaresteuerung lässt sich die Alternative 1 auf beliebige Messpunkte

ausdehnen. Ein solches Messgerät ist z.B. in [RS 04-2] beschrieben. Die Kosten für solche frequenzselektiven Messgeräte sind höher als für Breitbandmessgeräte, bieten aber den Vorteil einer höheren Empfindlichkeit und vorhandener Frequenzselektivität. Die Einschränkungen bezüglich mangelnder Repräsentativität des speziellen Messpunktes für eine weiter ausgedehnte Region verbleiben.

3. Unter Verzicht auf ein paralleles, automatisches Monitoring und auf die auslastungsabhängigen Schwankungen kann ein sequenzielles Kataster mit frequenzselektiven Geräten realisiert werden, in dem mit einem oder mehreren Messteams an einem mehr oder weniger regelmäßigen Gitter Kurzzeitmessungen durchgeführt werden können. Durch Anwendung von Maximierungstechniken (Schwenkmethode, Drehmethode) können zumindest die kleinskaligen örtlichen Schwankungen umgangen werden. In diese Klasse der Katastermessungen gliedern sich Projekte der bundesweiten EMVU Messreihen der RegTP [RegTP] ein, auch wenn hier die Beiträge einzelner Emittenten nicht separat ausgewiesen werden. Es wird ein Kompromiss bezüglich Aufwand und Präzision der Messung gesucht. Wie in der zugehörigen Messvorschrift [RegTP 03] angegeben ist, eignet sich das Verfahren zwar „nicht zur vollständigen Untersuchung von Senderstandorten im Rahmen des Standortbescheinigungsverfahrens“, ergibt aber trotzdem einen „typischen“ Immissionswert am Messort.

Ein weiteres Beispiel für diese Alternative sind Untersuchungen des IMST für das Landesumweltamt Essen [BOR 01] oder auch die länderspezifische Messkampagnen in Bayern und Baden-Württemberg, z.B. [BOCH 03-1 bis -3]. Hier wurde im Sinne eines Umweltmonitorings die aktuelle Immission am Messort ermittelt. Eine Aufgliederung in die Immissionsbeiträge der unterschiedlichen Verursacher wurde durchgeführt. Wie bei der Messaktion der RegTP fand aus Aufwandsgründen keine Hochrechnung auf den maximalen Anlagenzustand statt. Bei allen Messkampagnen wurde generell außerhalb von Wohnungen gemessen. Dadurch werden mit diesen Messreihen in der Regel keine Maximalimmissionen gefunden, die aufgrund der speziellen Abstrahlcharakteristik der Mobilfunkantennen in oberen Stockwerken von basisstationsnahen Wohnungen auftreten. Dadurch werden also keine maximalen Spannbreiten der Immission aufgezeigt, sondern *durchschnittliche* Immissionen ermittelt.

Der Aufwand für solche flächendeckenden, frequenzselektiven Messungen ist beträchtlich. Die Erfahrungen zeigen, dass sie am effektivsten mit einem Team aus zwei Personen durchgeführt werden kann. Je nach Maschenweite des Katastergitters können 5 bis 10 Messpunkte an einem Tag abgearbeitet werden, wobei nicht unerhebliche Aufwendungen für die Auswertung und Dokumentation hinzukommen. Außerdem spielen bei der Abschätzung der maximal möglichen Messpunkte pro Tag auch Witterungseinflüsse, z.B. Regen, eine Rolle.

Geht man für die weiteren überschlägigen Berechnungen vom sehr optimistischen Fall aus, dass pro Tag 10 Messpunkte inklusive Auswertung möglich sind, ist der Aufwand pro Messpunkt etwa 0,2 Manntage. Weiter wird angesetzt, dass die Bundesrepublik Deutschland eine Gesamtfläche von 357.000 km² hat und ein Mannjahr etwa 220 Manntage. Der Aufwand pro Messpunkt ist dann etwa 0,001 Mannjahre.

- Bei einem Gitterraster von 2 x 2 km (vergleichbar Baden-Württemberg) wären für ganz Deutschland 89.250 Messpunkte zu vermessen, was einem Aufwand von 90 Mannjahren entspricht.
- Wird das Raster auf 1 x 1 km verkleinert, sind für die 357.000 Messpunkte 357 Mannjahre erforderlich.
- Bei einem Abstand der Basisstationen in Innenstädten von wenigen Hundert Metern scheint selbst ein Raster von 1 x 1 km viel zu grob. Ein entsprechend angepasstes Raster von 100 x 100 m ergibt 35.700.000 Messpunkte mit einem Personalaufwand von 35.700 Mannjahren.

Diese Zahlen zeigen, dass ein flächendeckendes Kataster für Deutschland mit einem feinmaschigen Gitter einen Aufwand ergibt, der nicht mehr darstellbar ist. Die katastermäßige Erfassung von begrenzten Gebieten (Städte oder Bundesländer) ist unter Verwendung einer vergleichsweise groben Gitterweite mit den genannten Einschränkungen möglich. Damit werden in der Regel aber keine Maximalwerte, sondern eher Durchschnittswerte erfasst. Bei einem Gitter mit einer Maschenweite im Bereich von mehreren Hundert Metern kann die kleinskalige und großskalige örtliche Schwankung der Immissionen im direkten Umfeld der Basisstation allerdings nicht adäquat erfasst werden. Im Sinne eines „Umweltmonitorings“ haben diese Methoden jedoch durchaus ihre Berechtigung.

3 Berechnungsverfahren

3.1 Einleitung

Der zweite Teil des vorliegenden Abschlussberichtes konzentriert sich auf die Berechnungsverfahren. Basierend auf den verschiedenen derzeit verfügbaren Ausbreitungsmodellen, wurden kommerzielle Softwarepakete für jedes Verfahren (Freiraumausbreitung, Strahlenoptik, Feldtheoretisch, Hybrid) ausgesucht. In diesen Programmen stecken im allgemeinen Entwicklungsarbeiten von mehreren 10 Mannjahren. Ferner sind sie von vielen Anwendern evaluiert und die Bedienung ist gut dokumentiert.

Die Programme werden im Hinblick auf verschiedene Kriterien hin analysiert (Modellbildung, Grenzwertüberprüfung, Rechenaufwand usw.). Spezielle Untersuchungen zur Optimierung der Modellierung der Mobilfunkantennen werden durchgeführt und auf die Anwendung in den Programmen getestet. Darüber hinaus werden Berechnungen an typischen Szenarien durchgeführt und mit Messungen verglichen, um eine Aussage über die Genauigkeit der Vorhersage für die Exposition in der Nähe von Mobilfunkbasisstationen treffen zu können.

Abschließend erfolgt eine Beurteilung der Tauglichkeit der einzelnen Programme und eine Diskussion bezüglich der Einsatzfähigkeit zur Erstellung eines flächendeckenden Katasters.

3.2 Wellenausbreitungsmodelle

Wie bereits im Zwischenbericht zu vorliegendem Forschungsvorhaben „Literaturstudie Mess- und Berechnungsverfahren Mobilfunk“ [BOR 02-1] detailliert beschrieben, werden Funkwellen in realem Gelände auf unterschiedliche Art und Weise beeinflusst. Diese Ausbreitungsmechanismen sind die folgenden:

- **Abschattung:** Wenn die Verbindungslinie zwischen Sender und Empfänger durch ein Hindernis unterbrochen wird, erreicht die elektromagnetische Energie die Bereiche im Funkschatten eines Hindernisses nur indirekt, z.B. über Reflexionen an anderen Hindernissen.
- **Beugung:** Trifft eine Funkwelle auf eine scharfe Kante (z.B. von Hauswänden oder –dächern) wird sie um die Kante herum gebeugt, d.h. die Welle ändert ihre Richtung und erreicht Bereiche, welche ohne Kantenbeugung vom Hindernis abgeschattet sind.
- **Dämpfung:** Trifft eine Funkwelle auf ein Hindernis, welches für elektromagnetische Strahlung nur teilweise durchlässig ist, wird sie gedämpft. 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:** Trifft eine Funkwelle auf ein glattes Hindernis, welches sehr groß gegenüber ihrer Wellenlänge ist (z.B. Häuserwände), wird sie reflektiert. Der Reflexionsgrad ist

hierbei abhängig von den elektrischen Materialeigenschaften, der Oberflächenrauigkeit des Hindernisses und dem Einfallswinkel der Funkwelle.

- **Streuung:** Trifft eine Funkwelle auf ein Hindernis, welches kleiner als oder vergleichbar groß mit ihrer Wellenlänge ist (z.B. Laub, Laternenpfähle, Verkehrsschilder), wird sie gestreut. Wellen werden auch an rauen bzw. ungleichmäßigen Oberflächen gestreut. Die Streuung kann ähnlich betrachtet werden wie die Reflexion, mit der Ausnahme, 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.

Es existieren verschiedene Modelle, diese Ausbreitungsmechanismen mit mathematischen Methoden zu beschreiben, und somit eine Berechnung mit dem Computer zu ermöglichen. In dieser Studie wird hierbei der Fokus auf die analytischen Modelle gelegt, da empirische und semi-empirische Rechenmodelle lediglich eine sehr eingeschränkte Aussage hinsichtlich der zu erwartenden Feldstärken liefern. Ferner sind sie zur Beschreibung des Umfeldes des Senders und aufgrund der Mittelwertangabe für die Immission insbesondere auch zur Grenzwertüberprüfung nicht geeignet.

Die analytischen Verfahren können grundsätzlich in strahlenoptische und feldtheoretische Modelle unterschieden werden. Im folgenden werden diese Modelle kurz beschrieben. Für detailliertere Informationen sei wieder der Zwischenbericht zu nennen [BOR 02-1].

3.2.1 Strahlenoptische Ausbreitungsmodelle

Eine typische Ausbreitungssituation, die aus einer Kombination aller wichtigen Ausbreitungsmechanismen besteht, ist in Bild 3.2.1 zu sehen.

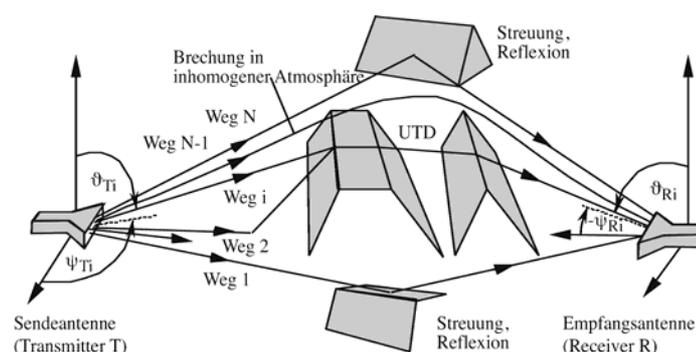


Bild 3.2.1: Mehrwegeausbreitung und Deutung einzelner Übertragungswege als Strahlenbahnen

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 sehr gut zu einer konsistenten Beschreibung der Mehrwegeausbreitung zwischen Sende- und Empfangsantenne eignen, werden als strahlenoptische Modelle bezeichnet. Die Analyse der Wellenausbreitung mit einem derartigen Programm unterteilt sich

in drei wesentliche Arbeitsschritte. Zunächst werden alle relevanten Ausbreitungspfade in der zu berechnenden Umgebung, die aus der Geometrie und den elektrischen Materialparametern aller Objekte besteht, gesucht. Im Anschluss an diese Strahlensuche steht die Berechnung des Übertragungsverhaltens aller Pfade, woran sich die Berechnung der Empfangsleistung unter Verwendung dieser Parameter anknüpft.

3.2.2 Feldtheoretische Modellierung

Die feldtheoretischen Berechnungsverfahren basieren auf der direkten numerischen Lösung der Maxwell'schen Gleichungen mit Hilfe von Integral- oder Differentialgleichungssystemen. Als wichtigste Varianten sind hier die *Finite Element Methode* (FEM), die *Finite Differenzen Methode* (FDM), die *Finite Differenzen im Zeitbereich* (Finite Difference Time Domain, FDTD) und die *Integralgleichungsmethode* (IE) zu nennen.

Eine Verwendung für die Berechnungen der Wellenausbreitung in Gebäuden oder sogar Städten benötigt immens viel Rechenleistung und Speicherplatz, da der gesamte Simulationsraum auf mindestens 1/10 der Wellenlänge diskretisiert werden muss.

3.2.3 Hybridmethoden

Werden zwei oder mehr Methoden zu einem neuen Modell kombiniert entsteht eine sogenannte Hybridmethode. Hierbei sollen Nachteile einer Methode durch die Vorteile einer anderen ausgeglichen werden.

So lässt sich z.B. zuerst FDTD im Nahbereich (einige Wellenlängen) um die Antenne einsetzen, um ein effektives Strahlungsdiagramm unter Berücksichtigung der Montageumgebung zu berechnen, und anschließend ein strahlenoptisches Modell anwenden, um die „großen“ Strecken bis zum Beobachtungsgebiet zu überbrücken, um schließlich wieder mittels FDTD die kleinräumige Struktur im Beobachtungsgebiet (wenige Wellenlängen) zu berechnen.

3.2.4 Fazit

In [BOR 02-1] wurde herausgearbeitet, dass innerhalb der analytischen Verfahren die strahlenoptischen Verfahren vor allem bezüglich des anwendbaren Entfernungsbereiches, des Anwendungsbereiches, der Bedienungsfreundlichkeit, der Eingabedetailliertheit und des Rechenaufwandes Vorteile gegenüber den feldtheoretischen Verfahren haben. Die Vorteile der feldtheoretischen Verfahren auf der anderen Seite liegen hingegen in den Bereichen Genauigkeit und Auflösung. Hybridverfahren können die Vorteile beider analytischen Hauptverfahren kombinieren.

Deswegen wurde für diese Studie aus jeder der oben beschriebenen Gruppen ein auf dem jeweiligen Verfahren basierendes Softwarepaket ausgewählt, um zu überprüfen, in wie weit diese theoretischen Überlegungen mit der Praxis übereinstimmen.

3.3 Verwendete Software

Im folgenden Kapitel werden die kommerziellen Softwarepakete beschrieben, die im Rahmen dieser Studie auf ihre Eignung zur Ermittlung der Exposition der Bevölkerung in der Umgebung von Mobilfunk Basisstationen untersucht wurden. Bei der Auswahl der Programme wurde darauf geachtet, dass sowohl strahlenoptische, feldtheoretische und Hybridverfahren Verwendung finden. Da für die speziell hier zu untersuchende Aufgabenstellung eine Vielzahl von auf Strahlenoptik basierenden Programmen existiert, wurden aus diesem Bereich drei Softwarepakete ausgewählt. Die in dieser Studie angewendeten Programme werden nach unserer Recherche am meisten verwendet. Sie sind kommerziell zu erwerben und verfügen über einen hohen Bekanntheitsgrad. So wurde zum Beispiel das Programm EFC-400 in [BMBF 04] und Quickplan in [BAK 02] eingesetzt. In der folgenden Tabelle sind die untersuchten Programme zusammengefasst.

Programm	Verfahren	Methode	Hersteller	Internet
EFC-400	Freiraumausbreitung mit Gebäudedämpfung		FGEU Berlin	www.fgeu.de
EMF-Visual	strahlenoptisch		Antennessa	www.antennessa.com
Wireless Insite	strahlenoptisch		Remcom	www.remcom.com
Empire	feldtheoretisch	FDTD	IMST	www.imst.de
Feko	Hybrid	Momentenmethode, UTD, Geometrische Optik	EM Software & Systems	www.Feko.co.za
Quickplan	strahlenoptisch		TeS	www.t-e-s.it

Tabelle 3.3.1: Übersicht über die verwendeten Softwarepakete

Für die einzelnen Programme wurden die relevanten Informationen über Voraussetzungen für die Hardware und das jeweilige Verfahren aus den Handbüchern extrahiert, die im folgenden beschrieben werden. Alle vorgestellten Softwarepakete können mit gängigen auf „Windows“ basierenden Betriebssystemen betrieben werden. Für Empire und Feko sind auch Installationen unter Linux möglich. Darüber hinaus wurden die Softwarepakete im Hinblick auf zu beachtende Details bei der Anwendung (z.B. Eingabe der Simulationsparameter) analysiert. Die hierbei erhaltenen Unterschiede zwischen den einzelnen Programmen und daraus abgeleitete generelle Aussagen im Umgang mit derartigen Softwareprogrammen werden in Abschnitt 3.6 „Anwendung der Softwarepakete auf reale Konfigurationen“ vorgestellt.

3.3.1 EFC-400 Telekommunikation

Seinen Ursprung hat das Programm EFC-400 in der Berechnung von niederfrequenten magnetischen und elektrischen Feldern von Leitern und wurde von der Forschungsgesellschaft für Energie und Umwelttechnologie mbH [EFC 04] entwickelt. In der neusten Entwicklungsstufe und der in dieser Studie verwendeten Version 5.04 (Build 2287) ist der Teil EFC-400 Telekommunikation integriert, der auch die Berechnung hochfrequenter Feldstärken und Leistungsflussdichten ermöglicht.

Das Berechnungsverfahren ist die Freiraumausbreitung ohne Informationen bezüglich der Phase. Der Gebäudeeinfluss kann über die Angabe eines globalen Dämpfungsfaktors berücksichtigt werden. Reflexionen am Erdboden können über einen prozentualen Anteil angegeben werden. 100% entspricht hierbei einer Verdopplung der Leistungsflussdichte. Vorgegebene Werte für typische Reflexionskoeffizienten (Ackerland, Beton usw.) sind nicht integriert. Die folgenden Voraussetzungen sind angegeben, um einen optimalen Ablauf des Programms zu gewährleisten:

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

3.3.2 EMF-Visual

Das Softwarepaket EMF-Visual der Firma Antennessa [EMF 04] basiert auf dem strahlenoptischen Modell. Es ermöglicht einen einfachen 3D Aufbau von Umgebung und Funkanlage. Die Funkantennen werden aus sogenannten Unit-Cells zusammengesetzt, was nach Herstellerangaben auch eine Simulation im Nahfeldbereich der Antenne ermöglicht. Einer Unit-Cell kann der Anwender durch Angabe von horizontaler Strahlbreite und Front-to-Back Verhältnis ein Abstrahlverhalten (z.B. das eines Dipols) zuweisen. Durch die Überlagerung der Abstrahlcharakteristiken der einzelnen Unit-Cells entsteht das gesamte Strahlungsdiagramm. In dieser Studie wurde EMF-Visual in der Version 2.0 verwendet, wofür folgende Voraussetzungen angegeben sind:

- Prozessor: Pentium III 500 MHz
- Freier Arbeitsspeicher: 128 MB
- Grafikkarte: Open GL Beschleunigung
- Freier Festplattenplatz: 50 MB
- Betriebssystem: Microsoft Windows
- Kosten für eine Einzellizenz: 15.000,- €

3.3.3 Wireless Insite

Die Software Wireless Insite wurde von der Firma Remcom [WI 04] entwickelt und basiert auch auf dem strahlenoptischen Wellenausbreitungsmodell. Es ist möglich, eine dreidimensionale Simulationsumgebung zu modellieren. Wireless Insite ist darüber hinaus auch für

Inhaus-Berechnungen geeignet. Als Voraussetzungen sind vom Hersteller folgende Parameter angegeben:

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

3.3.4 Quickplan

QuickPlan ist eine Planungssoftware für terrestrische zellulare Netzwerke und wurde von TeS Teleinformatica e Sistemi s.r.l [QP 04] entwickelt. Die in dieser Studie verwendete Version 1.3.6 basiert auf dem strahlenoptischen Modell.

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

Außerdem ist noch an zu merken, dass auch mehrere Simulationen von unterschiedlichen Senderstandorten gleichzeitig durchgeführt werden können ohne das Programm dafür nochmals starten zu müssen.

Als Voraussetzungen sind folgende Angaben gemacht:

- Prozessor: Pentium II 233 MHz
- Arbeitsspeicher: 384 MB
- Grafikkarte: Auflösung mit mindestens 16 Mio. Farben
- Freier Festplattenplatz: 150 MB
- Betriebssystem: Microsoft Windows
- Kosten für eine Einzellizenz: 5.000,- € (Version 1.3.6)
- Kosten für eine Einzellizenz: 12.500,- € (ab Version 2)

3.3.5 Empire

Die Software EMPIRE [EMP 04] von der Firma IMST GmbH ist ein elektromagnetisches Feldsimulationsprogramm und basiert auf der FDTD - Methode, die eine Variante des feld-

theoretischen Modells ist. So werden die in Raum und Zeit diskretisierten Maxwell'schen Gleichungen direkt gelöst. Für diese Studie wurde EMPIRE in der Version 4.01 verwendet.

Mit nur einer Simulation ist es möglich für einen vom Anwender definierten Frequenzbereich Streuparameter, Strahlungsdiagramme, elektrische und magnetische Felder usw. zu berechnen. Für die Hardware sind folgende Voraussetzungen angegeben:

- Prozessor: Pentium 166 MHz
- Freier Arbeitsspeicher: 64 MB
- Grafikkarte: Grafikprozessor mit OpenGL- Unterstützung
- Freier Festplattenplatz: 400 Mbyte
- Betriebssystem: Windows, Linux
- Kosten für eine Einzellizenz: 10.000,- €

3.3.6 Feko

Feko basiert auf der Momentenmethode (MoM). Diese ist eine Variante der feldtheoretischen Modellierung. Hierbei werden die elektrischen Oberflächenströme auf leitenden Oberflächen bzw. elektrische und magnetische Oberflächenströme auf dielektrischen Materialien berechnet. Ist diese Stromverteilung einmal bekannt, können andere Parameter wie z.B. das Nahfeld, das Fernfeld, Eingangsimpedanz von Antennen usw. bestimmt werden.

Die Integration von asymptotischen Verfahren für hohe Frequenzen wie die Physikalische Optik (PO) und die allgemeine Beugungstheorie (UTD) machen FEKO zu einem Hybridprogramm [FEK 04]. Als Voraussetzungen werden vom Hersteller folgende Parameter angegeben:

- Prozessor: Intel oder AMD
- Arbeitsspeicher: ist von der Anzahl der zu lösenden Gleichungen und damit vom Problem abhängig
- Grafik: GUI nur für Windows verfügbar
- Betriebssystem: Microsoft Windows, Linux
- Kosten für eine Einzellizenz: 17.000,- €

3.4 Detailbetrachtung der Mobilfunkantennen

In diesem Kapitel werden die Antennen der Mobilfunkbasisstationen detailliert analysiert. Sie sind das Element, durch das die Verteilung der Immission seitens der Basisstation bestimmt wird. Um Fehler in der Simulation direkt an diesem Punkt schon vermeiden zu können, ist es

daher wichtig, die genaue Abstrahlcharakteristik und ihre Einflussfaktoren zu kennen. Auf dieser Grundlage ist es auch möglich, Vereinfachungen bezüglich einer Berechnung zu finden.

Daher wird die Abhängigkeit der Abstrahlcharakteristik von folgenden Einflussfaktoren untersucht:

- Elektrischer Downtilt
- Frequenzabhängigkeit
- Montageumgebung

Die Abstrahlcharakteristiken von einer Vielzahl von verwendeten Antennen werden von den Antennenherstellern zur Verfügung gestellt. Diese beinhalten jedoch nicht das dreidimensionale Abstrahlverhalten, sondern nur den horizontalen und vertikalen Schnitt.

Von der National Spectrum Managers Association wird hierfür ein standardisiertes Datenformat vorgeschlagen [NSMA 99]. Dennoch werden unterschiedliche Darstellungsarten benutzt.

Der Antennenhersteller „RFS –Radio Frequency Systems“ verwendet das eigene Darstellungsformat „Celplot“. Hierin sind der vertikale und der horizontale Schnitt jeweils in einer eigenen Datei mit verschiedenen Parametern (Name, Gewinn, Strahlbreite usw.) und der in 1°-Schritten auf den maximalen Gewinn normierten Amplitude abgespeichert.

Bei den in dieser Studie untersuchten Basisstationsstandorten sind Antennen der Firma „Kathrein“ installiert. Sie stellt den horizontalen und vertikalen Schnitt ihrer Antennenabstrahlcharakteristiken in einer Datei in Form des aus dem Programm Planet hervorgegangenen MSI-Formats zur Verfügung. Hierin ist für jeden Winkel die dazugehörige auf den maximalen Gewinn des Schnitts normierte Amplitude abgespeichert. Ferner stehen Informationen zu Antennenname, Betriebsfrequenz, Gewinn, Downtilt und eine Kommentarzeile zur Verfügung. Zu beachten ist, dass 0° der Hauptstrahlrichtung entsprechen und die Winkelangaben im Uhrzeigersinn zu verstehen sind.

3.4.1 Abhängigkeit der Abstrahlcharakteristik vom Elektrischen Downtilt

Es gibt zwei verschiedene Arten des Downtilts einer Mobilfunkantenne. Mit mechanischem Downtilt ist hierbei eine Abwärtsneigung der Mobilfunkantenne und daraus resultierend auch der Hauptkeule durch eine schräge Montage gemeint. Auf der anderen Seite gibt es den elektrischen Downtilt. Hierbei wird die Abwärtsneigung der Hauptkeule durch die elektrische Ansteuerung erzielt.

Motivation für diese Untersuchung ist, ob es für eine Berechnung als Vereinfachung sinnvoll ist, generell alle vorhandenen Downtilts als mechanisch anzusehen. Auf diese Weise könnte die Abstrahlcharakteristik für einen elektrischen Downtilt von 0° einmal in das Programm eingebunden und für den jeweiligen Anwendungsfall einfach mechanisch gedreht werden.

In den folgenden zwei Bildern sind nur Veranschaulichung der vertikale und der horizontale Schnitt einer typischen Abstrahlcharakteristik zu sehen. Der grüne Kasten symbolisiert hierbei die Orientierung der Basisstationsantenne.

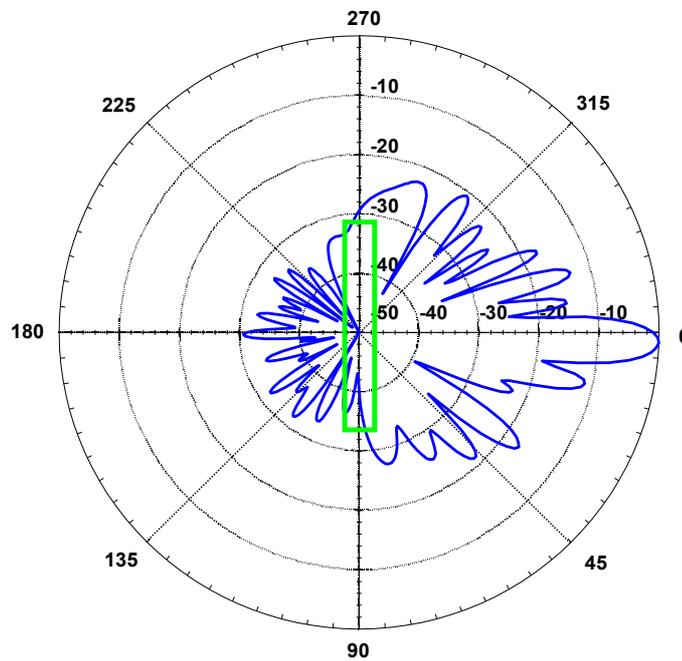


Bild 3.4.1: Vertikaler Schnitt der dreidimensionalen Abstrahlcharakteristik der Antenne K 735 147 (Elevationsdiagramm)

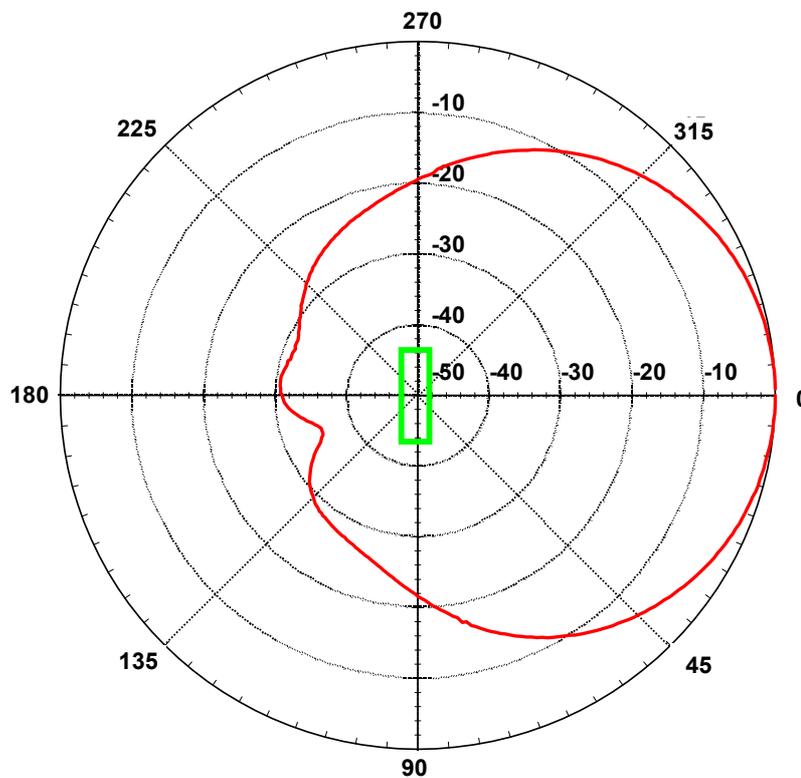


Bild 3.4.2: Horizontaler Schnitt der dreidimensionalen Abstrahlcharakteristik der Antenne K 735 147 (Azimutdiagramm)

Um die Abhängigkeit vom elektrischen Downtilt näher untersuchen zu können, werden die vertikalen Abstrahlcharakteristiken einer Mobilfunkantenne bei verschiedenen elektrischen Downtilts im Winkelbereich von -90° bis $+90^\circ$ miteinander verglichen. Dies ist der Bereich, in dem die Hauptkeule liegt (vgl. Bild 3.4.1). Für die Abstrahldiagramme wurde auf Herstellerdaten zurückgegriffen.

Zu beachten ist, dass die Diagramme um den jeweiligen Wert des elektrischen Downtilts in der Art gedreht sind, dass die Hauptstrahlrichtung immer in die 0° -Richtung zeigt. So kann ein möglicher Unterschied der Abstrahlcharakteristik zwischen mechanischem und elektrischem Downtilt gezeigt werden.

Im folgenden wird dies für jeweils eine Antenne aus dem GSM 900 , GSM 1800 und UMTS System untersucht.

In Bild 3.4.3 ist die vertikale Abstrahlcharakteristik der Mobilfunkantenne K 739 665 der Firma Kathrein bei einer Frequenz von 947 MHz und bei 3 verschiedenen elektrischen Downtilts dargestellt. Dieser kann zwischen 0° und 10° eingestellt werden. Zu beachten ist hierbei, dass eine andere Darstellungsart benutzt wird. So ist nur der vordere Bereich, in dem die Hauptstrahlrichtung liegt, zu sehen. Die hier getroffenen Aussagen gelten aber analog für den rückwärtigen Bereich der Abstrahlcharakteristik.

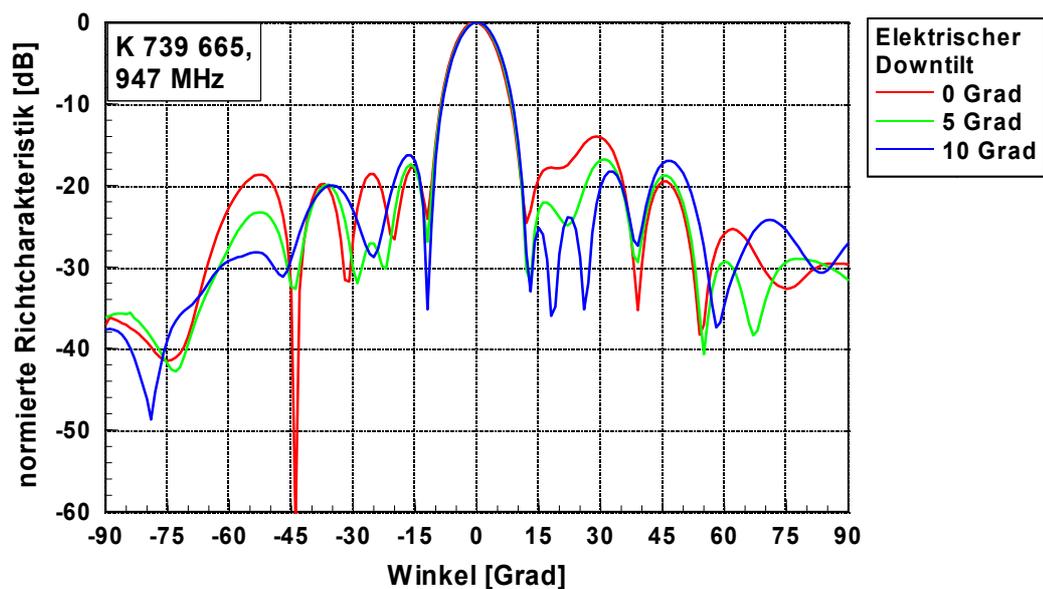


Bild 3.4.3: Vergleich der auf die Hauptstrahlrichtung normierten Abstrahlcharakteristik der Mobilfunkantenne K 739 665 bei einer Frequenz von 947 MHz und verschiedenen elektrischen Downtilts.

Da die Intensität in Hauptstrahlrichtung nach [KAT] bezüglich des elektrischen Downtilts konstant ist, können die Abstrahldiagramme direkt miteinander verglichen werden. Es ist ein deutlicher Unterschied der Richtcharakteristik im Bereich der Nebenzipfel zu erkennen. Diese ändern nicht nur ihre Lage, sondern sind auch in der Amplitude unterschiedlich. Es hat sich bei weiteren Untersuchungen gezeigt, dass dieses Verhalten auch bei anderen Antennen, die im GSM 900 System betrieben werden, in gleicher Weise auftritt.

Im folgenden wird die Mobilfunkantenne K 742 234, die im Frequenzbereich für das GSM 1800 System eingesetzt wird, in analoger Weise behandelt (siehe Bild 3.4.4).

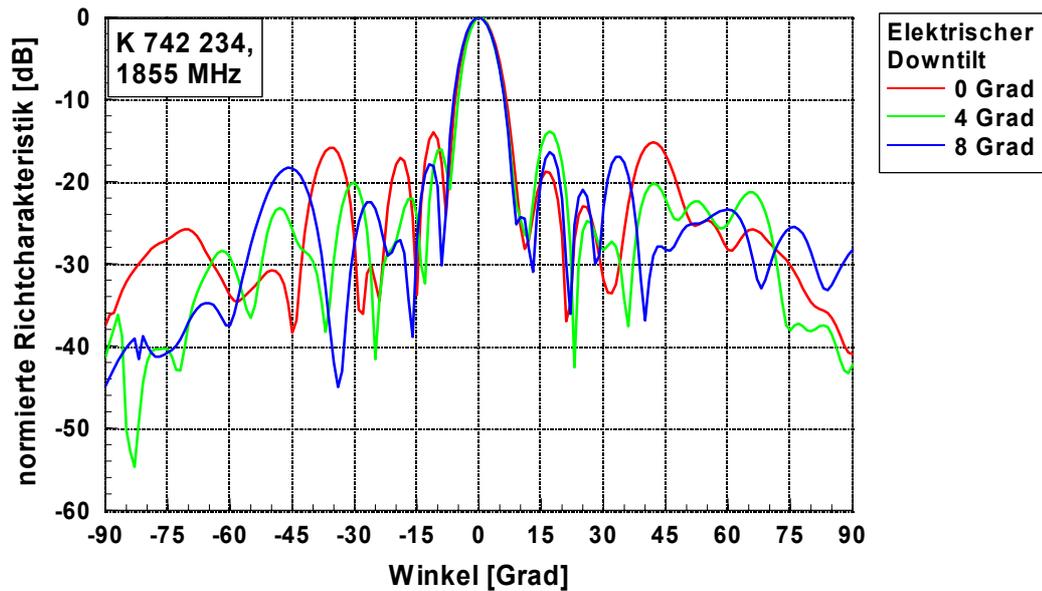


Bild 3.4.4: Vergleich der auf die Hauptstrahlrichtung normierten Abstrahlcharakteristik der Mobilfunkantenne K 742 234 bei einer Frequenz von 1855 MHz und verschiedenen elektrischen Downtilts.

Wie bereits bei der Antenne für das GSM 900 System ist auch hier eine deutliche Variation der Abstrahlcharakteristik bezüglich Lage und Amplitude der Nebenzipfel in Abhängigkeit des elektrischen Downtilts zu erkennen.

Als nächstes folgt die Betrachtung der Mobilfunkantenne K 742 212 für das UMTS System (Bild 3.4.5).

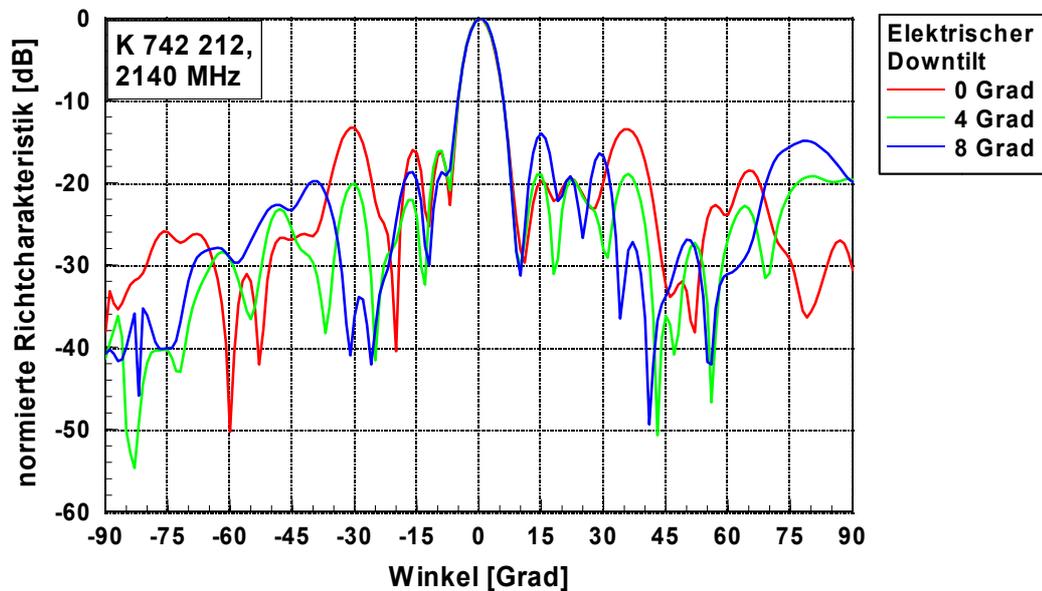


Bild 3.4.5: Vergleich der auf die Hauptstrahlrichtung normierten Abstrahlcharakteristik der Mobilfunkantenne K 742 212 bei einer Frequenz von 2140 MHz und verschiedenen elektrischen Downtilts.

Analog zu den vorher betrachteten Antennen variieren auch bei der Antenne für das UMTS System die Lage und Amplitude der Nebenzipfel in Abhängigkeit des elektrischen Downtilts sehr stark.

Als erstes offensichtliches Fazit kann an dieser Stelle festgehalten werden, dass bezüglich einer numerischen Simulation auf jeden Fall das Abstrahldiagramm mit dem konkreten elektrischen Downtilt verwendet werden sollte. Die Möglichkeit, das 0° -Abstrahldiagramm zu verwenden und dieses um den elektrischen Downtilt Winkel mechanisch zu drehen, liefert besonders im Bereich der Nebenzipfel fehlerhafte Ergebnisse. Diese können sich sowohl in einer Überschätzung als auch in einer Unterschätzung der vorhandenen Immission niederschlagen, was somit für die Aussage bezüglich einer Grenzwertbetrachtung ungeeignet ist.

Die Abstrahlcharakteristiken aus den Herstellerdaten sind nicht bei jedem elektrischen Downtilt verfügbar. So sind bei der Firma Kathrein zum Beispiel die Diagramme im Abstand 2° bezüglich des Neigungswinkels gegeben. Zusätzlich ist es mittlerweile im Betrieb von Mobilfunkbasisstationen möglich, den elektrischen Downtilt fernsteuerbar zu verändern. Diese Vereinfachung hat im Rahmen der Netzplanung und somit auch für die Immissionsprognose die Konsequenz, dass der elektrische Downtilt eine variable Größe darstellt. Eine Simulation mit einem festen Neigungswinkel würde demnach die Situation nur zu einem ganz bestimmten Zeitpunkt wieder spiegeln und hätte keine längerfristige Aussagekraft.

Damit die Fehler hinsichtlich einer Unterschätzung der tatsächlichen Immission in einer Simulation bezüglich des elektrischen Downtilts minimiert werden können und zudem die Ergebnisse eine längere Gültigkeitsdauer aufweisen, wird folgende Vereinfachung vorgeschlagen. Es wird über alle Abstrahldiagramme mit den verschiedenen für den konkreten Basisstationsstandort (siehe Abschnitt 3.6.1.5) beantragten elektrischen Downtilts eine Hüllkurve gelegt und auf diese Weise eine neue Abstrahlcharakteristik erzeugt, die alle Zustände bezüglich der elektrischen Abwärtsneigung beinhaltet. Diese Vorgehensweise ist in Bild 3.4.6 veranschaulicht.

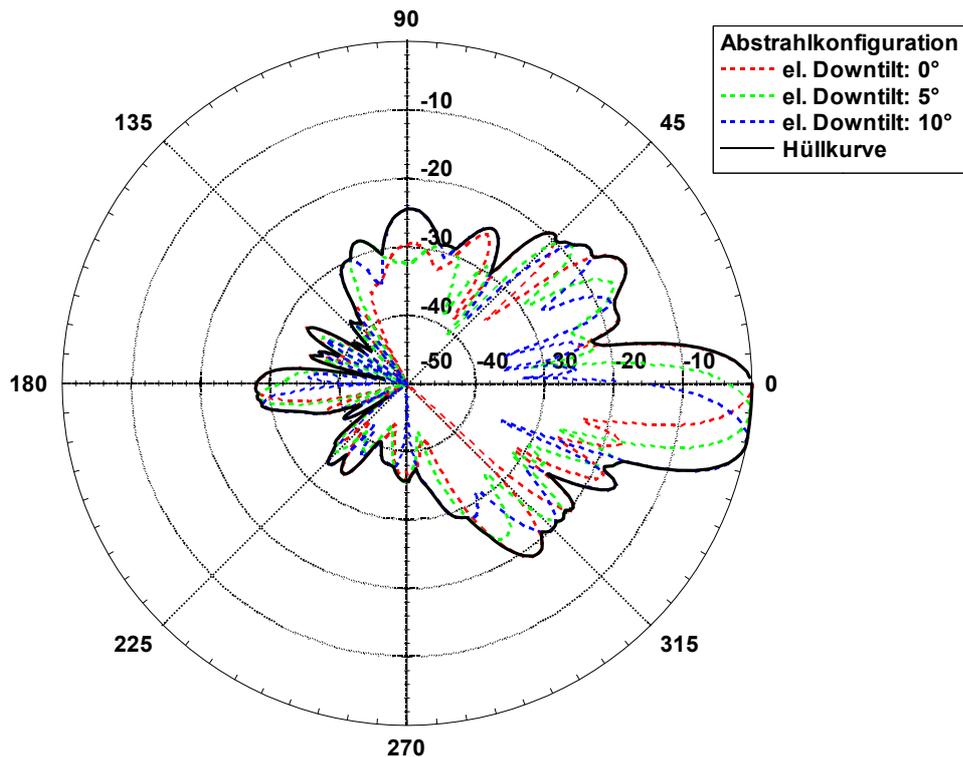


Bild 3.4.6: Synthese eines neuen Antennendiagramms, das alle Betriebszustände bezüglich des elektrischen Downtilts beinhaltet

3.4.2 Abhängigkeit der Abstrahlcharakteristik von der Frequenz

Im folgenden wird die Abhängigkeit der Abstrahlcharakteristik von der Frequenz näher untersucht. Wie oben bereits erwähnt, liegen die Abstrahlcharakteristiken der Mobilfunkantennen der Firma Kathrein im MSI-Format vor. Die vertikalen und horizontalen Schnitte sind hierbei bei bestimmten Frequenzen aufgenommen und decken somit nicht die kompletten Downlink - Frequenzbereiche der Mobilfunksysteme ab. Mit den Herstellerangaben ist demnach keine Beurteilung über die Abhängigkeit der Abstrahlcharakteristik von der Frequenz möglich.

Um hier dennoch eine Aussage treffen zu können, wurde beispielhaft die Abstrahlcharakteristik der Mobilfunksendeantenne K 742 212 der Firma Kathrein in Abhängigkeit der Frequenz gemessen. Diese Messung fand in der Antennenmesskammer der Firma IMST GmbH statt. Da die Antenne sowohl im GSM 1800 als auch im UMTS System eingesetzt wird, werden diese beiden Bereiche getrennt voneinander untersucht.

Die Messung wurde hierbei jeweils für die Bestimmung der vertikalen als auch horizontalen Abstrahlcharakteristik separat durchgeführt. In Bild 3.4.7 ist der schematische Aufbau für die Messung des horizontalen Schnitts der Basisstationsantenne dargestellt.

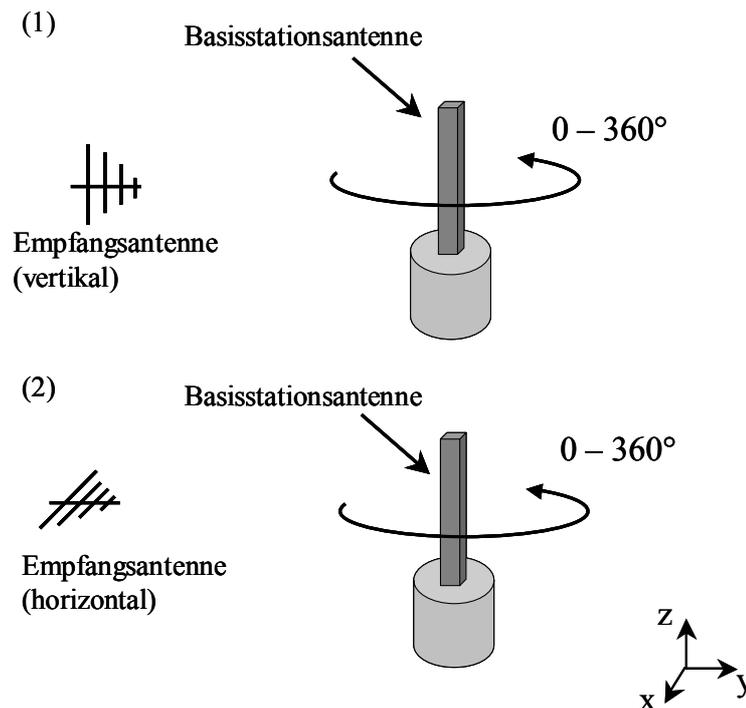


Bild 3.4.7: Schematische Darstellung des Messaufbaus zur Bestimmung der horizontalen Abstrahlcharakteristik einer Mobilfunkantenne
 (1) Empfangsantenne vertikal
 (2) Empfangsantenne horizontal

Abschließend wurde aus den Messergebnissen der beiden Polarisationen der Empfangsantenne (horizontal und vertikal) der resultierende horizontale Schnitt der Abstrahlcharakteristik bestimmt.

Analog hierzu wurde die Messung für den vertikalen Schnitt durchgeführt. Einziger Unterschied ist die Ausrichtung der Basisstationsantenne, die um 90° um die y -Achse gedreht wurde.

Zu beachten ist bei diesem Verfahren, dass die Messung aufgrund der Größe der Antennenmesskammer nicht im Fernfeld (vgl. Formel 2.5.6) der Antenne durchgeführt werden konnte. Um hieraus resultierende Unterschiede aufzeigen zu können, wird der gemessene vertikale Schnitt des Antennendiagramms mit dem aus den Herstellerdaten (MSI-Datei) bei 1855 MHz verglichen (vgl. hierzu Bild 3.4.8). Es ist wie in den Darstellungen zuvor, der Bereich von -90° bis $+90^\circ$ zu sehen, in dem auch die Hauptstrahlrichtung liegt. Für den rückwärtigen Bereich sind die Ergebnisse in gleicher Weise gültig. Ferner ist an dieser Stelle festzuhalten, dass die Ergebnisse aus dem horizontalen Schnitt aufgrund von geringen Unterschieden zu vernachlässigen sind und somit der Schwerpunkt nur auf den vertikalen Schnitt gelegt wird.

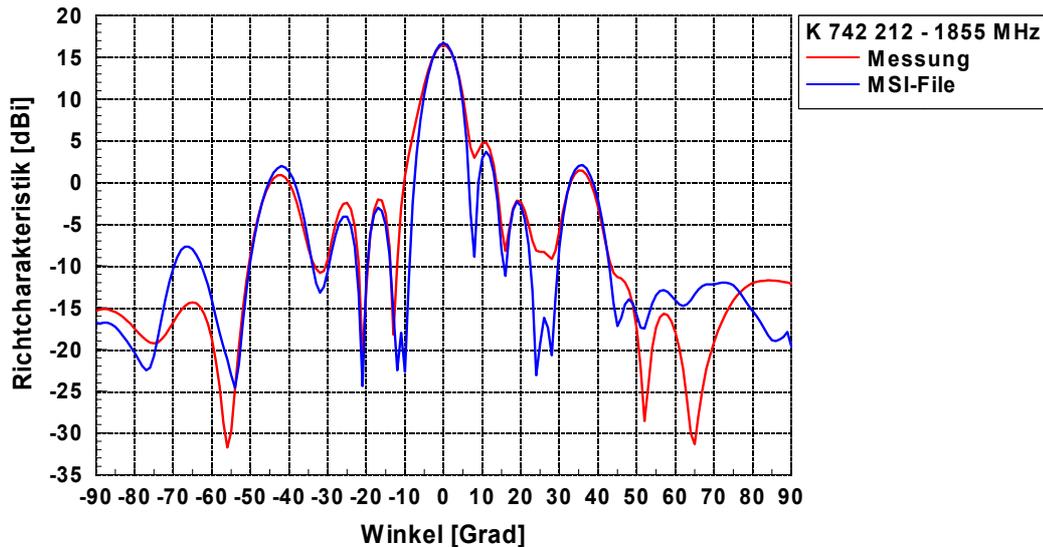


Bild 3.4.8: Vergleich des Abstrahlendiagramms aus der Messung mit den Daten aus dem MSI-File

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Amplitude der Abstrahlcharakteristik geringfügig verändert sind. Diese Änderungen sind neben den produktionsbedingten Unterschieden auch auf die Art und Weise der oben durchgeführten Messung (nicht im Fernfeld) zurückzuführen. Auf der anderen Seite entsprechen die Positionen der Nebenzipfel (im Winkelbereich von -60 bis $+60$ Grad) aus dem gemessenen Abstrahlverhalten aber denen des Fernfeldes, so dass einige generelle Aussagen getroffen werden können.

In Bild 3.4.9 sind die Messergebnisse für den vertikalen Schnitt der Abstrahlcharakteristik für die Mobilfunkantenne mit der Bezeichnung K 742 212 für den Downlink des GSM 1800 Systems im Frequenzbereich von 1805 MHz bis 1880 MHz dargestellt.

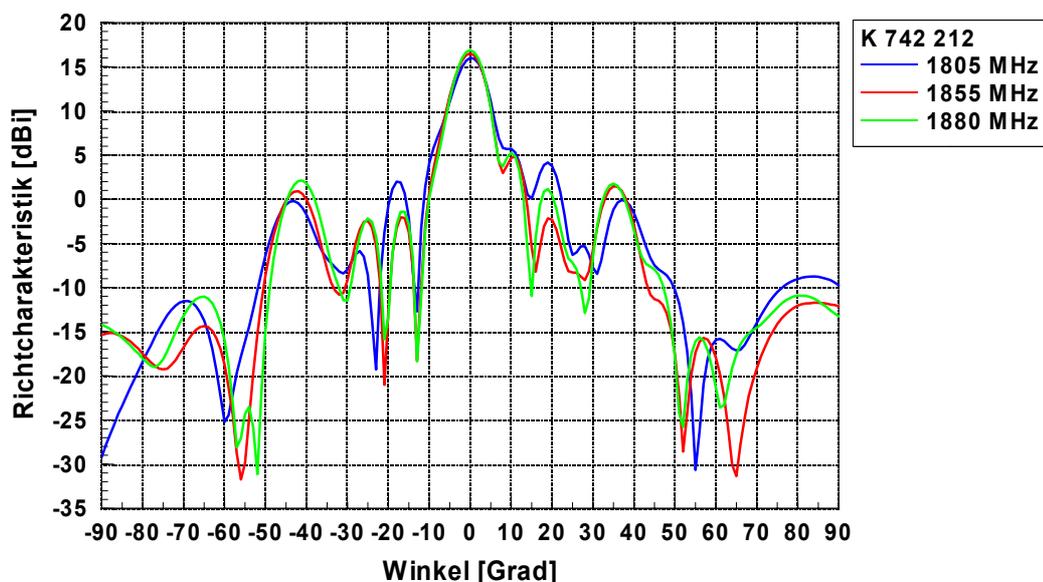


Bild 3.4.9: Frequenzabhängigkeit der Mobilfunkantenne K 742 212 im GSM 1800-Frequenzbereich für den Downlink

In Bild 3.4.9 ist eine Abhängigkeit der Abstrahlcharakteristik bezüglich der Frequenz zu sehen: Die Amplitude ändert sich drastisch (bei einigen Winkeln (z.B. -55°) um mehr als

10 dB). Ferner verschiebt sich die Lage der Nebenmaxima mit einhergehender geringfügiger Änderung ihrer Amplitude. Es ist davon auszugehen, dass diese Änderungen in vergleichbarer Weise auch im Fernfeld vorhanden sind.

Ein ähnliches Verhalten lässt sich auch im Frequenzbereich für den Downlink (2110 MHz bis 2170 MHz) im UMTS System erkennen. Im folgenden Bild sind die Ergebnisse dargestellt.

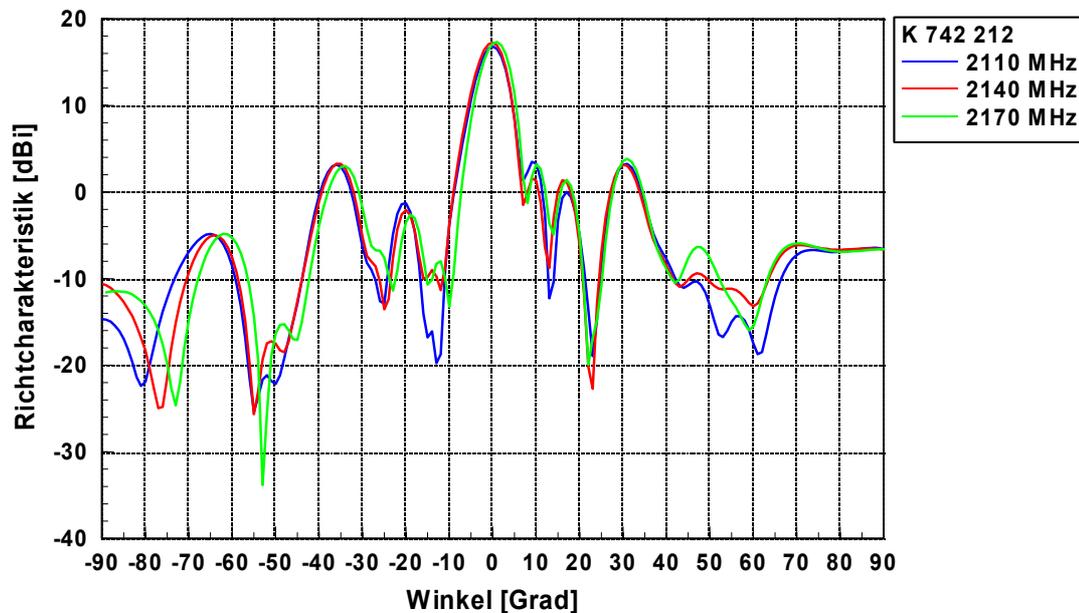


Bild 3.4.10: Frequenzabhängigkeit der Mobilfunkantenne K 742 212 im UMTS-Frequenzbereich für den Downlink

Zusammenfassend kann demnach an dieser Stelle festgehalten werden, dass sich die Abstrahlcharakteristik einer Mobilfunkantenne mit der Frequenz ändert. Dies betrifft primär die Lage der Nebenzipfel und somit auch die Amplitude des Abstrahldiagramms. Als Konsequenz ergibt sich hieraus, dass eine einzelne Berechnung mit einer vorgegebenen Richtcharakteristik nur für die jeweilige Frequenz gültig ist. Da in der Regel über ein und dieselbe Antenne viele unterschiedliche Frequenzen (vor allem bei GSM) abgestrahlt werden und sich diese darüber hinaus noch nach einem Frequenzplanwechsel ändern können, müssten in der Praxis *viele Berechnungen* durchgeführt werden, deren Ergebnisse zudem nur eine Momentaufnahme darstellen würden.

Eine Möglichkeit, die Frequenzabhängigkeit dennoch zu berücksichtigen, besteht darin, wie schon bei der Betrachtung des elektrischen Downtilts, eine Art Hüllkurve über die Abstrahldiagramme aller Frequenzen in dem betreffenden Downlink zu legen. Leider sind Abstrahldiagramme in Abhängigkeit der Frequenz aber nicht verfügbar, so dass jede einzelne Antenne eigenständig vermessen werden müsste. Dieses erweist sich bei der Vielzahl der Antennen und dem Aufwand als nicht praktikabel.

Eine weitere Möglichkeit, die Abhängigkeit dennoch zu berücksichtigen, besteht darin, die Abstrahlcharakteristik auf den Wert des größten Nebenzipfels aufzufüllen (vgl. hierzu Ab-

schnitt 3.4.4.). Da aus Aufwandgründen nicht alle Antennen vermessen werden können, ist dieser Wert den Herstellerdaten zu entnehmen.

3.4.3 Einfluss der Montageumgebung auf die Abstrahlcharakteristik

Der folgende Abschnitt beschäftigt sich mit dem Einfluss der Montageumgebung auf die Abstrahlcharakteristik einer Mobilfunkantenne. Es werden einige typische Montagekonfigurationen untersucht. Da die Montageumgebung bereits das Nahfeld der Antenne beeinflusst, macht es in diesem Zusammenhang keinen Sinn, die Problematik mit Berechnungsmethoden zu untersuchen, die ihre Gültigkeit ausschließlich im Fernfeld haben. Insofern kommen hier die feldtheoretischen Programme zum Einsatz.

Im folgenden Abschnitt werden exemplarisch modellierte Basisstationsantennen betrachtet. Es wurden drei typische Konfigurationen untersucht (siehe Bild 3.4.11):

- Basisstationsantenne auf einem Aufzugschacht
- Basisstationsantenne an einer Dachkante
- Basisstationsantenne an einem Mast

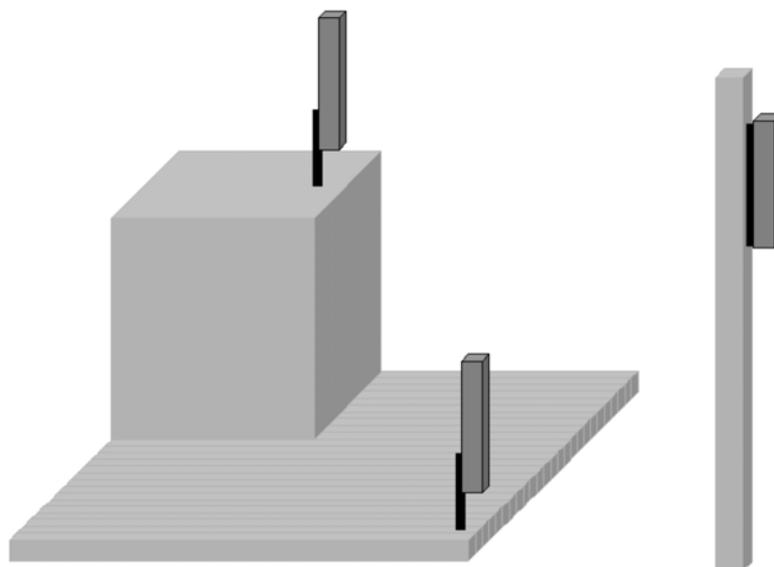


Bild 3.4.11: Mobilfunkantennen auf einem Aufzugschacht, an der Dachkante und an einem Betonmast

Zunächst wird das Programmpaket „Feko“ verwendet. Die exemplarisch modellierte Basisstationsantenne besteht aus 4 Dipolpaaren, die übereinander angeordnet sind und sich vor einer metallischen Rückwand befinden (siehe Bild 3.4.12 links). In Bild 3.4.12 (rechts) ist das zugehörige simulierte dreidimensionale Fernfeld einmal von der Seite (oben) und als Aufsicht (unten) zu sehen.

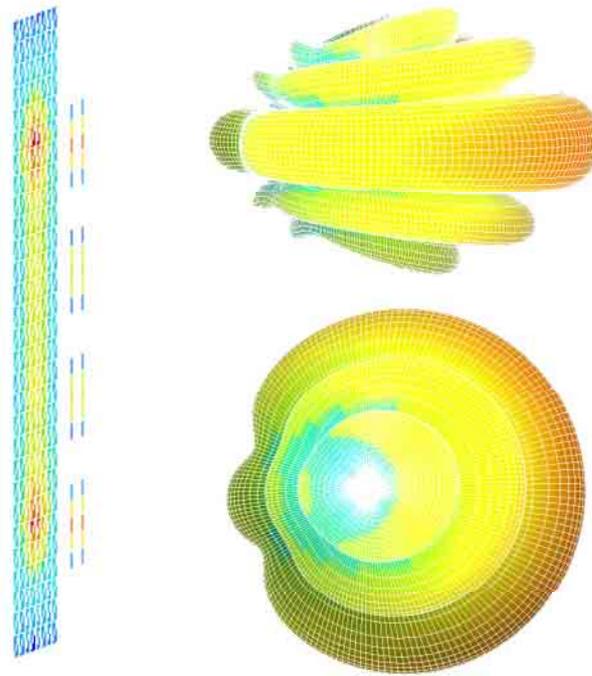


Bild 3.4.12: Exemplarisch modellierte Basisstationsantenne und das zugehörige dreidimensionale Fernfeld in linearer Darstellung aus zwei verschiedenen Ansichten.
Links: Modellierte Basisstationsantenne
Oben rechts: Simuliertes dreidimensionales Fernfeld in der Seitenansicht
Unten rechts: Simuliertes dreidimensionales Fernfeld in der Aufsicht

Zunächst wird die Modellierung der Antenne in ungestörter Umgebung untersucht und das zugehörige Antennendiagramm berechnet (vgl. Bild 3.4.12 rechts). Um die Einflüsse der Montageumgebung zu verdeutlichen, werden sukzessive Elemente der Umgebung hinzugefügt und das daraus resultierende Abstrahldiagramm mit dem ersten verglichen. Hierzu wird die Antenne zuerst an einem metallischen Mast positioniert. Im Anschluss daran wird diesem Gebilde eine Bodenplatte aus Beton hinzugefügt. Diese Konfiguration ist in Bild 3.4.13 zu sehen.

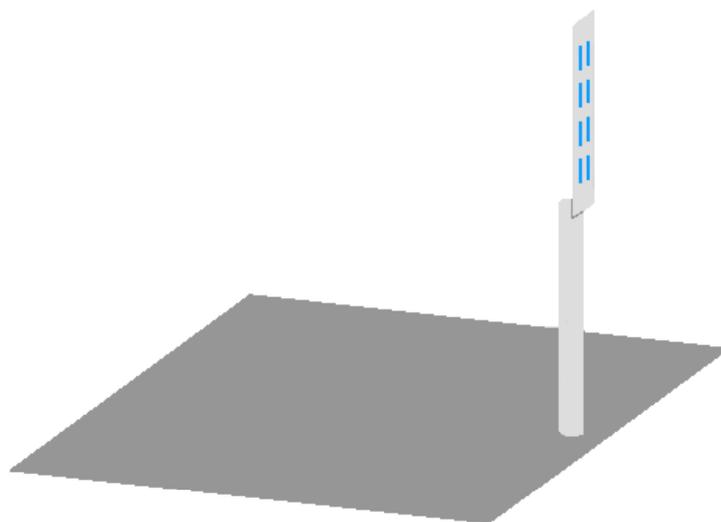


Bild 3.4.13: Mit Feko simuliertes Szenario

Ein Vergleich (siehe Bild 3.4.14) der Abstrahlcharakteristiken zwischen den verschiedenen Anordnungen lässt erkennen, dass die Hauptstrahlrichtung in diesen Konfigurationen nicht beeinflusst wird, wohingegen sich die Nebenzipfel besonders im Bereich der Rückwärtsrichtung stark verformen.

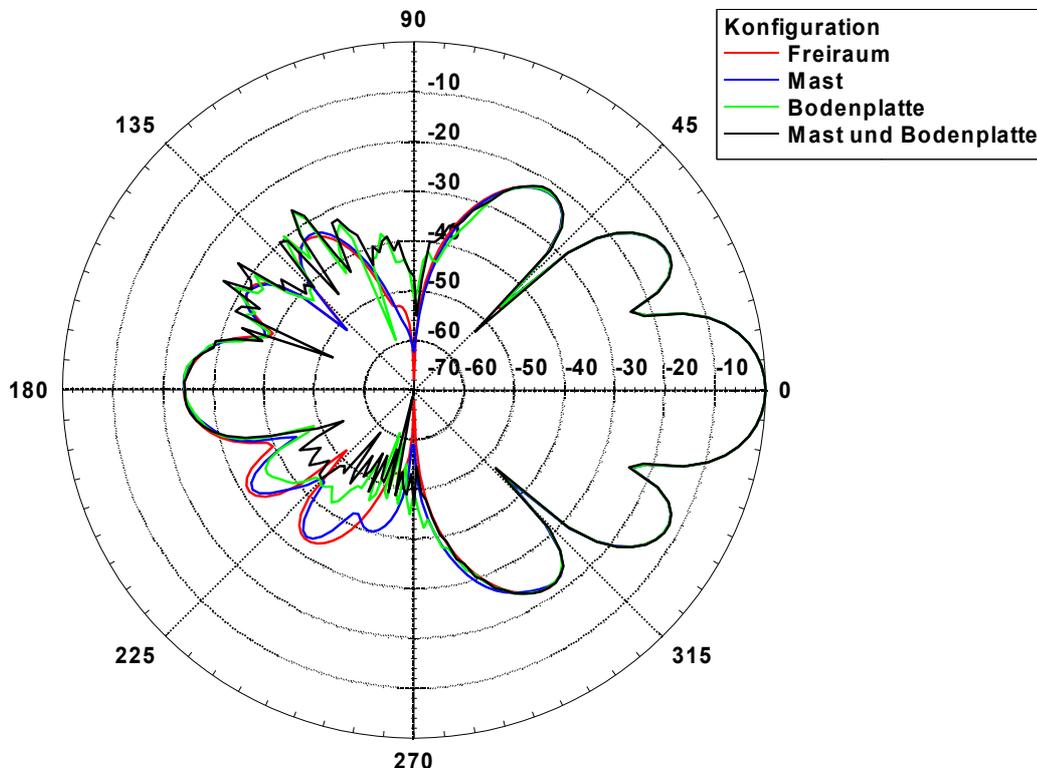


Bild 3.4.14: Vergleich der Abstrahlcharakteristiken zwischen den verschiedenen Konfigurationen

Im folgenden werden die Ergebnisse der Simulationen dargestellt, die mit dem Softwarepaket EMPIRE durchgeführt wurden. Auch hier besteht die exemplarisch modellierte Basisstationsantenne aus vier übereinander angeordneten vertikal polarisierten Dipolpaaren mit einer metallischen Rückwand; allerdings mit anderen geometrischen Abständen.

Abschließend wurden die folgenden vier verschiedenen Szenarien separat untersucht und die zugehörige Abstrahlcharakteristik berechnet:

- Freiraum
- Basisstationsantenne vor einem Betonmast (vgl. Bild 3.4.15 (2))
- Basisstationsantenne an einem metallischen Mast auf einem Aufzugsschacht, der innen metallisch verkleidet ist. Zusätzlich verläuft auf dem Betondach ein metallischer Fußweg (vgl. Bild 3.4.15 (3)).
- Basisstationsantenne an einem metallischen Mast an einer Hauskante platziert. Ein Aufzugsschacht mit metallischer Innenverkleidung befindet sich auf der rückwärtigen Seite (vgl. Bild 3.4.15 (4)).

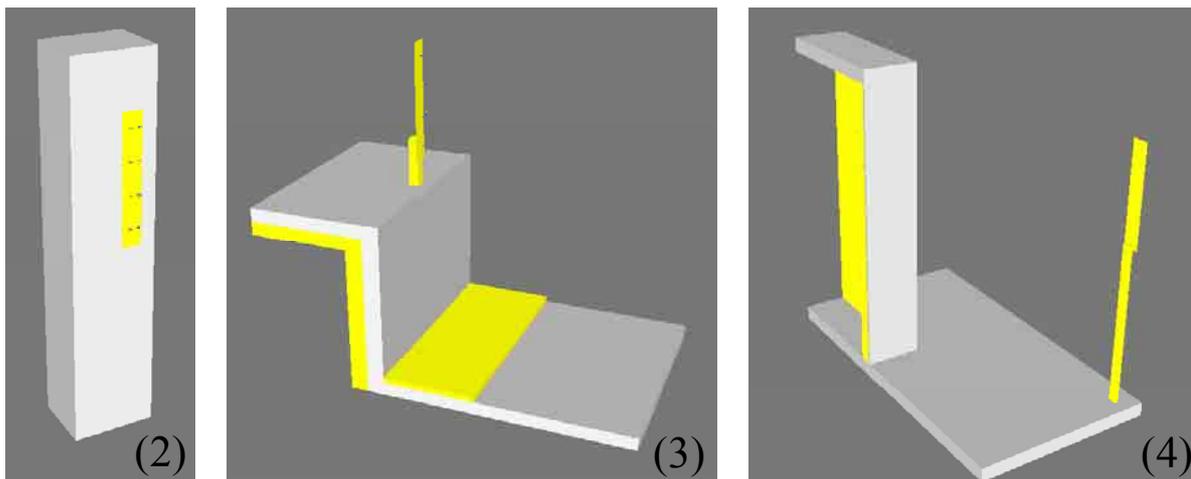


Bild 3.4.15: Drei verschiedene Simulationskonfigurationen, die mit EMPIRE berechnet wurden.

- (2) Basisstationsantenne vor einem Betonmast
- (3) Basisstationsantenne auf einem Aufzugsschacht, der innen metallisch verkleidet ist. Zusätzlich verläuft auf dem Betondach ein metallischer Fußweg.
- (4) Basisstationsantenne an einer Hauskante. Ein Aufzugsschacht mit metallischer Innenverkleidung befindet sich auf der rückwärtigen Seite

Im folgenden Bild (Bild 3.4.16) sind die den oben entsprechenden Konfigurationen in einer realen Umgebung zu sehen.

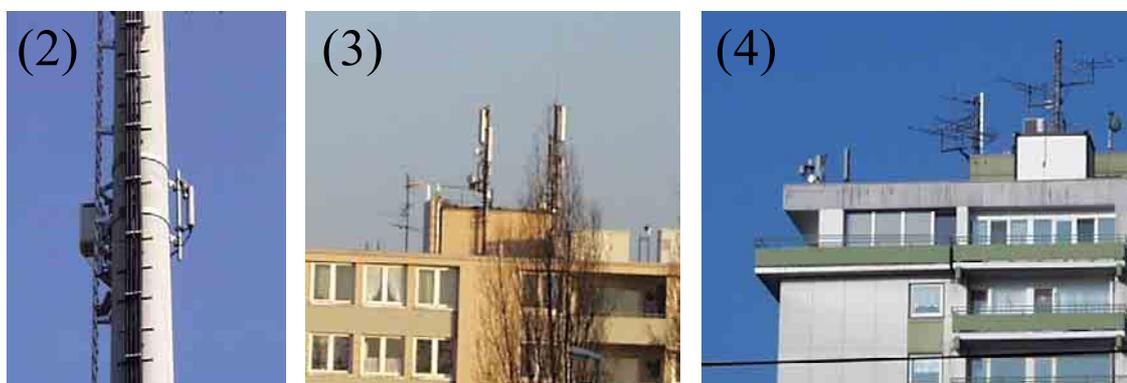


Bild 3.4.16: Drei verschiedene reale Montageumgebungen

- (2) Basisstationsantenne vor einem Betonmast
- (3) Basisstationsantenne auf einem Aufzugsschacht, der innen metallisch verkleidet ist. Zusätzlich verläuft auf dem Betondach ein metallischer Fußweg
- (4) Basisstationsantenne an einer Hauskante mit dahinterliegendem Aufzugsschacht

Die Simulationsergebnisse sind in Bild 3.4.17 dargestellt. Hier ist analog zu den vorherigen Ergebnissen das vertikale Fernfeld - Antennendiagramm der jeweiligen Konfiguration zu sehen.

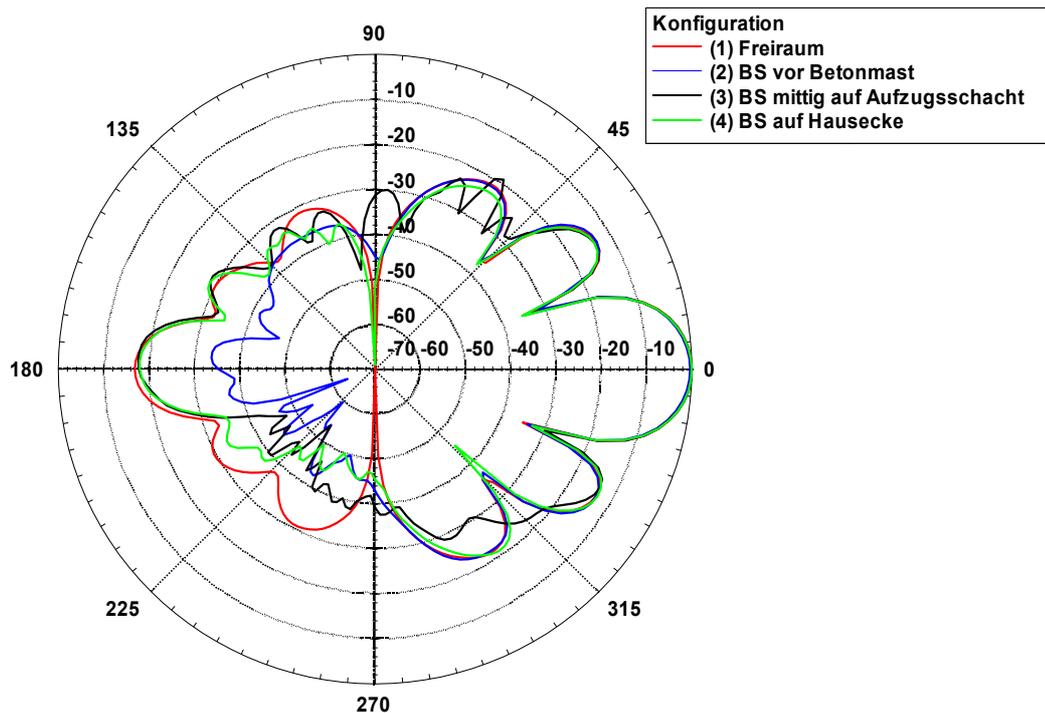


Bild 3.4.17: Vergleich der Abstrahlcharakteristiken zwischen den verschiedenen Konfigurationen

Wie auch schon bei den Simulationen mit Feko wird die Hauptstrahlrichtung der exemplarisch modellierten Mobilfunkantenne durch die hier betrachteten Konfigurationen nicht beeinflusst. Allerdings ist in den Nebenzipfeln ein deutlicher Einfluss der Montageumgebung zu erkennen, der sich nicht nur in einer Amplitudenänderung, sondern auch in einer Verschiebung der Lage auswirken kann (z.B. Konfiguration (3) in Bild 3.4.15).

3.4.4 Fazit

Im vorliegenden Abschnitt wurde der Einfluss von verschiedenen Parametern auf die Abstrahlcharakteristik von Mobilfunk Basisstationsantennen untersucht. Hierzu wurde der Fokus auf den vertikalen Schnitt gelegt, da die Änderungen im horizontalen Schnitt gering sind. Es hat sich deutlich gezeigt, dass die Lage und die Amplitude der Nebenzipfel von dem elektrischen Downtilt der Antenne abhängen. Es ist also nicht sinnvoll, die Abstrahlcharakteristik mit einem elektrischen Downtilt von 0° zu verwenden und diese in der Simulation einfach mechanisch zu drehen. Es sollte immer das Abstrahldiagramm mit dem vorgegebenen elektrischen Downtilt verwendet werden.

Da viele Abstrahlcharakteristiken nur bei einer Frequenz (häufig die Mittenfrequenz) der einzelnen Mobilfunksysteme gegeben sind, wurde die Abhängigkeit von der Frequenz untersucht. Auch hierbei hat sich gezeigt, dass die Nebenzipfel primär ihre Lage und geringfügig ihre Amplitude ändern.

Ferner hat die Untersuchung der Montageumgebung mit einigen typischen Anordnungen gezeigt, dass sich bei einigen Szenarien die Amplitude im Nebenzipfelbereich stark verändern kann. Zudem gibt es auch leichte Variationen in der Lage der Nebenzipfel. Von allen Betrachtungen unbeeinflusst ist die Hauptstrahlrichtung.

Die vorangegangenen Untersuchungen haben verdeutlicht, dass eine Berechnung theoretisch für jeden elektrischen Downtiltwinkel, jede Frequenz und die Montageumgebung getrennt durchgeführt werden müsste, da diese Parameter einen signifikanten Einfluss auf den Nebenzipfelbereich aufweisen. Die Hauptstrahlrichtung ist hierbei direkt mit dem eingestellten Neigungswinkel verknüpft. Allein durch den Aufwand, der hierfür betrieben werden müsste (z.B. Messung der Abstrahlcharakteristiken jeder Antenne in Abhängigkeit der Frequenz und Simulation bei 124 Kanälen für GSM 900 bzw. 374 Kanälen bei GSM 1800), ist diese Vorgehensweise unrealistisch.

Deswegen ist es auch vor dem Hintergrund einer rechen-technischen Grenzwertüberprüfung sinnvoll, ein neues Antennendiagramm zu synthetisieren, um die Änderungen der Lage und Amplitude der Nebenzipfel und der Hauptstrahlrichtung bei der Simulation zu berücksichtigen. Mit *einer* Simulation werden somit mehrere Betriebszustände wieder gespiegelt. Hierzu wird folgende Vorgehensweise vorgeschlagen: Die maximale Hüllkurve über das Antennendiagramm mit verschiedenen Downtilt Winkeln wird aus den jeweiligen Antennendiagrammen synthetisiert (vgl. Abschnitt 3.4.1).

Da die maximale Amplitude der Nebenkeulen sowohl bei Frequenzabhängigkeit als auch beim Einfluss der Montageumgebung nahezu gleich bleibt und sich hauptsächlich nur die Lage ändert, wird die synthetisierte Hüllkurve der verschiedenen Abstrahlcharakteristiken anschließend im vorderen Strahlungsbereich auf die maximale Amplitude im Nebenzipfelbereich aufgefüllt. Dieses geschieht auf gleiche Weise auch im rückwärtigen Bereich (vgl. hierzu Bild 3.4.18).

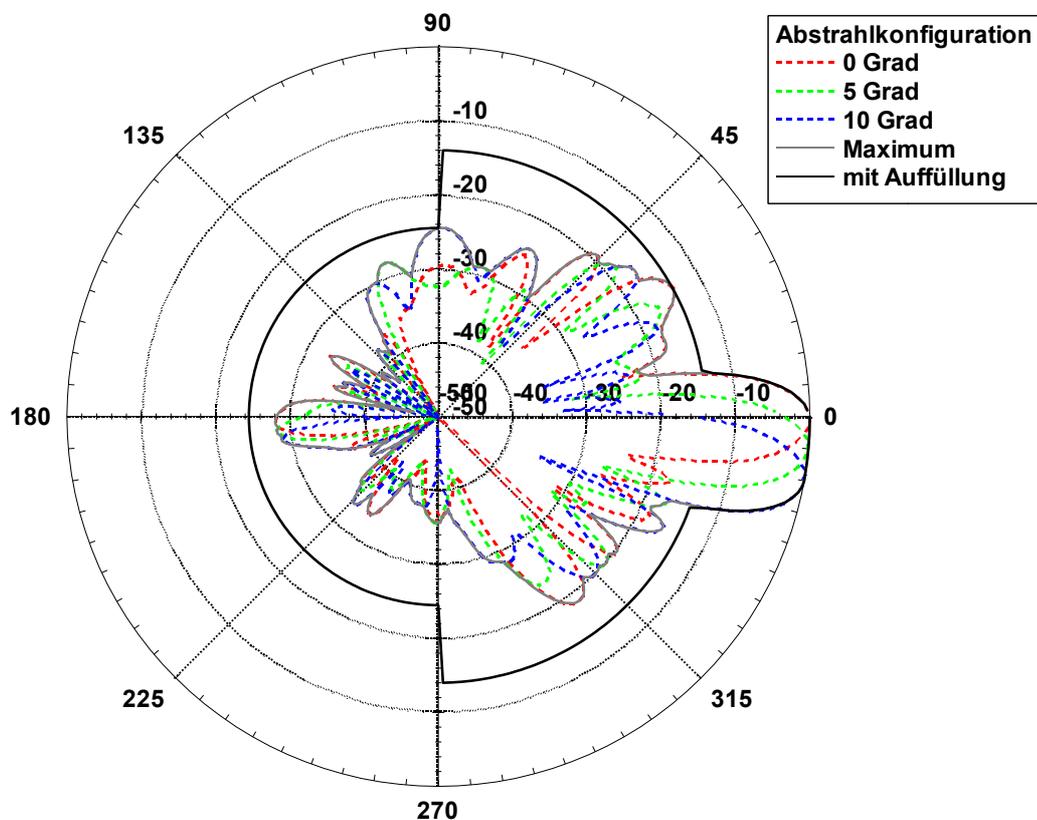


Bild 3.4.18: Synthese einer neuen Abstrahlcharakteristik zur Kompensation der oben beschriebenen Einflussfaktoren

Ferner ist an dieser Stelle folgendes zur Integration der Basisstationsantennen in feldtheoretischen bzw. Hybrid Softwarepaketen festzuhalten: Für eine Simulation ist es erforderlich, den genauen Antennenaufbau zu kennen. Hierzu gehören die Lage, Größe, Abstände usw. der einzelnen Dipole zueinander und deren genaue Speisung, um die elektrischen Downtilts nachbilden zu können. Generell ist es natürlich möglich, eine Basisstationsantenne genau zu simulieren. Hierbei wird aber nur *ein* bestimmter Betriebszustand wieder gespiegelt. Darüber hinaus ist an dieser Stelle der erhebliche Aufwand der Datenbeschaffung (es existieren weit über 100 Mobilfunksendeantennen allein von der Firma Kathrein) und der damit verbundenen Modellierung zu beachten. Ein Import einer synthetisierten Abstrahlcharakteristik nach dem oben beschriebenen Verfahren (Hüllkurve) und damit die Möglichkeit, mehrere variierende Betriebszustände einer Basisstation mit nur einer Berechnung in einem feldtheoretischen bzw. hybriden Softwarepaket simulieren zu können, ist aber nicht möglich. Hierfür ist es sinnvoll, Softwarepakete zu verwenden, in denen diese Abstrahlcharakteristik direkt eingelesen werden kann. Das Einbinden des synthetisierten Abstrahlverhaltens der zu simulierenden Antenne gilt nur für eine Fernfeldbetrachtung. (vgl. hierzu Formel 2.5.6 aus dem Abschnitt 2.5.4 Nahfeld Fernfeld Problematik).

3.5 Simulationsparameter

Im folgenden Abschnitt wird näher auf die einzelnen Eingabeparameter für die Berechnung eingegangen. Diese gliedern sich grob in zwei Bereiche. Hier sind zum einen die Geodaten zu nennen, die sich in die Gebäudedaten und die Höhendaten unterteilen. Demgegenüber stehen die spezifischen Daten der Mobilfunkbasisstation wie z.B. Antennenart, horizontale Ausrichtung, Downtilt, Anzahl der Kanäle usw.

3.5.1 Geodaten

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

Darüber hinaus existiert ein Gebäudereferenzserver, der ca. 3,7 Mio. Gebäude mit Gebäudekennzeichen (Land, Gemeinde, Straße, Hausnummer, Zusatz, lfd. Nummer) und die Gebäudekoordinate beinhaltet. Auch Gebäudereferenzen bzw. Hauskoordinaten aus anderen Bundesländern stehen zur Verfügung. Zu beachten ist, dass in den Gebäudereferenzen keine Gebäudehöhen enthalten sind. In den Vektordaten der automatisierten Liegenschaftskarte ist zwar ein Attribut „Anzahl Vollgeschosse“ vorgesehen, von dem auf die Höhe geschlossen werden konnte, aber dieses ist noch nicht vollständig erfasst. Die Gebühren hierfür können nicht pauschal angegeben werden, sondern sind abhängig von der jeweiligen Fläche, der

Anzahl und der Informationsdichte. Beispielsweise ist der Preis für 1 km² Grundfläche in der Kölner Altstadt mit 266,85 € angegeben.

Es existiert die Möglichkeit auf Basis von Stereo-Luftbildaufnahmen aktuelle 3D-Modelle des Gebäudebestandes mit Anbauten und jeweiliger Dachform abzuleiten. Hieraus könnten wichtige Parameter wie Gebäudehöhe, Grundfläche usw. gewonnen werden. Mehrere Anfragen an Firmen (Geopunkt oder Geospace) bezüglich der Verfügbarkeit der Gebäudehöhen und deren Kosten blieben leider unbeantwortet.

Höhendaten liegen in Form von sogenannten digitalen Geländemodellen vor, die sich hauptsächlich in ihrer Auflösung unterscheiden.

Das Digitale Geländemodell 5 (DGM5) beschreibt die Geländeformen der Erdoberfläche durch eine in einem regelmäßigen Gitter angeordnete, in Lage und Höhe georeferenzierte Punktmenge, die durch Strukturelemente (z.B. Geländekanten, Gerippelinien, markante Geländepunkte) ergänzt werden kann.

Die Gitterweite beträgt bei diesem Modell hoher Auflösung 10 m bis 20 m. Die Höhengenaugigkeit liegt geländetypabhängig bei +/- 0,5 m bis 1 m. Der Preis für Daten aus dem digitalen Geländemodell 5 beläuft sich pro Quadratkilometer auf 30 €.

3.5.2 Standortparameter der Mobilfunksendeanlage

Die für die Simulation notwendigen Parameter der Mobilfunksendeanlage sind begrenzt der Standortbescheinigung (StOB) zu entnehmen. In Bild 3.5.1 ist eine typische StOB zu sehen.

RegTP
Regulierungsbehörde für
Telekommunikation und Post

Anlage zur
Standortbescheinigung

Standortbescheinigungsnummer:
Ausstellungsdatum:
Am Senderstandort
(Straße/Gemarkung), Haus Nr./Flur/Flurstück, PLZ, Ort)
Bereich: **Gesamtstandort**

wurden folgende Funkanlagen hinsichtlich der Einhaltung der Grenzwerte nach § 3 BEMFV betrachtet und entsprechende systembezogene Sicherheitsabstände festgelegt.

Neu installierte Funkanlagen

lfd. Nr.	Funkanlage ¹⁾	Sendeanthen-nenzeichnung ²⁾	Montagehöhe über Grund in Meter	Hauptstrahl-richtung (HSR) in Grad	Sicherheitsab-stand in HSR in Meter	vertikaler Sicherheits-abstand in Meter
7	-UMTS		27,2	0°	3,25	0,29
9	-UMTS		25,9	240°	3,33	0,21
11	- GSM18		27,2	0°	4,40	0,31
12	- GSM09		27,2	0°	2,56	0,20
13	- GSM18		25,8	120°	2,63	0,21
14	- GSM18		25,9	240°	3,27	0,18

Bild 3.5.1: Standortparameter in der Standortbescheinigung

Wie aus Bild 3.5.1 ersichtlich, ist die Montagehöhe der Sendeantenne über Grund direkt aus der Standortbescheinigung abzulesen. Für eine Simulation ist es in diesem Zusammenhang wichtig, dass sich diese Höhe auf die Antennenunterkante bezieht. Gerade in Berechnungen, in denen die Antenne als Punktquelle angesehen wird, also die Abstrahlcharakteristik des Fernfeldes z.B. in Form einer MSI-Datei eingelesen wird, sollte streng darauf geachtet werden, ob diese Montagehöhe um die Hälfte der Antennenhöhe vergrößert werden muss. Bei EFC-400 z.B. existiert in der Eingabemaske auch ein Eintrag für die vertikale Bauhöhe der Antenne. Hier ist in der z-Koordinate die Höhe der Antennenunterkante einzutragen.

Die Hauptstrahlrichtung (HSR) bezieht sich auf den Azimut. Die 0°-Richtung entspricht hierbei der Nord-Richtung, und es wird im Uhrzeigersinn gedreht.

Aus der Spalte Funkanlage ist eine Annahme für die Betriebsfrequenz möglich. Wie in Abschnitt 3.4 analysiert, berücksichtigt eine Auffüllung des Antennendiagramms auch die unterschiedlichen Frequenzen im Downlinkbereich. Es kann demnach für eine Berechnung die Mittenfrequenz des jeweiligen Systems genommen werden.

Die Antenneneingangsleistung für den jeweiligen betrachteten Sektor ist aus dem Sicherheitsabstand, der in der Standortbescheinigung angegeben ist, nur begrenzt rückrechenbar. So wendet die RegTP für die Bestimmung des Sicherheitsabstandes unterschiedliche Berechnungen an, wenn z.B. drei Antennen auf einem Mast oder über eine Dachfläche verteilt montiert sind. In diesem Zusammenhang ist eine Angabe der Betreiber (z.B. aus den Standortträgen) genauer.

Es werden aber noch weitere Parameter für eine Simulation benötigt. In diesem Fall ist die Mithilfe der Betreiber unumgänglich. Da die Mobilfunkbetreiber nicht generell den gesamten Winkelbereich für den elektrischen Downtilt der Antenne beantragen, wird für die Synthese der Abstrahlcharakteristik aus vorherigem Abschnitt diese Information von den Netzbetreiber benötigt. Ferner können diese Auskunft über die Antennenart, die Anzahl der Kanäle, die genaue Betriebsfrequenz, die Sendeleistung der Verstärker und die Kabelverluste geben, so dass keine Berechnung aus den Daten der Standortbescheinigung vorzunehmen ist.

3.6 Anwendung der Softwarepakete auf reale Konfigurationen

Im folgenden Abschnitt werden die Programme auf reale Szenarien angewendet. In diesem Zusammenhang werden Erfahrungen im Umgang mit den Softwarepaketen gesammelt (erforderliche Rechenleistung, Grenzwertüberprüfung, Anwendungsbereich usw.), auf die später detailliert eingegangen wird. Darüber hinaus werden die simulierten Ergebnisse mit Messergebnissen aus denselben Szenarien verglichen

Es werden die drei strahlenoptischen Softwarepakete EMF-Visual, Wireless Insite und Quickplan sowie das Programm EFC-400 verwendet. Auf feldtheoretische bzw. Hybridverfahren wird in diesem Zusammenhang aus den in Abschnitt 3.4 beschriebenen Gründen (z.B. kein Einbinden der synthetisierten Abstrahlcharakteristik möglich) verzichtet. Zusätzlich wird noch eine Berechnung mit dem Programm Fieldview [FV 04] durchgeführt, das auf reiner Freiraumausbreitung beruht und keine Gebäude oder andere Hindernisse berücksichtigt. Die Bodenreflexion kann über folgenden Worst Case Ansatz in dieser Berechnung berücksichtigt

werden. Die Reflexion am Boden resultiert in einer Verdopplung der Leistungsflussdichte. Dieser Verdopplung wird in der Simulation insofern Rechnung getragen, dass die Sendeleistung um +3dB erhöht wird.

Die Simulationen erfolgen nicht an wahllosen Mobilfunksendeanlagen, sondern bei typischen Anordnungen von Basisstationsstandorten. Ausgewählt wurden folgende Konfigurationen:

- (1) Freistehender Mast auf einem Feld (ländlich) – (siehe Abschnitt 3.6.2)
- (2) Stadtgebiet - (siehe Abschnitt 3.6.3, 3.6.4, 3.6.5, 3.6.6)
- (3) Keine direkte Sicht zur Basisstation (nLoS)- (siehe Abschnitt 3.6.3, 3.6.4)
- (4) Basisstation auf einem Turm oder Hausdach und Untersuchung der Exposition auf einem Platz mit umliegenden Gebäuden – (siehe Abschnitt 3.6.5)
- (5) Mikrozone – (siehe Abschnitt 3.6.6)
- (6) Inhaus – (siehe Abschnitt 3.6.7, 3.6.8)
- (7) Basisstation auf einem Haus und Exposition in einer darunter liegenden Wohnung – (siehe Abschnitt 3.6.8)

Zunächst wurden entsprechende reale Szenarien ausfindig gemacht. Anschließend wurde in einem ausgewählten Gebiet an mehreren Messpunkten die Immission in Form der Elektrischen Feldstärke gemessen. Die Messung wurde mit der Schwenkmethode (vgl. hierzu Kapitel 2) durchgeführt, wobei abweichend vom Originalverfahren lediglich in einer Höhe von 1,8 m bis 2 m über dem Erdboden geschwenkt wurde.

Es wurde an den jeweiligen Messorten *nur* die Immission durch den BCCH Kanal der betrachteten Mobilfunkanlage gemessen. Die konstante Sendeleistung dieses Kanals ist für eine nachfolgende Simulation am besten geeignet; die Immission bei maximaler Anlagenauslastung ist skalierbar. Alle Berechnungen wurden auf einem Computer mit folgenden Eigenschaften durchgeführt:

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

Zunächst werden noch einige Vorbemerkungen zu den einzelnen verwendeten Programmen im Umgang mit Eingabe- bzw. Simulationsparametern getroffen werden. Darüber hinaus wird eine Analyse des Einflusses von Mobiliar und Personen auf die Immissionssituation in Innenräumen vorgestellt. Im Anschluss daran werden dann die jeweiligen Messorte mit ihren gemessenen und simulierten Expositionssituationen vorgestellt.

3.6.1 Vorbetrachtungen zu den Berechnungen und den Softwarepaketen

3.6.1.1 Betrachtungen für die Berechnung innerhalb von Gebäuden

In diesem Abschnitt werden zunächst die Einflüsse von Möbeln und Personen, die sich innerhalb eines Raumes befinden, auf die Immissionsverteilung näher untersucht. Die hierzu notwendigen Berechnungen wurden mit dem Programm „Empire“ durchgeführt. In Bild 3.6.1 ist der Aufbau des untersuchten Indoorszenarios in der Aufsicht und in Bild 3.6.2 in einer schrägen dreidimensionalen Ansicht zu sehen.

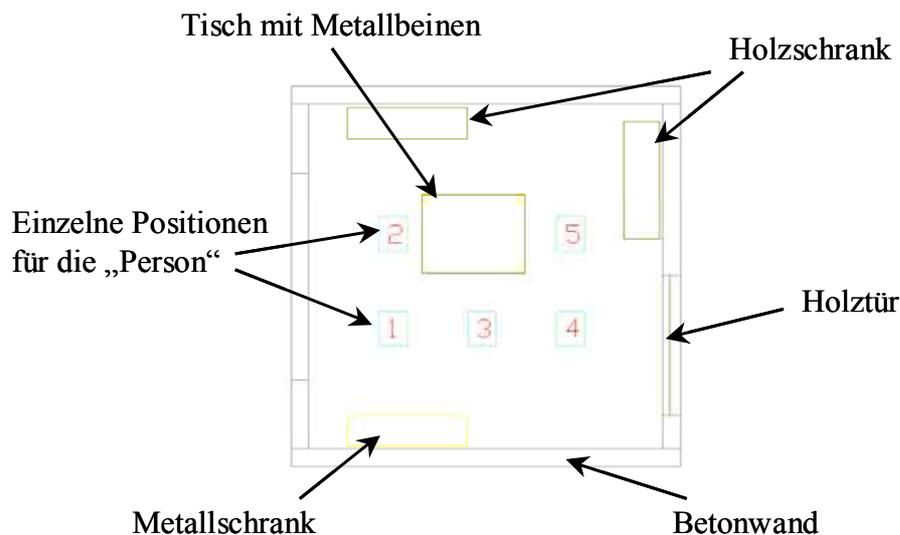


Bild 3.6.1: Aufbau und Konfiguration des untersuchten Indoorszenarios

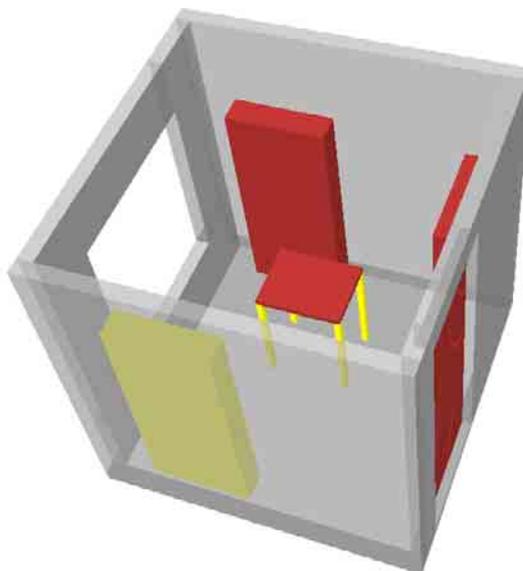


Bild 3.6.2: Untersuchtes Indoorszenario mit folgenden Materialien: Grau = Beton, rot = Holz, gelb = Metall

Als Mobiliar werden drei Schränke (2x Holz, 1x Metall), ein Tisch mit Metallbeinen und eine Holztür verwendet. Die Person wurde durch einen Block angenähert, der die elektrischen Eigenschaften von Muskelgewebe aufweist. Dieser wurde nacheinander an verschiedenen Positionen im Raum platziert (siehe Bild 3.6.1). Auf der linken Seite (vgl. hierzu Bild 3.6.2)

befindet sich ein Fenster, durch das die elektromagnetische Strahlung in das Zimmer eindringt.

Bei den Simulationen wurde dabei so vorgegangen, dass jeweils die in dem Raum maximale Feldstärke bei folgenden Szenarien verglichen wurde:

- Raum leer
- Raum mit Mobiliar
- Raum mit Mobiliar und Person (Position 1)
- Raum mit Mobiliar und Person (Position 2)
- Raum mit Mobiliar und Person (Position 3)
- Raum mit Mobiliar und Person (Position 4)
- Raum mit Mobiliar und Person (Position 5)

In den Bildern 3.6.3 und 3.6.4 sind die Feldstärkeverteilungen in einer Ebene für zwei der oben genannten Konfigurationen zu sehen. Es ist deutlich erkennbar, dass sich die Verteilung der Immission, die durch den farbigen Verlauf wieder gespiegelt wird, verändert. Hierzu sei zum Beispiel auf den Bereich, der sich in Bild 3.6.4 rechts von der „Person“ befindet verwiesen. Weiterhin ist deutlich zu erkennen, dass sich die Lage des Immissionsmaximums verschiebt.

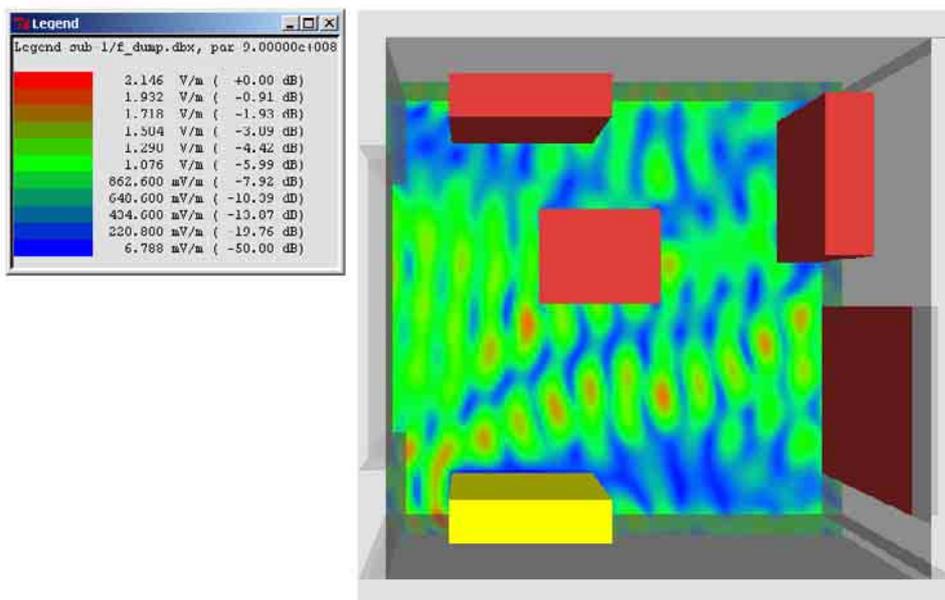


Bild 3.6.3: Verteilung der elektrischen Feldstärke in der Tischebene, einfallende Welle bei 900 MHz

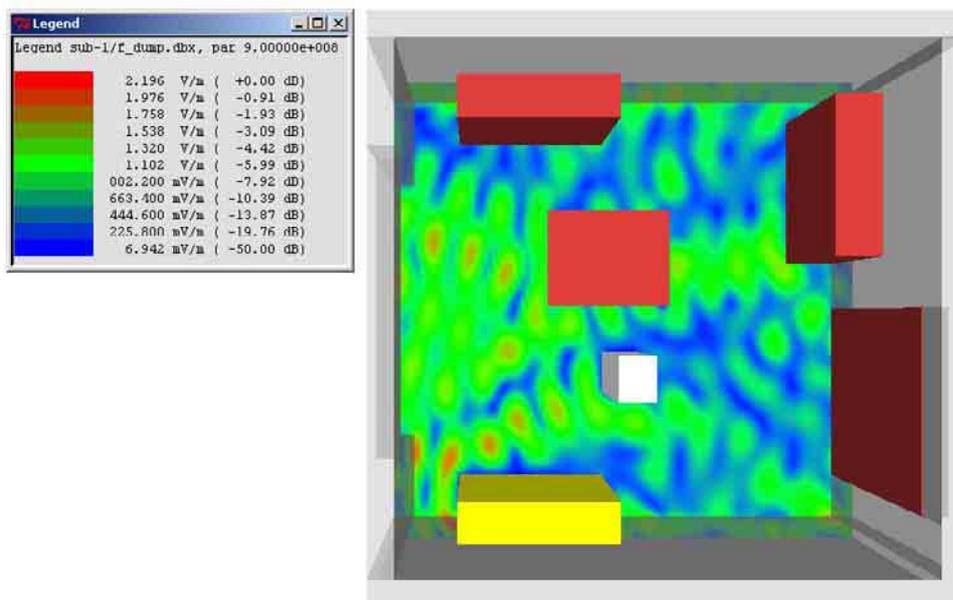


Bild 3.6.4: Verteilung der elektrischen Feldstärke in der Tischebene, einfallende Welle bei 900 MHz, Anwesenheit einer Person im Raum (weißer Block)

In der folgenden Tabelle sind die für eine Grenzwertbetrachtung relevanten maximal auftretenden Feldstärken bei den verschiedenen Konfigurationen zu sehen:

Konfiguration	Maximale elektrische Feldstärke [dB μ V/m]
Raum leer	126,02
Raum mit Mobiliar	126,44
Raum mit Mobiliar und Person (Position 1)	126,92
Raum mit Mobiliar und Person (Position 2)	126,49
Raum mit Mobiliar und Person (Position 3)	126,85
Raum mit Mobiliar und Person (Position 4)	127,23
Raum mit Mobiliar und Person (Position 5)	126,64

Tabelle 3.6.1: Vergleich der maximalen Feldstärke zwischen den einzelnen Konfigurationen

Diese Betrachtung zeigt, dass sich der Ort des Immissionsmaximums innerhalb eines Raumes durch Mobiliar oder anwesende Personen verändert. Die Simulation gibt in diesem Fall nur eine Momentaufnahme der Immissionsverteilung in einem Raum, da sich z.B. die Änderung der Position einer Person direkt in einer Änderung der Immissionsverteilung niederschlägt. Darüber hinaus ist die absolute Schwankung des Maximalwertes relativ gering und beträgt in o.g. Konfiguration im Extremfall 1,2 dB.

Hieraus kann abgeleitet werden, dass eine detaillierte Modellierung von Mobiliar und Personen in Anbetracht des erheblichen Modellierungsaufwandes und der damit zu erzielenden Genauigkeit wenig Sinn macht.

3.6.1.2 Test der Software anhand einfacher Szenarien

Bevor direkt mit der Simulation der zu vergleichenden Expositionssituationen begonnen wurde, wurden die Programme mittels einfacher Beispiele (z.B. Freiraumausbreitung) getestet. Die Simulationsergebnisse waren mittels analytischer Berechnungen nachvollziehbar, wodurch eine korrekte Funktionsweise gewährleistet werden konnte. In Bild 3.6.5 ist beispielhaft das mit EFC-400 ermittelte Simulationsergebnis für einen Sektor mit reiner Freiraumausbreitung zu sehen. Die zugehörigen Parameter sind:

- Mobilfunkantenne: K 739648 (Abstrahlcharakteristik bearbeitet)
- Antennengewinn: 13,5 dBi
- Antennenhöhe: 29,35 m
- Sendeleistung: 10 W
- Abstand: 50 m

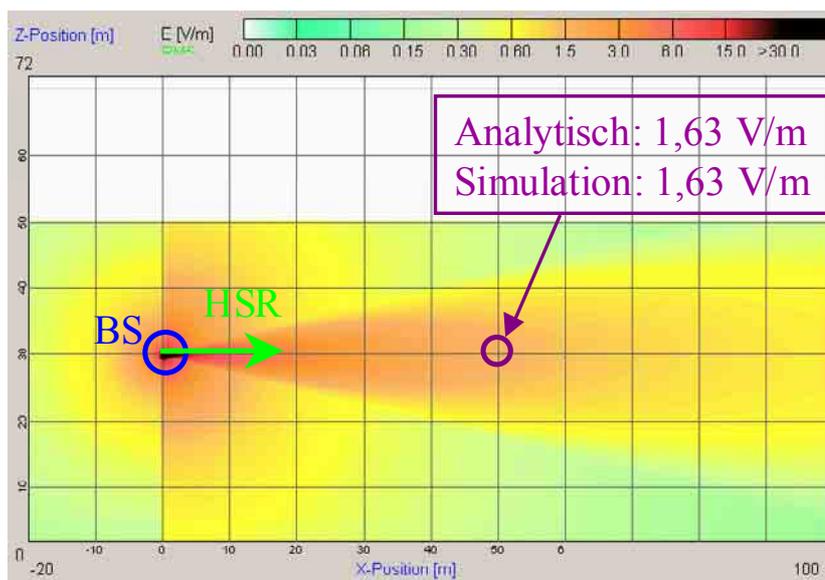


Bild 3.6.5: Vergleich Analytische Berechnung – Simulation

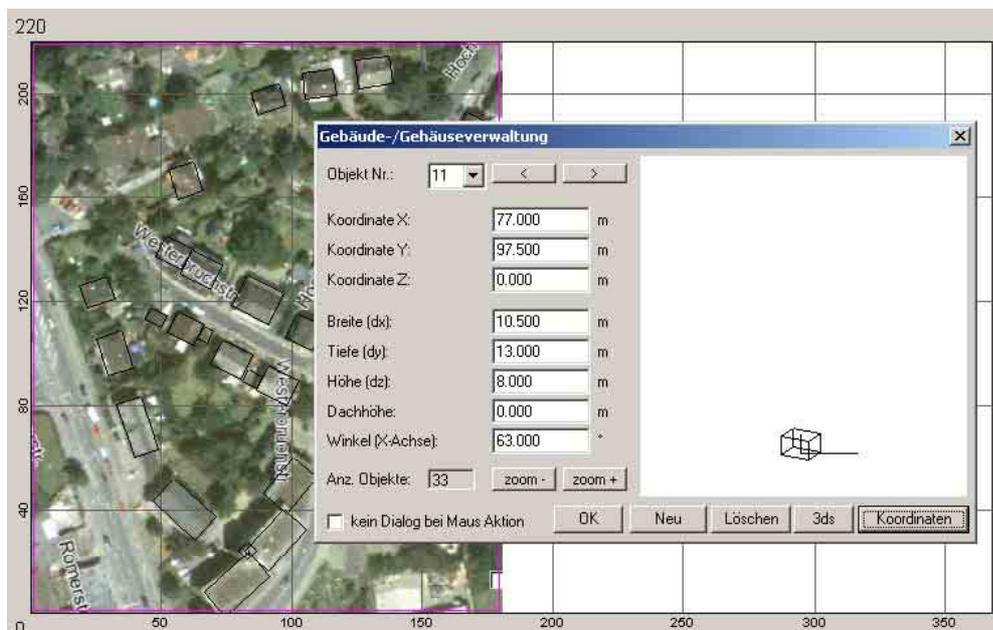
In analoger Weise wurden Berechnungen mit den übrigen Softwarepaketen durchgeführt, die die selben Ergebnisse lieferten.

Die bei den Berechnungen aufgetretenen Besonderheiten und Unterschiede werden in den folgenden Abschnitten näher beschrieben und es werden Hinweise auf mögliche Fehlerquellen und Berechnungsunterschiede gegeben.

3.6.1.3 Geodaten

Die in dieser Studie untersuchten Mobilfunksendeanlagen befinden sich alle in flachem Gelände, so dass in Abständen bis 200 m keine relevanten Änderungen der Geländehöhe betreffend vorliegen. Insofern wurden Höhendaten in allen Simulationen vernachlässigt. Mit der Ausnahme von EMF-Visual ist es aber generell in den anderen getesteten Softwarepaketen möglich, die Höhendaten des Geländes einzubinden.

Grundsätzlich können die Gebäudedaten direkt in die einzelnen Programme importiert werden, sofern sie im richtigen Format vorliegen. In dieser Studie wurden die Häuser für die Berechnung selbst generiert. Hierzu wurden für die Gebäudedaten in den Simulationen Satellitenbilder der Umgebungen als Grundlage verwendet [SAT5, KVR]. In der Software EFC-400 kann dieses Satellitenbild als Hintergrundkarte importiert werden, worauf dann die einzelnen Gebäude platziert werden können (s. Bild 3.6.6). Der Benutzer muss die Länge, Breite und den Drehwinkel der Gebäude so lange verändern bis sie sich mit dem Grundriss auf dem Satellitenbild decken.



3.6.6: Einbinden von Gebäuden in die Software EFC-400

Hierbei ist es nur möglich viereckige Gebäude zu modellieren. Verwinkelte Häuser können durch Zusammensetzen mehrerer Gebäude hergestellt werden.

Sowohl in der Software EMF-Visual als auch bei Quickplan ist ein Zusatztool integriert, mit dem die Gebäude generiert werden können. Hierzu wird ebenfalls die Hintergrundkarte geladen. Mittels eines Cursors können die Eckpunkte eines Hauses definiert werden, die dann miteinander verbunden werden und die Hauswände bilden (vgl. Bild 3.6.7 und Bild 3.6.8). Die Höhe des Hauses kann separat eingegeben werden. In diesem Zusammenhang ist bei EMF-Visual zu beachten, dass eine nachträgliche Änderung der Höhe eines Hauses überhaupt nicht und das Hinzufügen eines neuen Hauses nur mit großem Aufwand möglich ist.

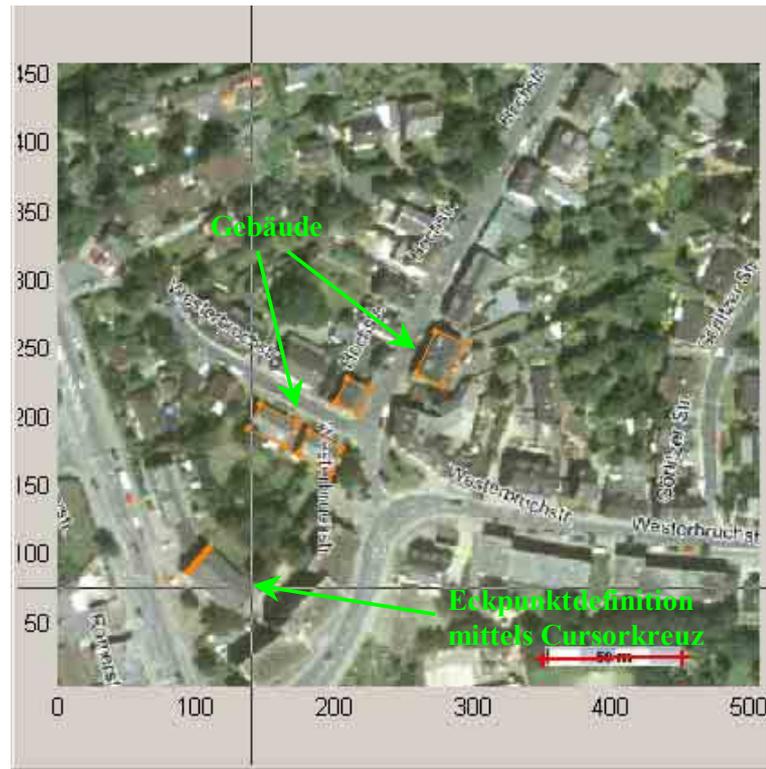


Bild 3.6.7: Gebäudemodellierung mit EMF-Visual

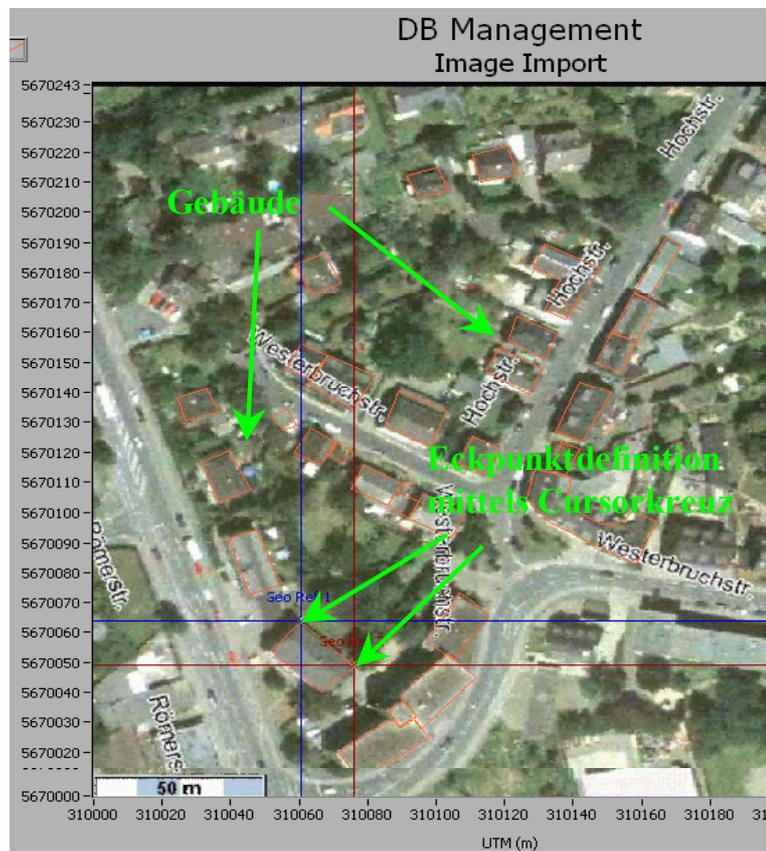


Bild 3.6.8: Gebäudemodellierung mit Quickplan

Bei der Software EMF-Visual ist an dieser Stelle zu beachten, dass die auf diese Weise generierten Gebäude später im Programm nur als „Dekoration“ auftauchen. Es können ihnen keine spezifischen Parameter bezüglich Material oder elektrischen und magnetischen Eigenschaften zugewiesen werden. Somit ist die Modellierung dieser „Gebäudehüllen“ nur als erster Schritt zu sehen. Nachfolgend können entweder Quader für das Gesamtgebäude oder horizontal bzw. vertikal ausgerichtete Flächen für die Gebäudeseiten bzw. das Gebäudedach benutzt werden, denen diese Parameter zugewiesen werden können. Diese müssen dann über Eingabefelder verschoben oder gedreht werden bis sie deckungsgleich sind. Es ist auch mit EMF-Visual nur schwer möglich, verwinkelte Häuser zu generieren.

Bei der Version 1.4.4 von Wireless Insite, die für diese Studie verwendet wurde, ist die Modellierung der Gebäude nur über die Kenntnis der Koordinaten möglich. So müssen die Eckpunkte der Gebäude in einem kartesischen Koordinatensystem eingegeben werden (siehe Bild 3.6.9). Mittels Überlagerung des Satellitenbildes mit einem Raster, können diese Informationen gewonnen werden. Ab der Version 2.0 ist es wie in den anderen Programmen auch möglich, ein Hintergrundbild zu importieren, was die Modellierung der Gebäude vereinfacht. Diese Version befindet sich momentan in der Auslieferung und konnte für diese Studie nicht mehr berücksichtigt werden.

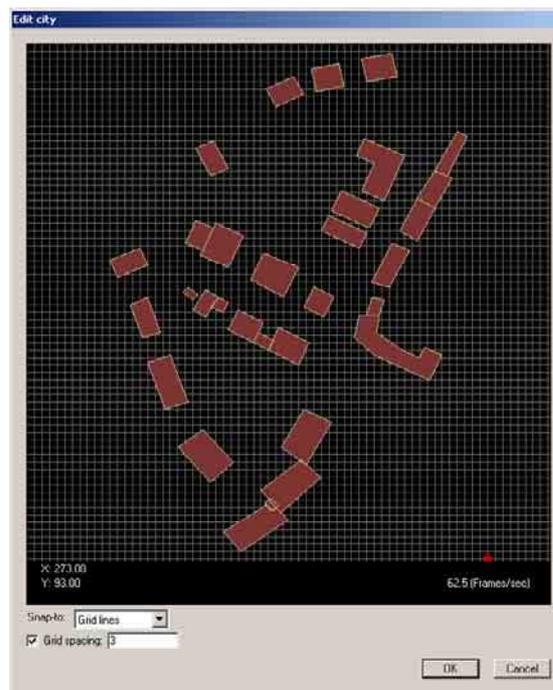


Bild 3.6.9: Einbinden der Gebäude in die Software Wireless Insite

Die obigen Beschreibungen zeigen schon relativ deutlich, dass bei der Modellierung der verschiedenen Gebäude Unterschiede zwischen den einzelnen Programmen und der wahren Umgebung nicht zu vermeiden sind.

Da es wie oben bereits beschrieben nicht möglich war, die genauen Höhendaten der Gebäude zu bekommen, wurden diese anhand der Anzahl der Stockwerke geschätzt. Als ein weiterer Anhaltspunkt diente in erster Linie bei Gebäuden, auf deren Dach sich die Mobilfunksendeanlage befand, die Montagehöhe der Mobilfunkantenne.

3.6.1.4 Behandlung von Materialien in den Softwarepaketen

Im folgenden Abschnitt wird die Behandlung von verschiedenen Materialien in den einzelnen Softwarepaketen näher betrachtet. Für die später durchgeführten Simulationen werden die Materialien verwendet, die in den Programmen bereits integriert sind. In Tabelle 3.6.2 ist ein Überblick über die Materialien und deren Behandlung in den Softwarepaketen zu sehen:

Software	Behandlung von Materialien					
EFC-400	Angabe eines globalen Dämpfungsfaktors für Gebäude in [dB].					
EMF-Visual	Material	Dicke [m]	Dämpfung [dB]			
	Stein		2,3			
	Beton	0,23	15			
		0,33	20			
	Glas		1			
	Beton		9,7			
	Leichtbeton		5,3			
	PEC		1,6			
	Plywood		1,9			
	Holz		0,7			
verstärkter Beton		13,2				
Wireless Insite	Typ	Beschreibung	Permittivität	Leitfähigkeit [S/m]	Dicke [m]	
	Dielektrikum-Schicht	Stein	4,44	0,001	0,125	
		Beton	15	0,015	0,3	
		Holz	5	0	0,03	
	Dielektrikum-Ebene	Trockene Erde	4	0,001		
		Nasse Erde	25	0,02		
		Glas	2,4	0	0,003	
		Meerwasser	81	20		
		Frischwasser	81	0,22		
	3-Schicht-Dielektrikum	1	2,8	0,001	0,013	
		2	1	0	0,89	
		3	2,8	0,001	0,013	
	Biophysical (ab Version 2.0) -> siehe Bild 3.6.10					
	Quickplan		Permittivität	Leitfähigkeit [S/m]		
Standardmaterial		4,44	0,01			
Fieldview	Basiert auf reiner Freiraumausbreitung ohne Berücksichtigung von Materialien.					
Feko / Empire	Durch Angabe materialspezifischer Parameter können Einflüsse von jedem Material auf elektromagnetische Wellen mit diesen Progr. simuliert werden.					

Tabelle 3.6.2: Vergleich der in den Softwarepaketen integrierten Materialien

Ergänzend zu dem Programm Wireless Insite wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass ab der Programmversion 2.0 auch die Möglichkeit besteht, Vegetation in der Simulation zu berücksichtigen. Die Eingabemaske mit ihren verschiedenen Parametern ist in Bild 3.6.10 zu sehen.

Insgesamt wird aus der obigen Tabelle deutlich, dass erstens unterschiedliche Materialien in den Programmen implementiert sind und diese darüber hinaus in differierender Art und Weise behandelt werden. Daraus kann geschlossen werden, dass sich diese Unterschiede in den Simulationsergebnissen niederschlagen werden.

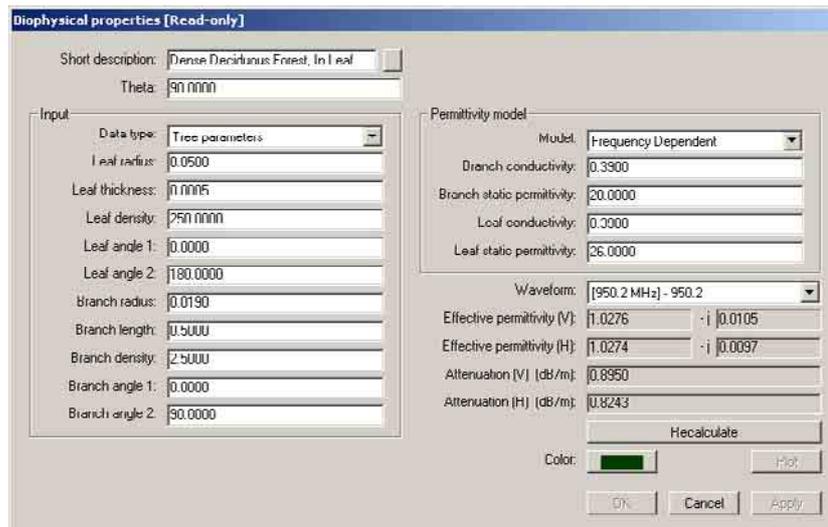


Bild 3.6.10: Biophysikalische Eigenschaften der Vegetation in Wireless Insite (ab Version 2.0)

In den folgenden Berechnungen wird bei EFC-400 ein globaler Dämpfungsfaktor von 3 dB für die Gebäude verwendet. Dieser ist in der Software voreingestellt. Darüber hinaus entspricht er in etwa dem Steinmaterial bei EMF-Visual und kommt im Vergleich mit den anderen Baumaterialien am ehesten der Forderung einer Worst Case Berechnung nach, wonach die Immission nicht unterschätzt werden darf.

3.6.1.5 Basisstationsparameter

Es können mit den im folgenden untersuchten Softwarepaketen Szenarien behandelt werden, bei denen mehrere Antennen an einem Standort konzentriert sind. Ein wichtiger Basisstationsparameter ist hierbei die Abstrahlcharakteristik der verwendeten Mobilfunkantennen. Diese wird nach dem in Abschnitt 3.4.5 beschriebenen Verfahren unter der Berücksichtigung des von Mobilfunkbetreibern bei der RegTP beantragten Betriebsbereiches bzgl. der Downtilts bearbeitet. Die so erhaltene MSI-Datei kann bei EFC-400, Quickplan und Wireless Insite importiert werden. Bei Quickplan kann es zu einer Fehlermeldung kommen, wenn die MSI-Datei eine „Comment“-Zeile enthält, in der zusätzliche Informationen untergebracht sind. Wird diese entfernt, kann das Abstrahlendiagramm ohne Probleme eingebunden werden.

Bei den Evaluierungsbeispielen hat sich hierbei gezeigt, dass das Programm „Wireless Insite“ beim Import der MSI-Datei einen Fehler macht. Die dreidimensionale Antennenabstrahlung wird falsch generiert, so dass nur die Abstrahlcharakteristik eines isotropen Kugelstrahlers entsteht. Hierdurch würde das Simulationsergebnis natürlich sehr stark verfälscht werden. Eine andere Methode zum Import eines Antennendiagramms besteht darin, die Charakteristik in Form eines dreidimensionalen Abstrahlendiagramms einzulesen. Es muss demnach aus der MSI-Datei bestehend aus horizontalem und vertikalem Schnitt eine dreidimensionale Abstrahlcharakteristik modelliert werden. Hierzu existieren verschiedene Verfahren (vgl. z.B. [GIL 01]).

Für diese Studie wurde folgende Variante benutzt: Die vertikale Antennencharakteristik wird hierbei einfach um die z-Achse gedreht und mit einem Faktor, der aus dem horizontalen Abstrahlendiagramm entnommen wird, gewichtet. Dieses geschieht sowohl mit der Vorderseite

(Hauptstrahlrichtung) als auch mit der Rückseite. Zur Veranschaulichung ist die prinzipielle Vorgehensweise in Bild 3.6.11 zu sehen.

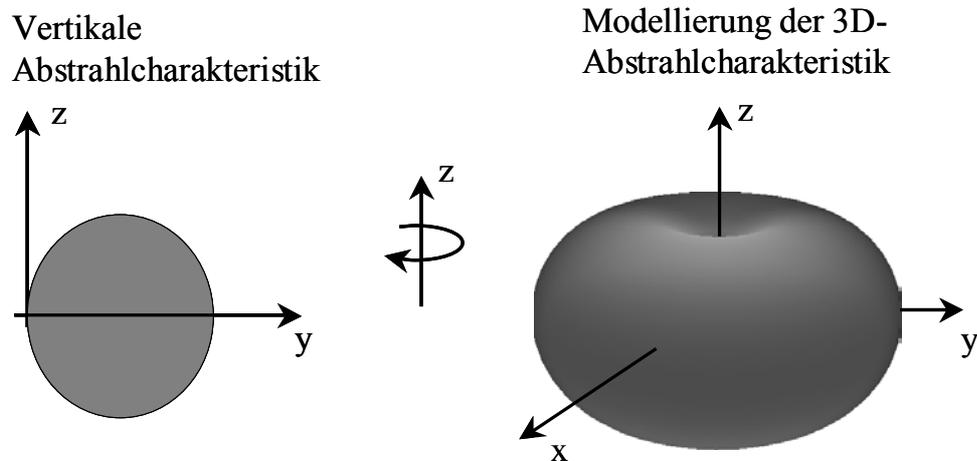


Bild 3.6.11: Dreidimensionale Modellierung der Antennenabstrahlcharakteristik aus dem vertikalen Schnitt.

Im Gegensatz dazu verwendet EMF-Visual eine ganz andere Art der Antennenmodellierung. Die Basisstationsantennen werden in der Software nicht als Punktquellen behandelt, sondern werden aus sogenannten Unit-Cells zusammen gesetzt. In der Datenbank von EMF-Visual in der Version 2.0 sind gängige Mobilfunkantennen der Firma Kathrein enthalten. Es ist ferner auch möglich mit Eingabe der vertikalen und horizontalen Strahlungsbreite, der Anzahl der Unit-Cells und deren Abstand, der Dämpfung des ersten Nebenzipfels, des Front to Back Verhältnisses der Leistung und der Phase eine Antenne selbst zu synthetisieren.

Zu beachten ist, dass generell keine Fernfelddiagramme importiert werden können. Dies hat zur Konsequenz, dass die in Abschnitt 3.4 vorgestellte Hüllkurvennäherung nicht angewendet werden kann. Es ist demnach mit EMF-Visual nur möglich, *einen* Betriebszustand der Mobilfunksendeanlage (z.B. fest eingestellter elektrischer Downtilt) zu simulieren. Da es sich bei den im nächsten Abschnitt beschriebenen Messungen aber auch um die Aufnahme *eines* Betriebszustandes handelt, kann EMF-Visual auch zu einem Vergleich mit den erhaltenen Messwerten herangezogen werden.

Für die Simulationen, auf die im nächsten Kapitel näher eingegangen wird, wurden die Antennen aus der Datenbank von EMF-Visual verwendet. Da diese wie oben bereits beschrieben aus Unit-Cells aufgebaut sind, existiert kein vergleichbares Fernfelddiagramm der Abstrahlung. Um dieses dennoch vergleichen zu können, wurde eine Abstrahlcharakteristik aus einer Simulation gewonnen. Hierzu wurden die Leistungsflussdichtewerte auf einer Kreisbahn im Azimutschnitt der Mobilfunkbasisstation berechnet und auf den hierbei stärksten auftretenden Wert normiert. Der Vergleich zwischen dem hieraus erhaltenen Abstrahldiagramm, der Charakteristik aus den Herstellerdaten und dem neu synthetisierten Diagramm ist in Bild 3.6.12 zu sehen. Auffällig ist hierbei, dass sich die Abstrahlcharakteristiken zwischen Hersteller und simulierter Antenne bei einigen Winkeln deutlich unterscheiden.

In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass sich die Unterschiede in der Abstrahlcharakteristik der Antennen in den einzelnen Softwarepaketen auch in einen Unterschied bei den Berechnungsergebnissen niederschlagen können.

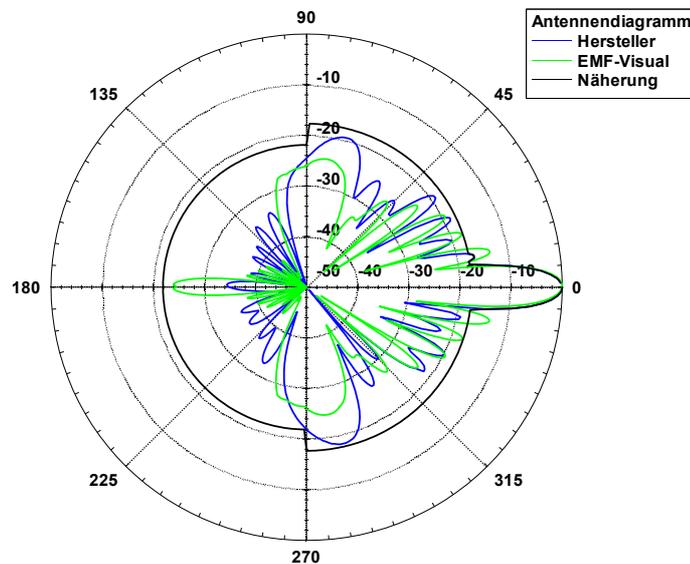


Bild 3.6.12: Vergleich zwischen Antennendiagramm in EMF-Visual zu den Herstellerangaben und den bearbeiteten Diagramm nach Abschnitt 3.4 für die Antenne K 741324 bei 900 MHz

Des weiteren muss bei der Anwendung der Programme genau auf die Antennenausrichtung geachtet werden. So entspricht in den Programmen die azimutale 0°-Richtung nicht unbedingt der geografischen Nord-Richtung. Der Vollständigkeit halber sei an dieser Stelle noch die Elevation erwähnt, bei der in den untersuchten Softwarepaketen bei positiven Winkeln sowohl gegen als auch mit dem Uhrzeigersinn gedreht wird. Durch die Synthese der Abstrahlcharakteristik kann die Elevation in den Berechnungen aber vernachlässigt werden. Die Werte aus der Standortbescheinigung sind demnach nicht einfach zu übernehmen, sondern müssen gegebenenfalls noch umgerechnet bzw. angepasst werden. Die folgende Grafik (Bild 3.6.13) stellt die verschiedenen Richtungen und Drehwinkel in den einzelnen Softwarepaketen dar. Der Fußpunkt des Pfeils entspricht hierbei der 0°-Richtung.

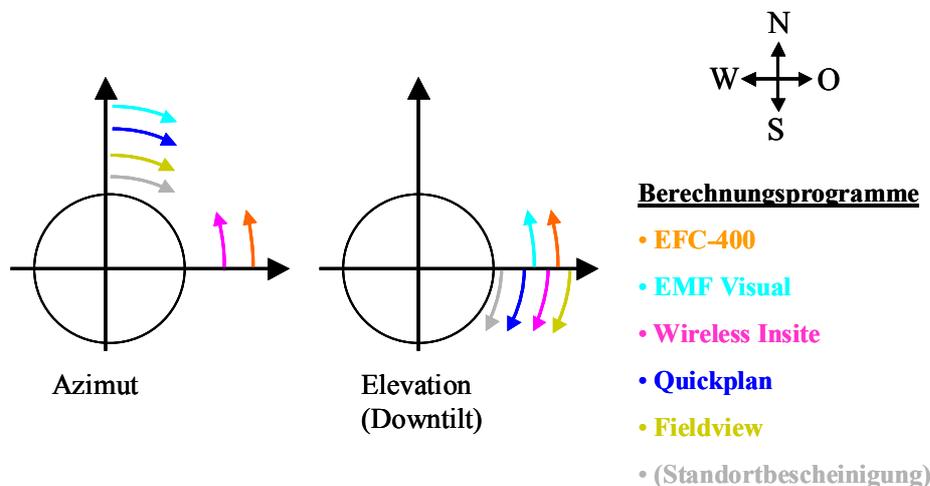


Bild 3.6.13: Vergleich der jeweiligen Richtungen und Drehwinkel für Azimut und Elevation in den einzelnen Softwarepaketen und der Standortbescheinigung

Darüber hinaus bezieht sich wie oben bereits angesprochen, die Montagehöhe auf die Antennenunterkante. Hier muss je nach Simulationsprogramm noch die Antennenhöhe variiert werden.

Zusammenfassend kann an dieser Stelle festgehalten werden, dass sich durch die Art und Weise der Modellierung sowohl der dreidimensionalen Simulationsumgebung als auch bei den Antennenabstrahldiagrammen Unterschiede zwischen den einzelnen Programmen ergeben und daher damit zu rechnen ist, dass diese sich auch in differierenden Berechnungsergebnissen niederschlagen.

3.6.1.6 Darstellung der Simulationsergebnisse

Der folgende Abschnitt beschäftigt sich mit der Darstellung der Simulationsergebnisse in den einzelnen Simulationsprogrammen. Hier wird nur ein kurzer Überblick über die Unterschiede zwischen den einzelnen Softwarepaketen gegeben. Im Detail werden die verschiedenen Aspekte in den nächsten Abschnitten beschrieben.

In den Messungen wurde als Einheit für die Immission die elektrische Feldstärke in der Einheit „dB μ V/m“ gewählt. Für einen direkten Vergleich der Berechnungsergebnisse sowohl zu den Messungen, als auch der Softwarepakete untereinander, wäre es wünschenswert, diese auch in „dB μ V/m“ zu erhalten.

Die Software EFC-400 ermöglicht die Ergebnisdarstellung als elektrische bzw. magnetische Feldstärke, als Leistungsflussdichte sowie als Prozent der Grenzwerte, die in der 26. BImSchV verankert sind. In dem zweidimensionalen Berechnungsgebiet kann der Wert der Immission mittels eines Cursors an einem beliebigen Ort ausgelesen werden. Ferner ist es möglich die Simulationsebene als Matrix mit jeweiligen Koordinaten und zugehörigem Berechnungsergebnis zu exportieren. Die Einheit der elektrischen Feldstärke ist in V/m gegeben, so dass noch eine Umrechnung in das gewünschte Format dB μ V/m außerhalb des Programms geschehen muss.

Die Software EMF-Visual ermöglicht die Ergebnisdarstellung in dB μ V/m. Der Verlauf der Berechnungsgröße wird hier wie bei EFC-400 im Berechnungsgebiet durch einen Farbverlauf symbolisiert. Um das exakte Ergebnis an einem bestimmten Ort zu erhalten, können die Resultate in eine Datei exportiert werden. Dieses ist mit einem Zusatztool möglich, das die Werte des Simulationsraumes in Form einer Tabelle abspeichert. Es sind ebenfalls die jeweiligen Koordinaten und der zugehörige Berechnungswert enthalten.

Bei der Software Wireless Insite ist kein Simulationsraum gegeben, sondern es müssen sogenannte Empfangsantennen an beliebigen Punkten platziert werden. An diesen Punkten erhält man dann die Immission als Empfangsleistung in dBm. Die berechneten Ergebnisse werden auch durch eine Farbe repräsentiert und in einer Datei abgespeichert.

Um einen Vergleich zu den anderen verwendeten Softwarepaketen und zu den Messungen herstellen zu können, muss eine Umrechnung von dBm in die Einheit dB μ V/m geschehen (siehe folgende Formeln (3.6.1), (3.6.2)). Hierbei ist zu beachten, dass es sich bei den Empfangsantennen um isotrope Kugelstrahler handelt.

$$P_e(W) = 10^{(P(\text{dBm})/10)/1000} \quad (3.6.1)$$

$$E \left(\text{dB} \frac{\mu\text{V}}{\text{m}} \right) = 20 * \log \left(\sqrt{P_e * Z_{F0} * 4\pi * f^2 / c_o^2} / 1 \frac{\mu\text{V}}{\text{m}} \right) \quad (3.6.2)$$

Bei Quickplan sind die Berechnungsergebnisse in dB μ V/m darstellbar. In der Software existieren drei verschiedene Berechnungsvarianten. Wie bei der Software Wireless Insite ist es möglich, beliebige *Punkte* zu definieren. An diesen Punkten werden dann die einzelnen einfallenden Strahlen berechnet. Die Immission für jeden einzelnen dieser Strahlen kann separat betrachtet werden. Eine Summation erfolgt in der Version 1.3.6 aufgrund der fehlenden Phaseninformation nicht. Ferner ist es möglich eine sogenannte *Oberflächenberechnung* durchzuführen. Hierbei werden alle Oberflächen (z.B. Gebäude, Boden) programmintern mit Punkten in einem Abstand von 1,5 m bedeckt, für die die einfallenden Strahlen berechnet werden. Für jeden Punkt wird nur der größte Immissionswert aller einfallenden Strahlen abgespeichert, so dass eine flächige Darstellung der Berechnungsgröße möglich ist, die durch eine Farbverteilung symbolisiert wird. Die dritte Berechnungsvariante ist die *Volumenberechnung*. Hierbei kann ein Simulationsraum bestimmt werden (in der Version 1.3.6 ist die Antenne der Mittelpunkt), in dem analog zu der Oberflächenberechnung die Immission an Punkten mit 1 m Distanz berechnet wird.

Zusammenfassend kann an dieser Stelle festgehalten werden, dass ein direkter Vergleich der Ergebnisse der einzelnen Programme nicht möglich ist. Sind zum einen die berechneten Immissionswerte nicht generell in der gleichen Einheit verfügbar, ist auch ein Unterschied im farblichen Verlauf möglich. Es können zwar Maximal und Minimalwert bei allen Programmpaketen eingestellt werden. Die dazugehörige Legende kann aber generell unterschiedlich skaliert sein, so dass die gleiche Farbe nicht unbedingt in allen Programmen der gleichen Immission entspricht. Dieses ist auch darin begründet, dass einige Programme eine lineare Darstellung der Ergebnisse zeigen (EFC-400), wohingegen andere die Ergebnisse in logarithmischer Darstellung zeigen (z.B. Wireless Insite).

3.6.2 Basisstationsstandort: Handelsstraße 76, 46519 Alpen

Der folgende Vergleich zwischen Messung und Berechnungsergebnissen entspricht dem ersten der oben angegebenen Szenarien. Hierbei befindet sich die Basisstation in ländlicher Umgebung auf freiem Feld. Es repräsentiert Freiraumausbreitung mit Bodenreflexion.

In Bild 3.6.14 ist die Mobilfunkanlage in der Aufsicht auf einem Satellitenbild und der Seitenansicht abgebildet. Mit HSR ist die Hauptstrahlrichtung der Sendeantenne gemeint, deren BCCH Kanal der anschließenden Berechnung zu Grunde liegt.

Wie oben bereits beschrieben, ist ein Vergleich der Immission an einem bestimmten Punkt aufgrund der örtlich kleinskaligen Immissionschwankungen nicht sinnvoll. Deswegen wird hier (wie auch bei den Messungen) eine Maximalsuche in einem Volumen bzw. Gebiet angewendet.

Die Simulationsergebnisse werden für das gezeigte Areal dargestellt (Bild 3.6.14). Der daran anschließende Vergleich mit den Messungen findet in dem gekennzeichneten Vergleichsgebiet statt.



Bild 3.6.14: Mobilfunksendeanlage: Handelsstraße 76, 46519 Alpen

Die folgenden Tabellen geben einen Überblick über das hier untersuchte Szenario und enthalten die verschiedenen Angaben über den Sektor der Mobilfunkbasisstation. Diese entsprechen den Parametern, die in der Simulation benutzt werden. Hierbei ist zu beachten, dass abhängig vom Softwarepaket die Leistung am Antenneneingang entweder in Watt oder in dBm angegeben werden muss. Die Höhe in Tabelle 3.6.4 bezieht sich hierbei auf die Unterkante der Mobilfunkantenne. In den Softwarepaketen kann hinzukommend entweder die Länge der Antenne angegeben, oder die Höhe muss um die halbe Antennenlänge vergrößert werden.

Szenario:	(1)		
Charakteristik der Basisstation:	Freistehender Mast auf einem Feld (ländlich)		
	Ort	Sicht zur Basisstation	laterale Entfernung zur Basisstation in [m]
Vergleichsgebiet	Feldweg	direkt (LoS)	150

Tabelle 3.6.3: Überblick über das untersuchte Szenario

Ort: Handelsstraße 76 46519 Alpen						
Frequenz [MHz]	HSR [°]	Höhe [m]	Downtilt mechanisch [°]	Downtilt elektrisch [°]	Antenne und Länge [m]	BCCH-Leistung am Antenneneingang [W]
946,6	290	30,2	3	0	K 739 648 1,296	6,46

Tabelle 3.6.4: Simulationsparameter

Im folgenden werden die Simulationsergebnisse der einzelnen getesteten Softwarepakete vorgestellt. Es wird jeweils die Berechnungsebene in einer Höhe von 2 m über dem Erdboden

in den Bildern dargestellt. Der für den Vergleich mit der Messung herangezogene Wert ist die maximale Feldstärke aus den Ebenen in 1,8 m, 1,9 m bzw. 2 m Höhe. Bei den Farbschemata entspricht der Maximalwert hierbei einer Immission von $140 \text{ dB}\mu\text{V/m}$ (10 V/m) und der Minimalwert von $50 \text{ dB}\mu\text{V/m}$ ($0,0003 \text{ V/m}$). Im Anschluss folgt ein Vergleich der maximalen Immission in dem bereits oben beschriebenen Vergleichsgebiet.

In Bild 3.6.15 sind die Resultate für das Programm EFC-400 dargestellt. Die Simulationsebene befindet sich hierbei in einer Höhe von 2 m über dem Grund. Da es sich bei dem Boden um trockenen Asphalt umgeben von trockener Wiese handelte wurde ein Bodenreflexionsfaktor von 1,7 bzgl. der Leistungsflussdichte angenommen (vgl. [BLA 00]). Der Standort der Basisstation ist mit BS gekennzeichnet.

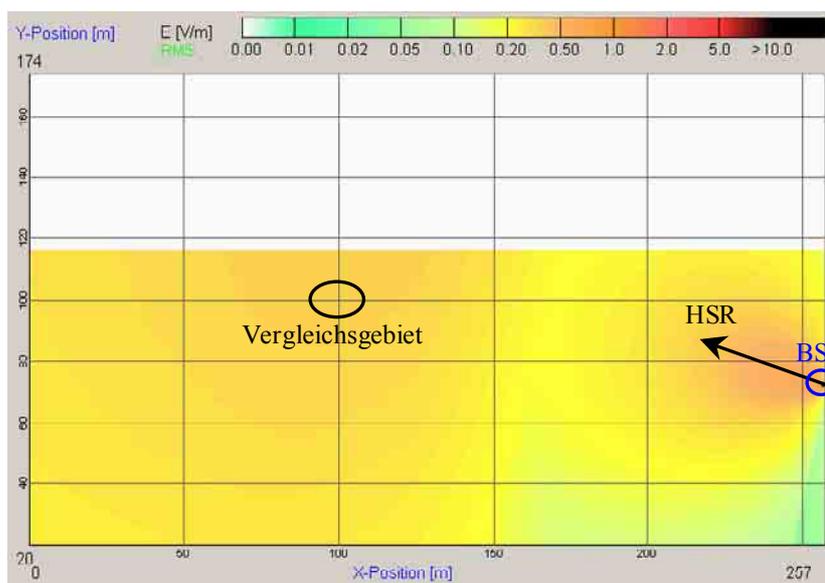


Bild 3.6.15: Simulationsergebnis für das Programm EFC-400

In Bild 3.6.16 ist das Simulationsergebnis, das mit dem Softwarepaket EMF-Visual berechnet wurde zu sehen.

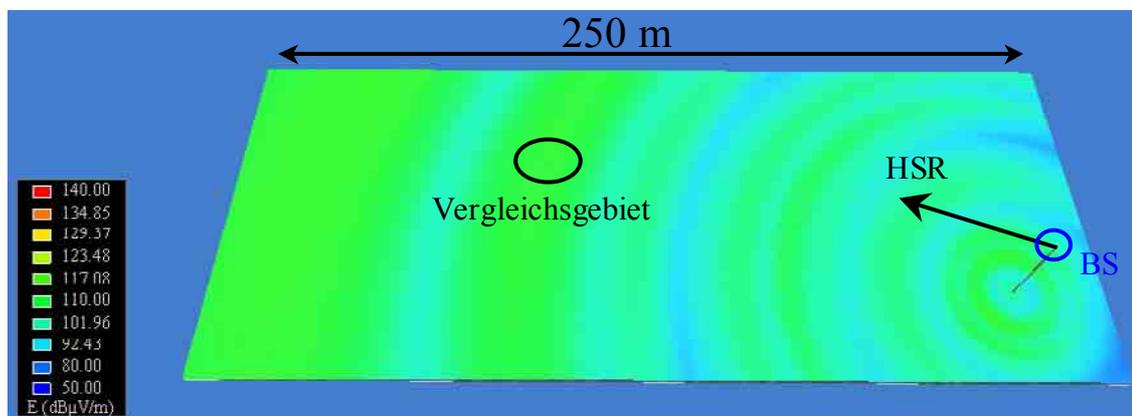


Bild 3.6.16: Simulationsergebnis für das Programm EMF-Visual

Diese beiden ersten Darstellungen der Simulationsergebnisse zeigen, dass ein direkter Vergleich aus den Bildern schwierig ist. Trotz der gleichen Immissionsgrenzen für die Farbsche-

mata sind die Farben aufgrund von unterschiedlicher Skalierung und Farbwahl nicht identisch.

Im folgenden Bild (Bild 3.6.17) sind die Resultate für die Simulation mit dem Programm Wireless Insite zu sehen. Die Grenzen für das Farbschemata wurden so bestimmt, dass sie wie bei den anderen Programmen auch 140 bzw. 50 dB μ V/m entsprechen.

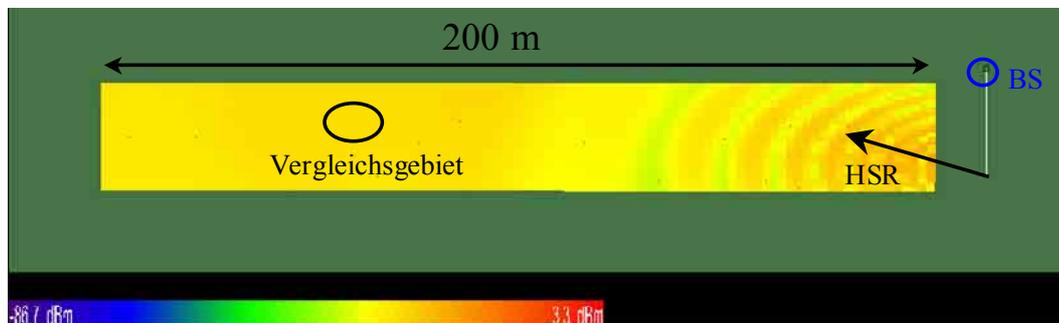


Bild 3.6.17: Simulationsergebnis für das Programm Wireless Insite

Auch hier bestätigt sich wieder, dass ein Farbvergleich und somit ein Vergleich der Immissionsverteilung zwischen den Programmen schwierig ist. Ferner wird auch ein weiterer Unterschied deutlich. Im Bereich der Nebenzipfel sind sowohl bei EMV-Visual als auch bei Wireless Insite Differenzen zu EFC-400 zu erkennen. Diese sind einerseits in der anderen Behandlung der Antennenabstrahlcharakteristik der Mobilfunkantenne bei EMF-Visual begründet, andererseits wird die Bodenreflexion bei EFC-400 in einer anderen Weise berücksichtigt. Hier wird auf den Berechnungswert ein Faktor, der als Maß für die Bodenreflexion gilt, aufgeschlagen, während bei den anderen Programmen eine exakte Berücksichtigung der Ausbreitungswege erfolgt.

In den folgenden zwei Bildern sind die Simulationsergebnisse für das Softwarepaket Quickplan sowohl in zweidimensionaler (Bild 3.6.18) als auch dreidimensionaler (Bild 3.6.19) Darstellungsweise zu sehen.

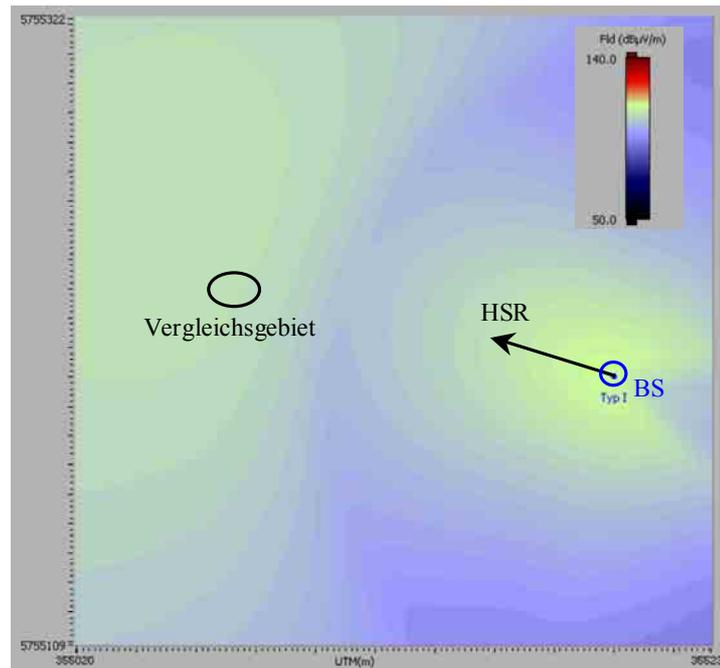


Bild 3.6.18: Simulationsergebnis für das Programm Quickplan, zweidimensional

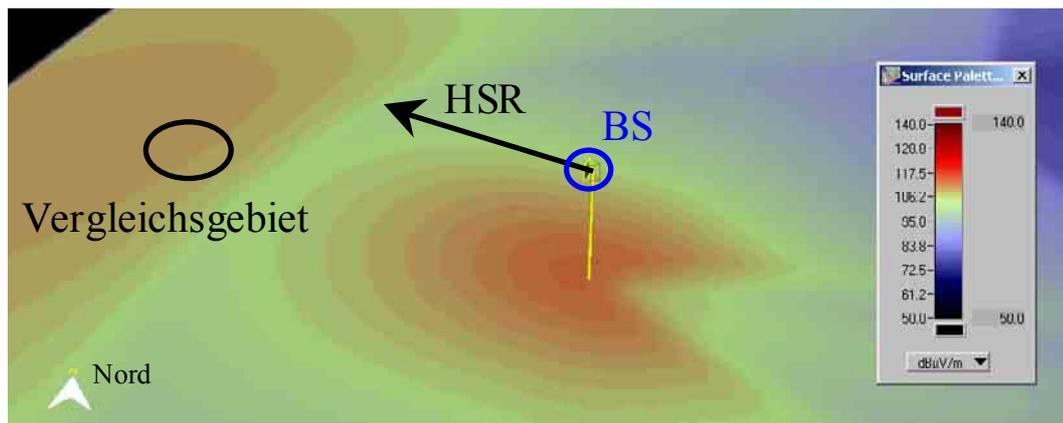


Bild 3.6.19: Simulationsergebnis für das Programm Quickplan, dreidimensional

Auch hier ist ein deutlicher Unterschied in den Farben zu sehen. Selbst innerhalb des Programms sind in der Darstellung der Ergebnisse trotz gleicher Grenzen von 140 und 50 dB μ V/m Differenzen in der Farbgebung sichtbar. Interferenzerscheinungen wie sie bei Wireless Insite durch die Bodenreflexion bedingt auftreten, sind bei dieser Simulation nicht zu erkennen, weil die Oberflächenberechnung (s.o.) durchgeführt wurde. Hierbei wird nur der Immissionswert des stärksten Strahls dargestellt. Hinzukommend ist ein Einzug der der Hauptstrahlrichtung entgegengesetzten Richtung zu erkennen. Dieses ist einem Fehler in der programminternen dreidimensionalen Interpolation der Abstrahlcharakteristik zuzuordnen, der in der nächsten Version von Quickplan (2.0) behoben sein soll.

In dem folgenden Diagramm (Bild 3.6.20) werden die Ergebnisse aus den Simulationen mit denen aus der Messung verglichen. Maß für die Größe der Immission ist wie vorher beschrieben die elektrische Feldstärke in der Einheit dB μ V/m. Mit dem Programm Fieldview wurde

außer der Reihe noch eine Berechnung mit reiner Freiraumausbreitung und einer Erhöhung der Sendeleistung um +3dB als Worst Case Betrachtung für die Bodenreflexion durchgeführt.

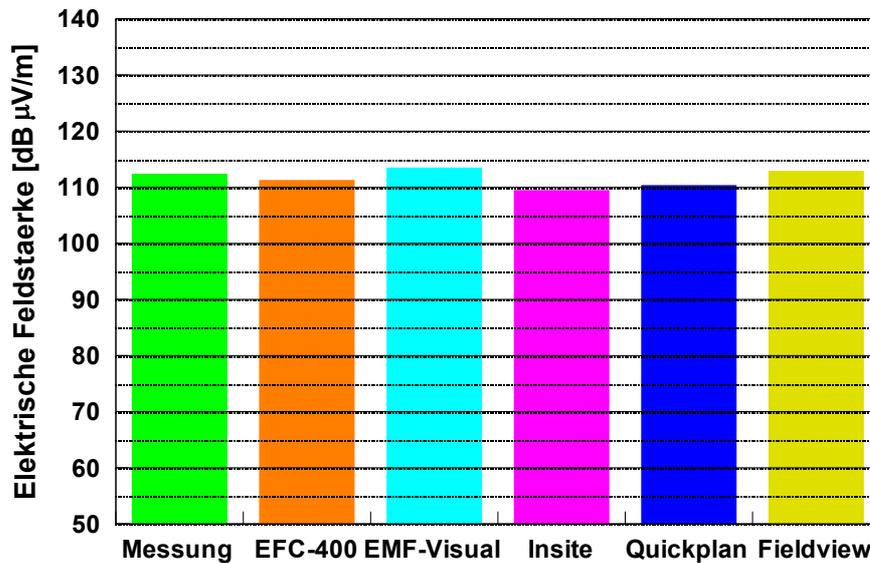


Bild 3.6.20: Vergleich der Simulations- bzw. Messwerte für den Basisstationsstandort Handelsstraße 76 (Alpen) im Vergleichsgebiet (LoS)

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Vorhersagen der betrachteten Programme nahezu übereinstimmen. Ferner stellt die Freiraumausbreitung inklusive eines Zuschlags von 3 dB bzgl. der Bodenreflexion den Maximalwert dar. Die geringen Unterschiede in den Berechnungsergebnissen lassen sich mit den in Abschnitt 3.4.5 getroffenen Feststellungen begründen.

3.6.3 Basisstationsstandort: Hochstraße 1-3, 47443 Moers

Der nächste untersuchte Basisstationsstandort liegt in der Hochstraße 1-3 in Moers. Die Sendeanlage befindet sich im Gegensatz zu dem vorherigen Beispiel im Stadtgebiet. Im Vergleich zu Szenario 1 unterscheidet sich die hier untersuchte Konfiguration durch die Gebäude, die daraus resultierende Dämpfung und den Reflexionsmechanismen. Die Mobilfunkantenne ist an einem Sendemast auf dem höchsten Gebäude in der näheren Umgebung montiert. Die übrige Bebauung ist gleichmäßig niedriger. In Bild 3.6.21 ist wieder die Aufsicht mit der dazugehörigen Hauptstrahlrichtung der betrachteten Sektorantenne und die Seitenansicht des Standortes zu sehen. Ferner sind die Orte der beiden Vergleichsgebiete mit den rot umrandeten Flächen markiert. Hierbei sei erwähnt, dass im Vergleichsgebiet 2 direkte Sicht zur Antenne herrschte (Line of sight – LoS), während das Vergleichsgebiet 1 im Schatten eines Hauses lag, also keine direkte Sicht (non Line of sight – nLoS) zur Sendeanlage hatte.



Bild 3.6.21: Mobilfunksendeanlage: Hochstraße 1-3, 47443 Moers

Die folgenden Tabellen geben einen Überblick über das hier untersuchte Szenario und enthalten die verschiedenen Angaben über den Sektor der Mobilfunkbasisstation. Diese entsprechen den Parametern, die in der Simulation benutzt werden. Hierbei ist zu beachten, dass abhängig vom Softwarepaket die Leistung am Antenneneingang entweder in Watt oder in dBm angegeben werden muss.

Szenario:	(2), (3)		
Charakteristik der Basisstation:	Basisstation auf wesentlich höherem Gebäude; viele kleine Gebäude		
	Ort	Sicht zur Basisstation	laterale Entfernung zur Basisstation in [m]
Vergleichsgebiet 1	Straße	indirekt (nLoS)	85
Vergleichsgebiet 2	Straße	direkt (LoS)	160

Tabelle 3.6.5: Überblick über das untersuchte Szenario

Ort: Hochstraße 1-3 (Ecke Römerstraße) 47443 Moers						
Frequenz [MHz]	HSR [°]	Höhe [m]	Downtilt mechanisch [°]	Downtilt elektrisch [°]	Antenne und Länge in [m]	BCCH-Leistung am Antenneneingang [W]
952	0	23,65	5	6 (fix)	K 739 658 1,296	7,41

Tabelle 3.6.6: Simulationsparameter

Die Simulationsergebnisse der verschiedenen Softwareprogramme für den in diesem Kapitel betrachteten Basisstationsstandort sind in den folgenden Bildern dargestellt. Die Berechnungsebenen befinden sich analog zu dem vorherigen Beispiel in 1,8 m, 1,9 m und 2 m Höhe über dem Erdboden. Es werden wieder die Berechnungsergebnisse in einer Höhe von 2 m

präsentiert. Im folgenden Bild sind die Resultate in zweidimensionaler Darstellung zu sehen, die mit EFC-400 simuliert wurden. Die Gebäude wurden bei dieser Berechnung mit einem globalen Dämpfungsfaktor von 3 dB berücksichtigt (vgl. auch [BOR 97]). Dieser entspricht dem voreingestellten Wert in der Software. Eine Verringerung der Immission im Schatten von Häusern ist deutlich zu erkennen.

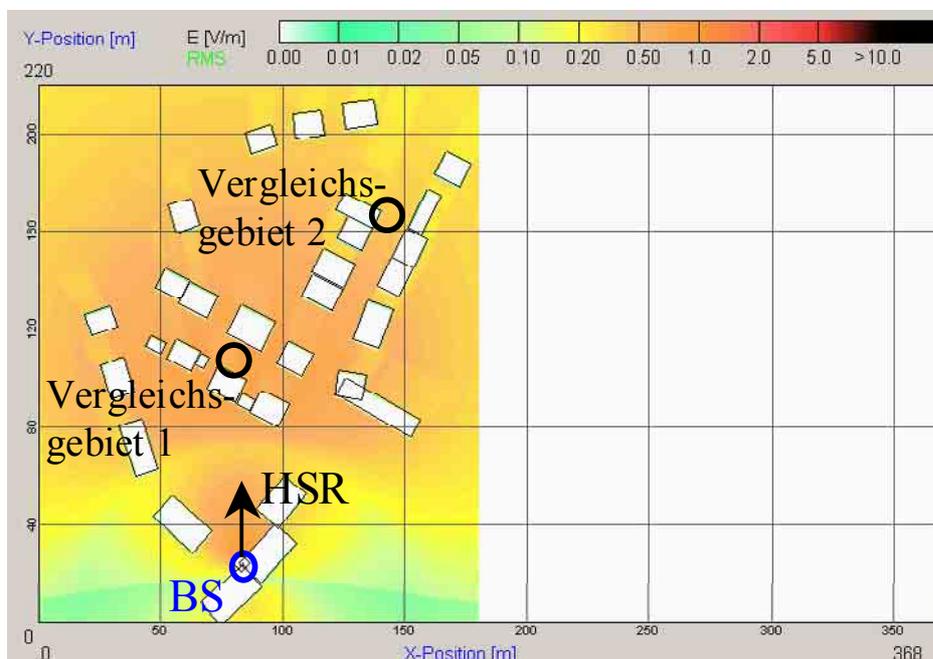


Bild 3.6.22: Simulationsergebnis für das Programm EFC-400, zweidimensional

Das Programm EFC-400 ermöglicht ferner eine dreidimensionale Darstellung der Simulationsumgebung (vgl. Bild 3.6.23). Die Ergebnisse werden wie schon bei zweidimensionalen Darstellungsweise als flächige Farbverteilung angegeben.

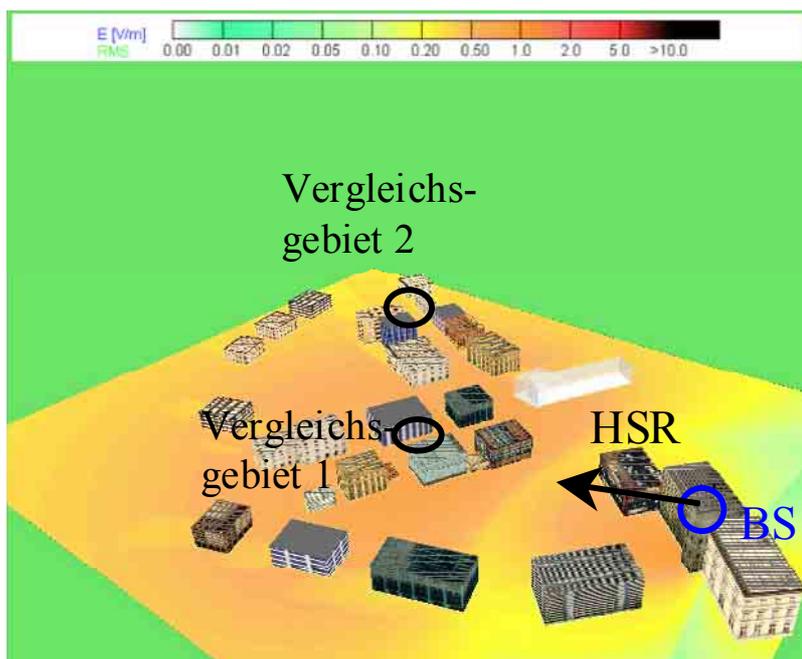


Bild 3.6.23: Simulationsergebnis für das Programm EFC-400, dreidimensional

Als nächstes werden die Ergebnisse, die mit der Software EMF-Visual berechnet wurden dargestellt. Anmerkend ist hierbei auch für eine spätere Beurteilung folgendes festzuhalten. Die Modellierung der Gebäude konnte über die Definition der Hauseckpunkte auf dem Satellitenbild durchgeführt werden. Das so geschaffene Szenario bestand wie oben bereits beschrieben aber nur aus den Häuserhüllen, die als Dekoration für die Berechnung nicht relevant waren. Hierzu mussten manuell Quader mit materialspezifischen Parametern eingefügt und den Häusern möglichst gut angepasst werden. Mit der Anzahl der so eingefügten Quader steigt die Rechenzeit für die Simulation stark an. Waren für alle Gebäude in der Simulation Quader eingefügt worden, gab das Programm eine Rechenzeit von mehr als 8 Tagen an (im Gegensatz zu Stunden bei den anderen Programmen). Diese Tatsache ist schon sehr verwunderlich, da ja beide Softwarepakete auf dem gleichen physikalischen Modell beruhen. Um die Rechenzeit zu reduzieren, wurde die Anzahl der Quader reduziert. Die folgenden Simulationsergebnisse beziehen sich auf eine maximale Anzahl von 15 Gebäuden, die im Umkreis der zu untersuchenden Vergleichsgebiete lagen. Hierdurch konnte die Rechenzeit auf ca. 1 Stunde reduziert werden. Aus diesem Grund wurden für beide Vergleichsgebiete separate Simulationen durchgeführt. In Bild 3.6.24 bzw. Bild 3.6.25 sind die Resultate dieser Berechnungen zu sehen.

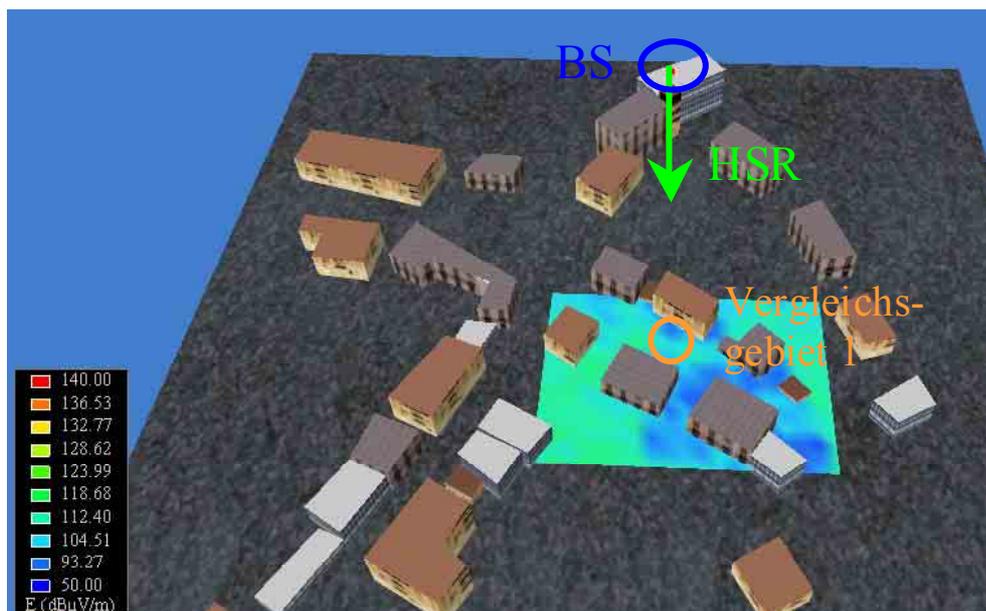


Bild 3.6.24: Simulationsergebnis für das Programm EMF-Visual, Vergleichsgebiet 1 (nLoS)



Bild 3.6.25: Simulationsergebnis für das Programm EMF-Visual, Vergleichsgebiet 2 (LoS)

Die Berechnungsergebnisse von Wireless Insite sind in Bild 3.6.26 zu sehen. Im Vergleichsgebiet 1 wurde ein Empfangspunkt ausgewählt, dessen unterschiedliche Empfangspfade zu sehen sind. Die Grenzen des Farbschemas entsprechen ebenfalls 140 bzw. 50 dB μ V.

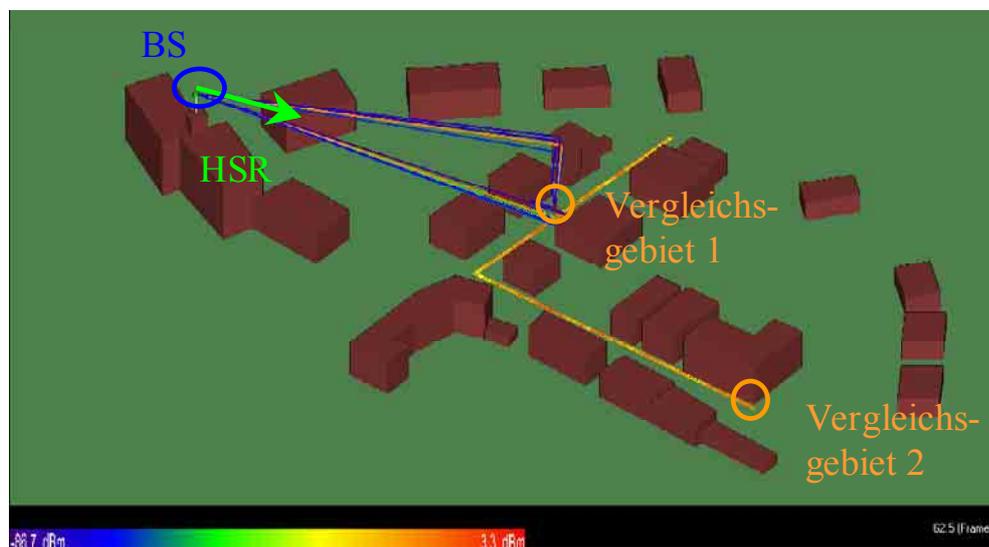


Bild 3.6.26: Simulationsergebnis für das Programm Wireless Insite

Abschließend zu dem hier betrachteten Basisstationsstandort sind in den nächsten beiden Bildern die Simulationsergebnisse dargestellt, die mit der Software Quickplan berechnet wurden.

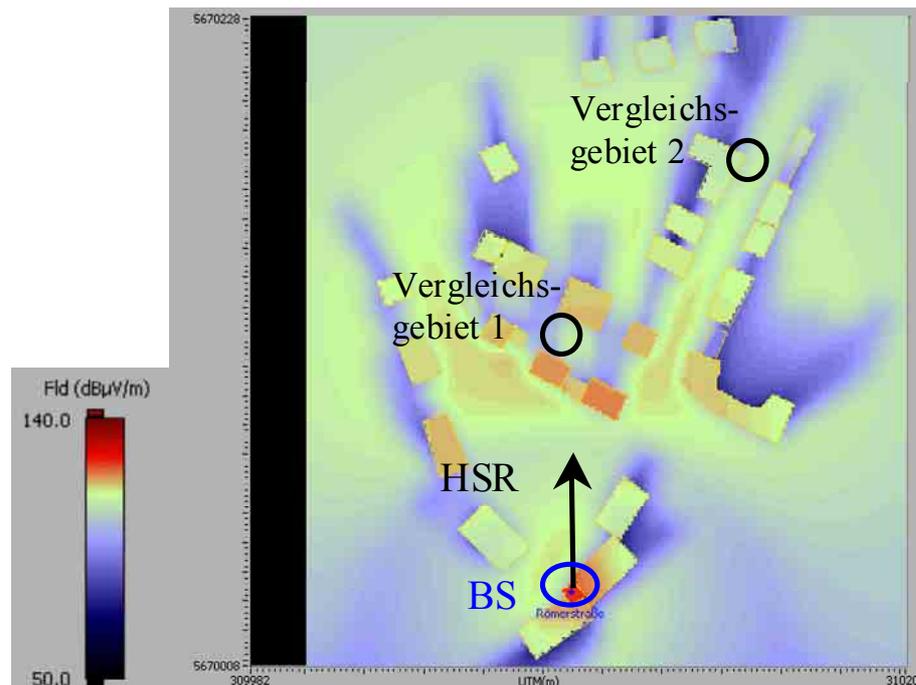


Bild 3.6.27: Simulationsergebnis für das Programm Quickplan, zweidimensional

Bei der zweidimensionalen Darstellung der Ergebnisse in Bild 3.6.27 ist an dieser Stelle wieder zu beachten, dass die Ergebnisse mittels der *Oberflächenberechnung* durchgeführt wurden und nur der Immissionswert des stärksten einfallenden Strahls betrachtet wird. In Bild 3.6.28 werden nun die Ergebnisse in der dreidimensionalen Darstellungsweise präsentiert. Im oberen Bild ist die Berechnungsvariante *TestPoint* aus Quickplan dargestellt. Hierzu werden in der Simulationsumgebung Punkte gewählt, von denen die einzelnen einfallenden Strahlen angezeigt werden können. Zudem kann der Immissionswert von jedem dieser Strahlen separat angezeigt werden. Es gibt keine Summation dieser einzelnen Teilstrahlen. Hierfür müsste das Verhalten aller Ausbreitungspfade und insbesondere der Phasen aller Teilwellen exakt bekannt sein. Bereits Ungenauigkeiten der Datenbanken in der Größenordnung einer Wellenlänge sowie die zeitlichen Änderungen in der Ausbreitungsumgebung verursachen erhebliche Schwankungen der Phasen mit der Folge, dass Feldstärkeunterschiede zwischen Simulation und den tatsächlichen Verhältnissen entstehen. Um dennoch die Immissionswerte der einzelnen Strahlen zu berücksichtigen, wurde für alle Simulationsergebnisse von Quickplan im Sinne einer Worst Case Betrachtung wie folgt vorgegangen: Die variierenden Phasen wurden vernachlässigt und lediglich die Leistungen der einzelnen Mehrwegsignale addiert. Durch diese Vorgehensweise sind Überschätzungen der tatsächlichen Immission möglich, die aber eine Aussage bezüglich einer Grenzwertkontrolle zu lassen.

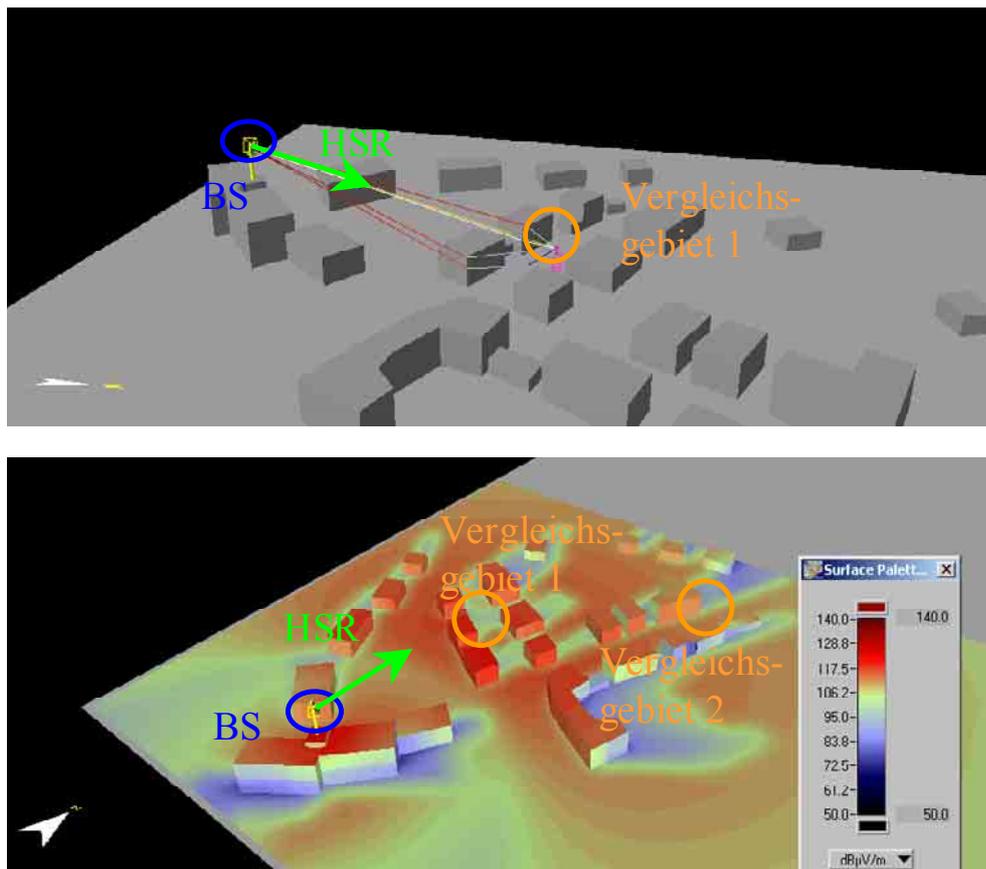


Bild 3.6.28: Simulationsergebnis für das Programm Quickplan, dreidimensional

Um die Resultate für die Vergleichsgebiete zu erhalten, wurden in diesen Regionen Testpunkte verteilt. Für jeden Testpunkt wurden die Immissionen der einzelnen Pfade leistungsmäßig addiert. Die hierbei erhaltene maximale elektrische Feldstärke wurde dann als Vergleich mit den anderen Programmen herangezogen.

Die Simulationsergebnisse der einzelnen Programme und das bei der Messung erzielte Resultat sind in den folgenden Abbildungen zu sehen. Wie bei der vorher betrachteten Basisstation wurde ebenfalls mit dem Programm Fieldview eine Simulation durchgeführt, um die Immission bei reiner Freiraumausbreitung mit berücksichtigter Bodenreflexion zu erhalten. In Bild 3.6.29 sind die Ergebnisse für das Vergleichsgebiet 1 mit nur indirekter Sicht zur Sendeantenne zu sehen.

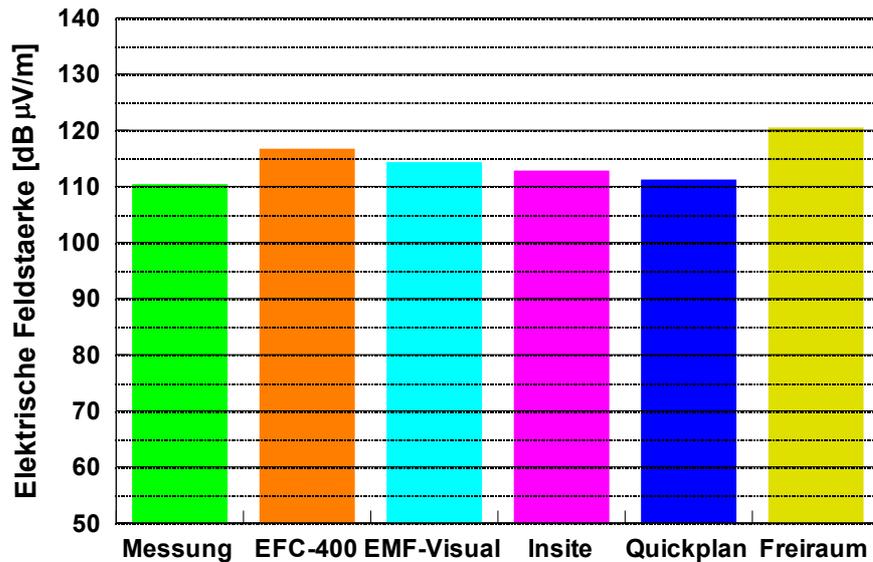


Bild 3.6.29: Vergleich der Simulations- bzw. Messwerte für den Basisstationsstandort Hochstraße 1-3 (Moers) im Vergleichsgebiet 1 (nLoS)

Hier kann als Ergebnis festgehalten werden, dass durch reine Freiraumausbreitung die Immision bei einer Expositionssituation, die keine direkte Sicht auf die Sendeantenne aufweist, deutlich überschätzt wird.

In Bild 3.6.30 sind die Maximalwerte der einzelnen Simulationen im Vergleichsgebiet 2 zu sehen. Durch die direkte Sicht zur Antenne ist der Unterschied zwischen strahlenoptischen und auf Freiraumausbreitung basierenden Programmen wesentlich geringer.

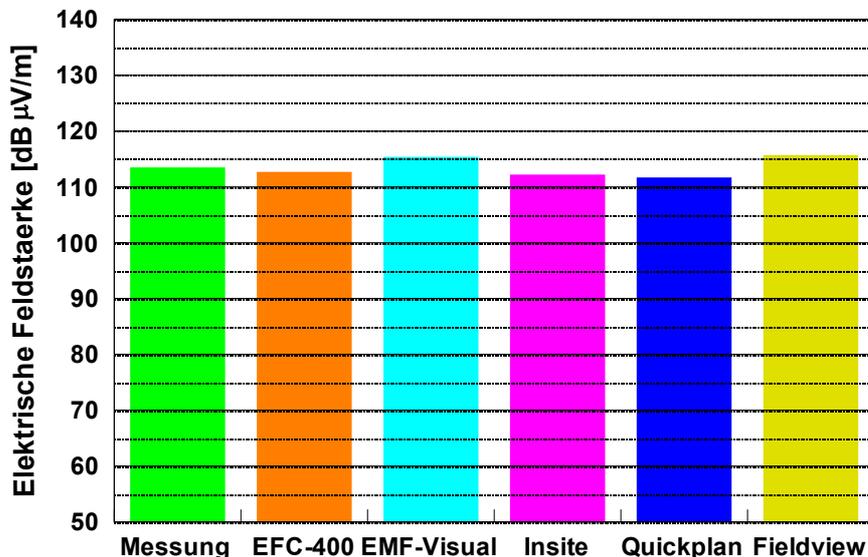


Bild 3.6.30: Vergleich der Simulations- bzw. Messwerte für den Basisstationsstandort Hochstraße 1-3 (Moers) im Vergleichsgebiet 2 (LoS)

3.6.4 Basisstationsstandort: Hombergerstraße 162, 47441 Moers

Im folgenden Abschnitt werden die Simulationsergebnisse für den Basisstationsstandort in der Hombergerstraße 162 in Moers vorgestellt. Die Mobilfunksendeanlage befindet sich auf einem der höchsten Gebäude in der Umgebung. Das untersuchte Gebiet weist Häuser mit geringerer Höhe auf. Im Gegensatz zu dem vorherigen Beispiel ist die Bebauung weniger dicht. Ferner existieren nicht viele kleine, sondern nur einige große Gebäude. Die Aufsicht des Szenarios mit der entsprechenden Seitenansicht der Basisstation ist in Bild 3.6.31 zu sehen. Die Hauptstrahlrichtung der für die Simulation verwendeten Sektorantenne ist analog zu den bereits betrachteten Beispielen mit HSR gekennzeichnet.

Die Lage der Vergleichsgebiete für die einzelnen Softwarepakete mit der Messung ist wieder durch die rot umrandeten Flächen symbolisiert. Diese sind so gewählt, dass sich eine nLoS (Vergleichsgebiet 2) und eine LoS Expositionssituation (Vergleichsgebiet 1) ergibt. Ferner sind in Tabelle 3.6.7 die Überblicksdaten und in Tabelle 3.6.8 die Parameter für den betrachteten Sektor mit dem zugehörigen BCCH der Sendeanlage und der Simulation dargestellt.

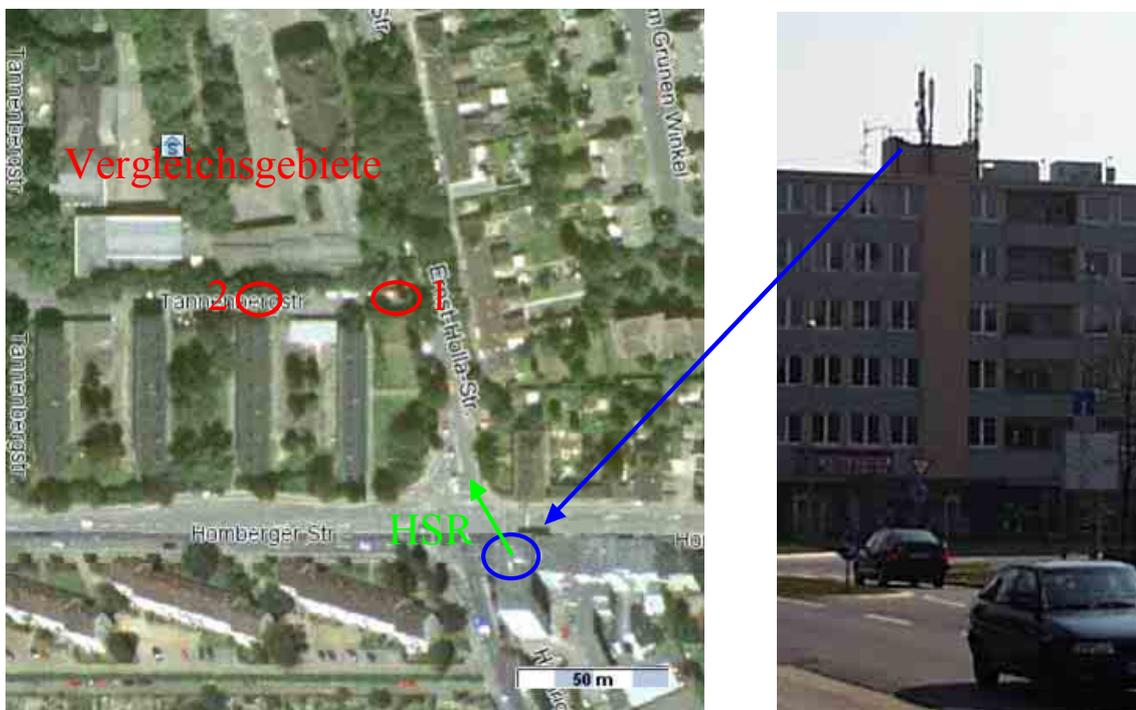


Bild 3.6.31: Mobilfunksendeanlage: Hombergerstraße 162, 47441 Moers

Szenario:	(2), (3)		
Charakteristik der Basisstation:	Basisstation auf wesentlich höherem Gebäude, keine dichte Bebauung-einige große Gebäude		
	Ort	Sicht zur Basisstation	laterale Entfernung zur Basisstation in [m]
Vergleichsgebiet 1	Straße	direkt (LoS)	90
Vergleichsgebiet 2	Straße	indirekt (nLoS)	117

Tabelle 3.6.3: Überblick über das untersuchte Szenario

Ort:		Hombergerstraße 162 47441 Moers				
Frequenz [MHz]	HSR [°]	Höhe [m]	Downtilt mechanisch [°]	Downtilt elektrisch [°]	Antenne und Länge in [m]	BCCH-Leistung am Antenneneingang [W]
1847,9	330	23,1	3	0	K 739 490 0,662	1,58

Tabelle 3.6.7: Simulationsparameter

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt analog zu den vorherigen Kapiteln. Die in den Bildern dargestellte Berechnungsebene befindet sich wieder in einer Höhe von 2 m über dem Erdboden. In Bild 3.6.32 und Bild 3.6.33 sind die Simulationsergebnisse für das Softwarepaket EFC-400 in zweidimensionaler und dreidimensionaler Darstellungsweise zu sehen. Ferner sind die Lage der Basisstation, die Hauptstrahlrichtung und die Vergleichsgebiete gekennzeichnet.

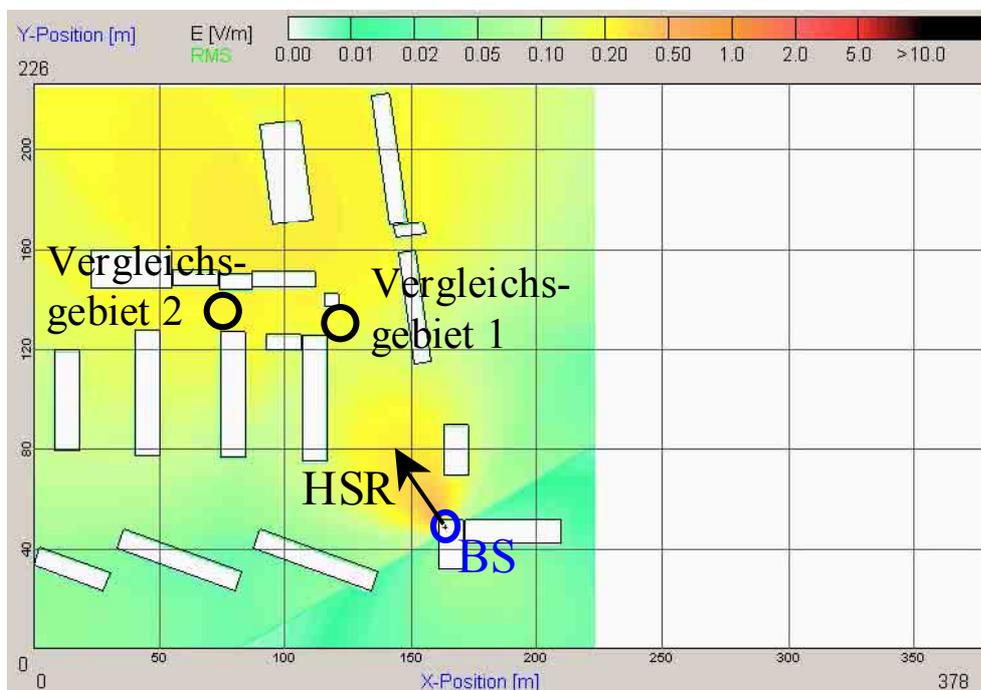


Bild 3.6.32: Simulationsergebnis für das Programm EFC-400, zweidimensional

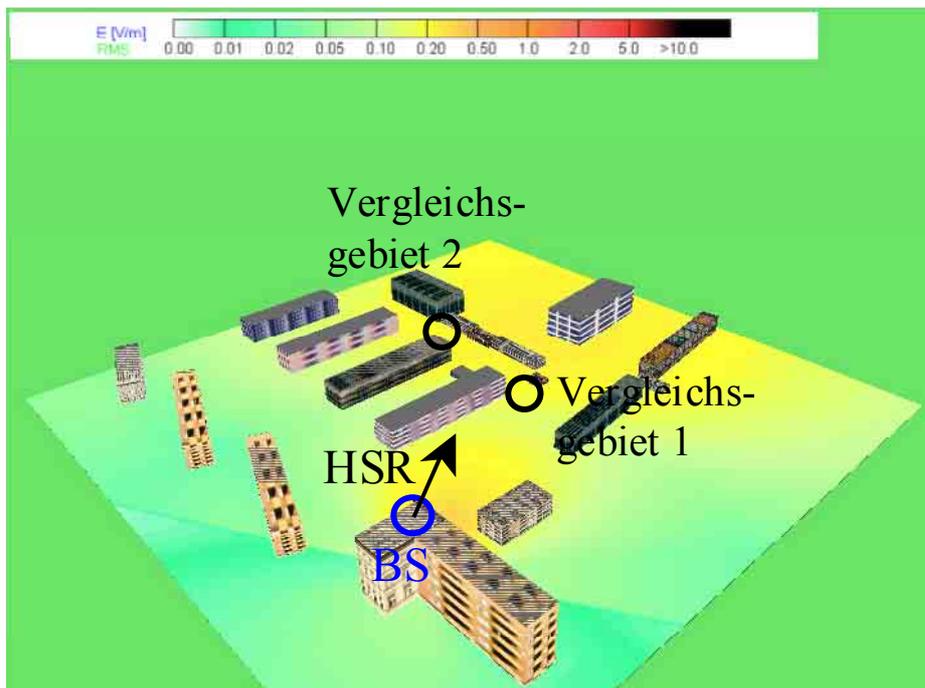


Bild 3.6.33: Simulationsergebnis für das Programm EFC-400, dreidimensional

Für die Simulationsergebnisse von EMF-Visual gelten die gleichen Anmerkungen wie in der Berechnung zuvor. Hierbei wurde die Simulation jedoch nur einmal durchgeführt, da sich beide Vergleichsgebiete in der gleichen Region befanden. Lediglich die weiter entfernten Gebäude stellen nur die Gebäudehüllen dar und hatten keinen Einfluss auf die Simulation. Im Vergleich zu EFC-400 ist aber deutlich der Unterschied zwischen einem auf Freiraumausbreitung und einem auf dem strahlenoptischen Modell basierenden Programm zu erkennen. Während bei ersterem der Immissionsverlauf eher kontinuierlich ist, sind bei EMF-Visual deutliche Interferenzerscheinungen zu erkennen.

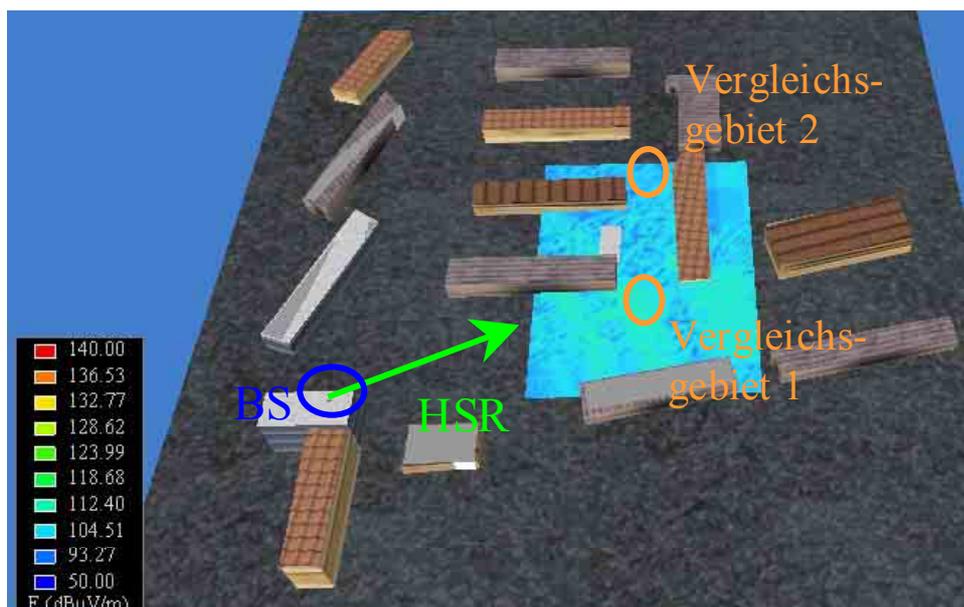


Bild 3.6.34: Simulationsergebnis für das Programm EMF-Visual

Analog zu den vorher betrachteten Ergebnissen sind in Bild 3.6.35 die Resultate für die Simulation mit Wireless Insite dargestellt. Es wurde wiederum ein einzelner Punkt herausgenommen, für den die Empfangspfade dargestellt sind. Auch hier ist ein Interferenzmuster im Farbverlauf zu erkennen.

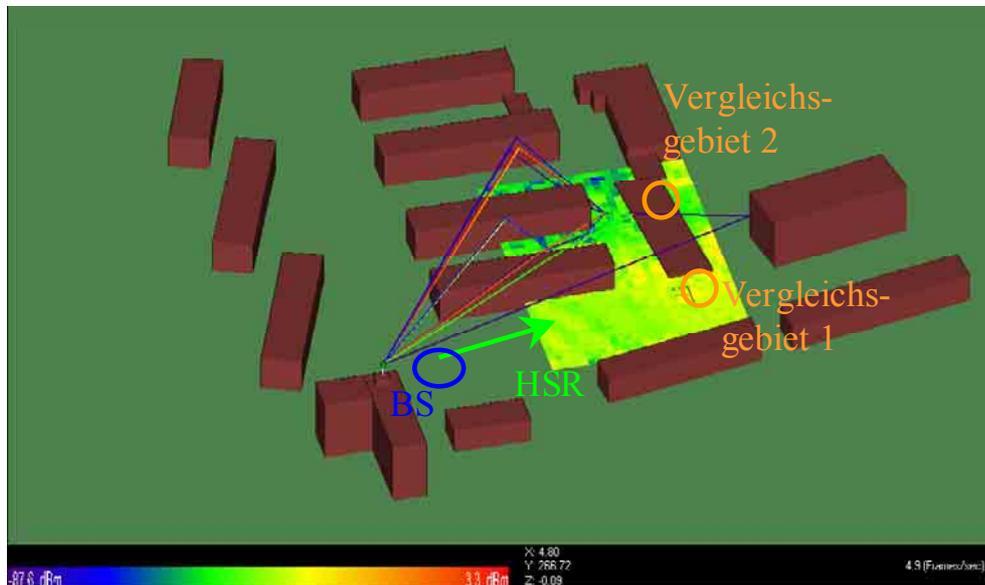


Bild 3.6.35: Simulationsergebnis für das Programm Wireless Insite

Auf den folgenden zwei Bildern sind die Ergebnisse, die mit Quickplan berechnet wurden, zu sehen. In Bild 3.6.36 ist die zweidimensionale Darstellungsweise gewählt. Dieser wurde wiederum die Oberflächenberechnung zu Grunde gelegt. Bei dieser Variante ist wiederum zu bemerken, dass für den Empfangspunkt nur der stärkste Empfangspfad für die Darstellung berücksichtigt wird. Deswegen sind auch keine Interferenzerscheinungen sichtbar.

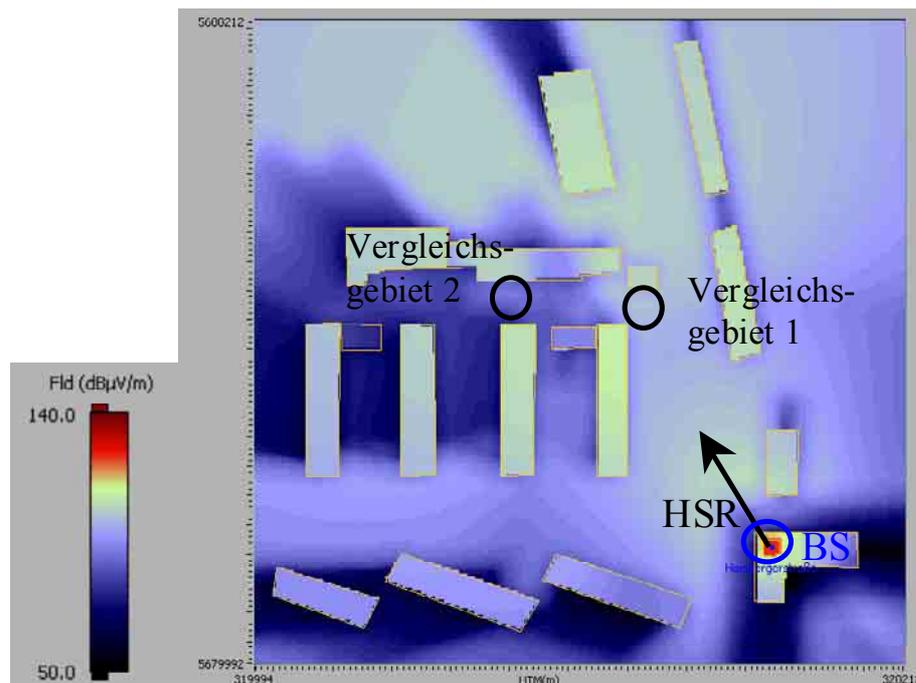


Bild 3.6.36: Simulationsergebnis für das Programm Quickplan, zweidimensional

Die dreidimensionale Darstellungsart spaltet sich wie in den Beispielen zuvor auch in zwei separate Bilder auf. Auf dem oberen Bild sind die Empfangspfade eines im Vergleichsgebiet 2 – also im Gebiet der nur indirekten Sicht auf die Basisstation – liegenden Testpunktes zu sehen. Im unteren Bild ist die dreidimensionale Darstellung der Oberflächenberechnung präsentiert. Die Berechnung des Immissionswertes für den Vergleich mit den anderen Programmen und der Messung erfolgte in der Weise, dass in den Vergleichsgebieten Testpunkte platziert wurden. Für die jeweilige Region wurden für jeden Testpunkt alle einfallenden Feldstärken der einzelnen Strahlen addiert. Der hierbei erhaltene maximale Wert repräsentiert das Ergebnis.

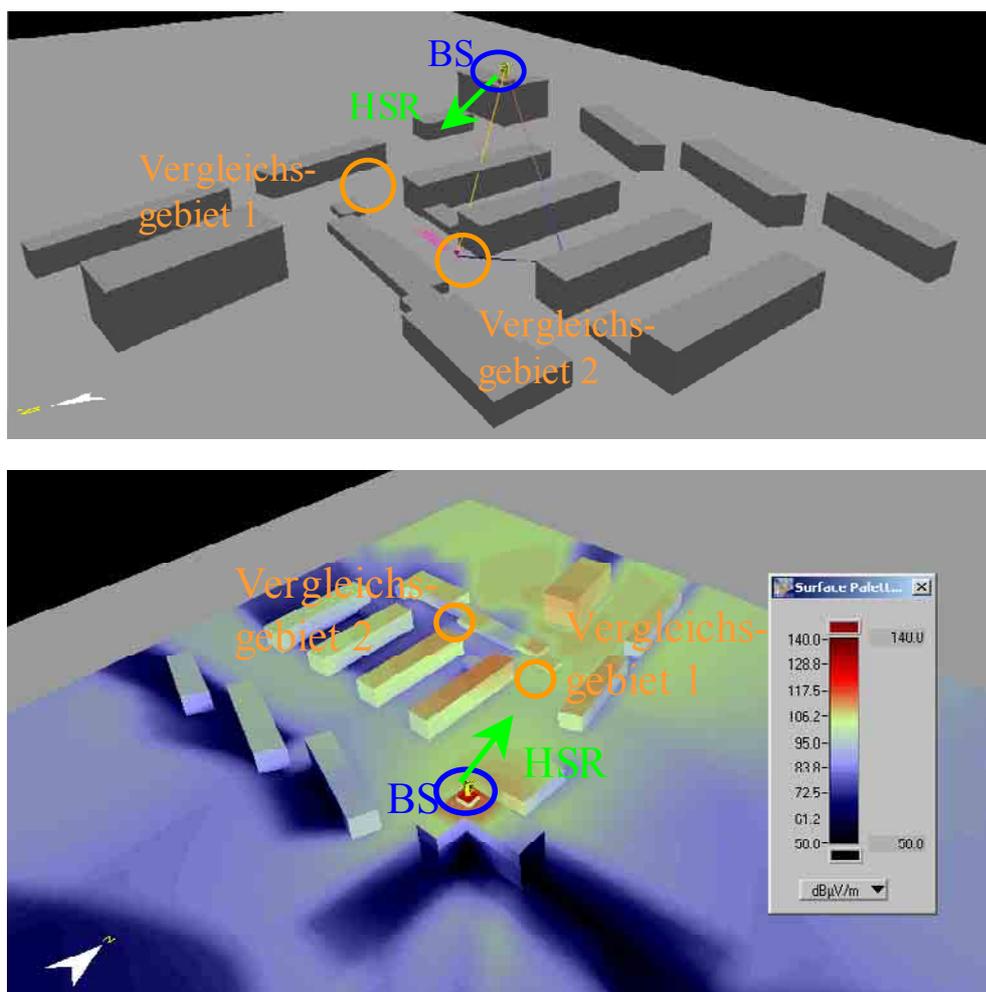


Bild 3.6.37: Simulationsergebnis für das Programm Quickplan, dreidimensional

In Bild 3.6.38 sind die Ergebnisse der einzelnen untersuchten Softwareprogramme und der Messung vergleichend dargestellt. Es erfolgte wiederum eine Berechnung mit dem Programm Fieldview (Freiraumausbreitung mit einem Zuschlag von 3 dB). Es herrschte im Vergleichsgebiet eine LOS Situation.

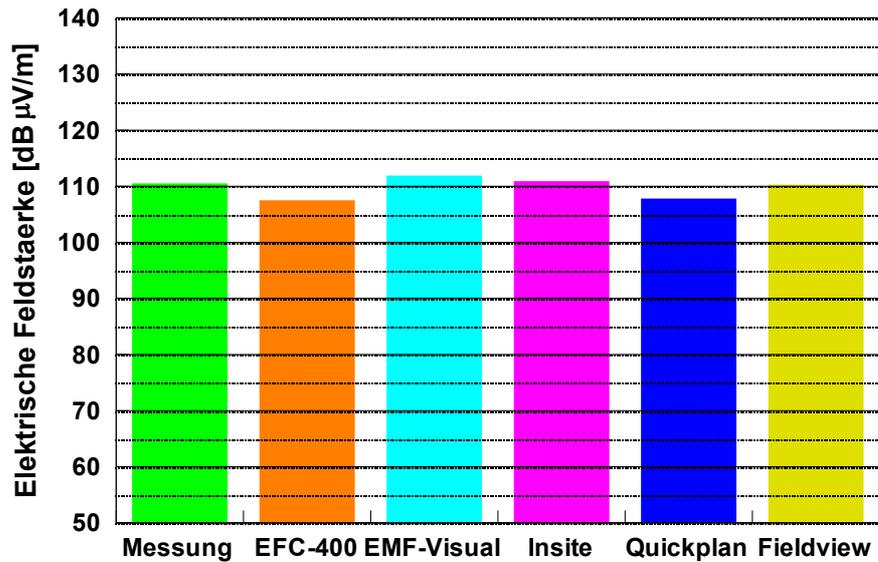


Bild 3.6.38: Vergleich der Simulations- bzw. Messwerte für den Basisstationsstandort Hombergerstraße 162 (Moers) im Vergleichsgebiet 1 (LoS)

Analog zu der obigen Darstellung sind in Bild 3.6.39 die Ergebnisse für das Vergleichsgebiet 2 zu sehen. Hier herrschte keine direkte Sicht zur sendenden Antenne. Auch hier ist erkennbar, dass die Programme, die auf Freiraumausbreitung beruhen, den gemessenen Immissionswert deutlich überschätzen.

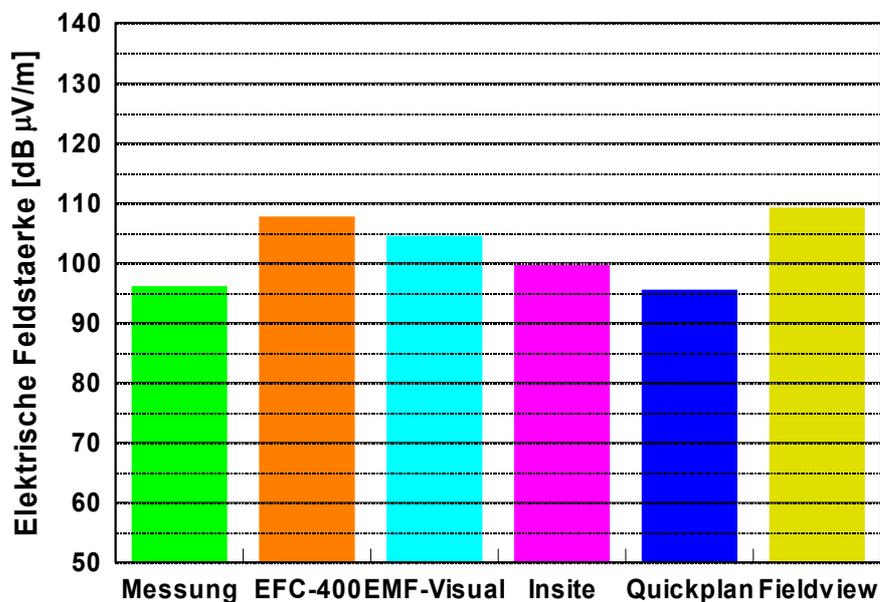


Bild 3.6.39: Vergleich der Simulations- bzw. Messwerte für den Basisstationsstandort Homberger Straße 162 (Moers) im Vergleichsgebiet 2 (nLoS)

3.6.5 Basisstationsstandort: Hochstraße 57, 47798 Krefeld

Die folgende betrachtete Basisstation befindet sich in der Hochstraße 57 in Krefeld. Die Mobilfunksendeantenne ist an einem Mast auf dem höchsten Gebäude in der näheren Umgebung angebracht. Im Unterschied zu den vorher betrachteten Szenarien befindet sich dieses im Innenstadtbereich. Hier sind die Gebäudehöhen insgesamt größer und die Bebauung ist sehr dicht. Das Satellitenbild und die Basisstation in Seitenansicht sind in Bild 3.6.40 zu sehen. Das Vergleichsgebiet liegt bei dieser Simulation auf einem Platz, der von Häusern ähnlicher Höhe umgeben ist.



Bild 3.6.40: Mobilfunksendeanlage: Hochstraße 57, 47798 Krefeld

In dieser Simulation werden zwei Konfigurationen getrennt voneinander betrachtet. Einmal befindet sich das Vergleichsgebiet in der Hauptstrahlrichtung der Mobilfunksendeantenne. Diese ist in Bild 3.6.40 mit HSR 1 bezeichnet. Darüber hinaus wird die Immission untersucht, die durch die Sendeantenne verursacht wird, deren Hauptstrahlrichtung in die mehr oder weniger entgegengesetzte Richtung zeigt. Diese ist mit HSR 2 bezeichnet.

In den folgenden Tabellen sind neben dem Überblick über das Szenario ebenfalls die Parameter für beide hier untersuchten Konfigurationen zusammen gefasst. Dabei entsprechen die Werte dem jeweiligen untersuchten BCCH der einzelnen Sektoren.

Szenario:	(2), (4)		
Charakteristik der Basisstation:	Basisstation auf dem höchsten Gebäude, dichte Bebauung, freier Platz mit umliegenden Gebäuden		
	Ort	Sicht zur Basisstation	laterale Entfernung zur Basisstation in [m]
Vergleichsgebiet	freier Platz	direkt (LoS)	125

Tabelle 3.6.8: Überblick über das untersuchte Szenario

Ort:		Hochstraße 57 47798 Krefeld				
Frequenz [MHz]	HSR [°]	Höhe [m]	Downtilt mechanisch [°]	Downtilt elektrisch [°]	Antenne und Länge in [m]	BCCH-Leistung am Antenneneingang [W]
953,2	120	28,75	0	6	K 739 665 1,996	8 Watt
940,2	0	28,75	0	8	K 739 665 1,996	8 Watt

Tabelle 3.6.9: Simulationsparameter

Zunächst werden die Ergebnisse für die Sektorantenne mit der HSR 1 Richtung betrachtet. In Bild 3.6.41 sind die Ergebnisse von EFC-400 in zweidimensionaler Darstellungsweise zu sehen. Daran anschließend zeigt das Bild 3.6.42 die dreidimensionale Darstellung.

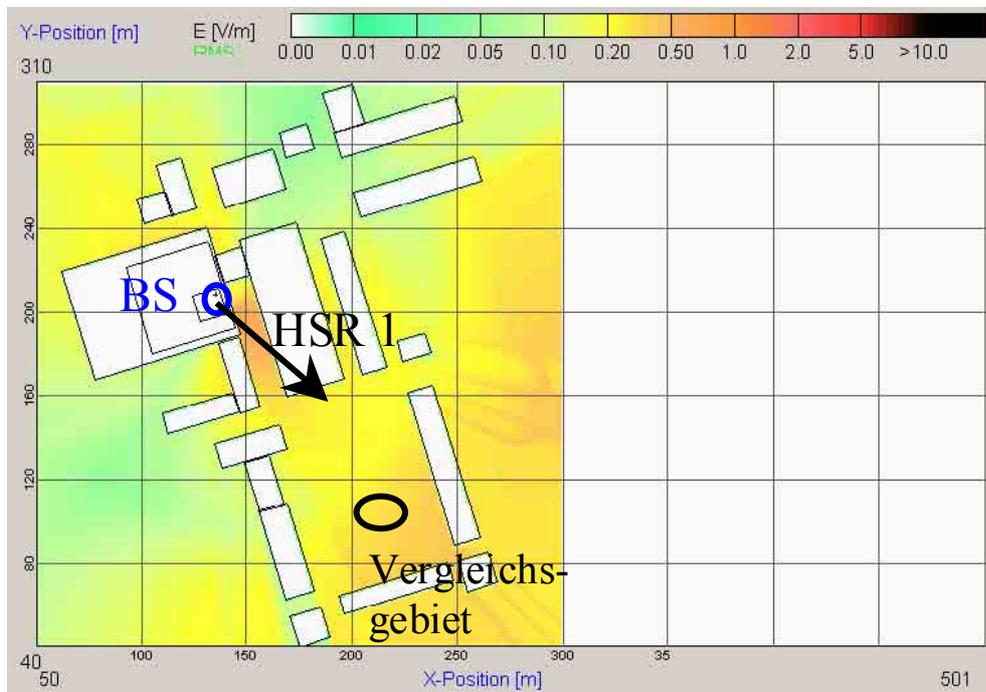


Bild 3.6.41: Simulationsergebnis für das Programm EFC-400, zweidimensional

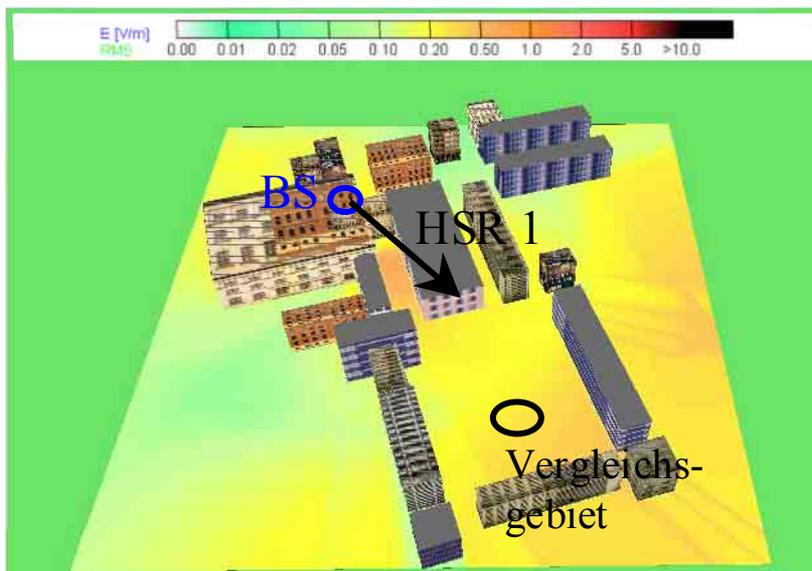


Bild 3.6.42: Simulationsergebnis für das Programm EFC-400, dreidimensional

Die Berechnungsergebnisse mit dem Programm EMF-Visual sind in Bild 3.6.43 zu sehen. Die betrachtete Sektorantenne ist mit einem roten Punkt gekennzeichnet. Es wird wieder deutlich, dass ein Immissionsvergleich durch einen reinen Farbvergleich mit den Ergebnissen von EFC-400 nicht möglich ist, obwohl die Ober- und Untergrenze für die elektrische Feldstärke gleich sind. Ferner wird wieder der Unterschied zwischen strahlenoptischen und auf Freiraumbesetzung basierenden Programmen sichtbar.

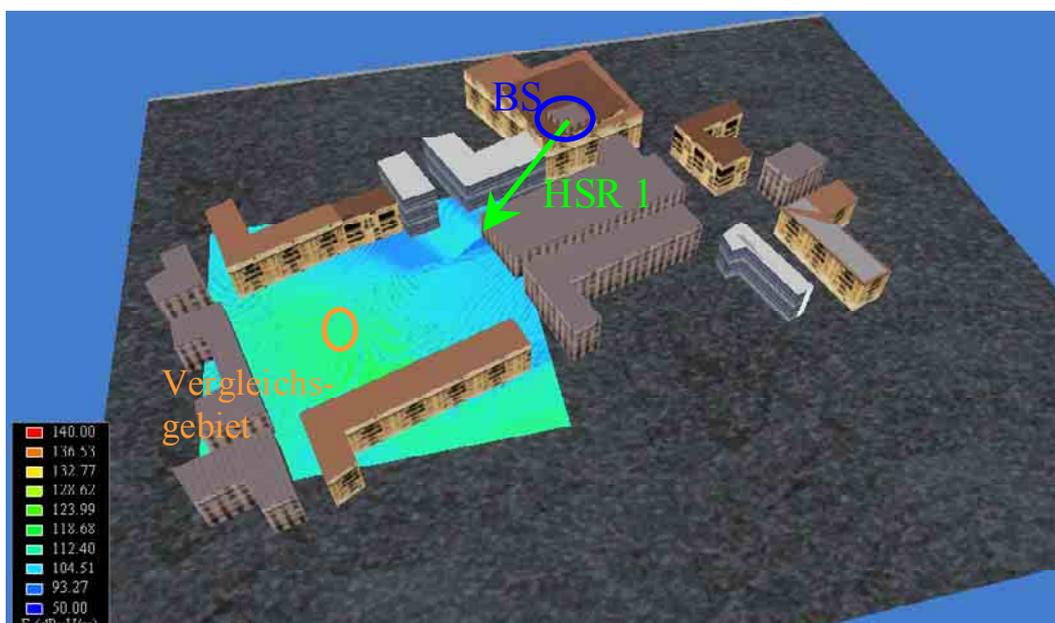


Bild 3.6.43: Simulationsergebnis für das Programm EMF-Visual

Im nächsten Bild sind die Simulationsergebnisse dargestellt, die mit dem Programm Wireless Insite erzielt wurden. Die unterschiedliche Farbgebung der Gebäude ist in einem differieren-

den Material begründet. Zunächst werden im oberen Teilbild die Empfangsstrahlen für einen einzelnen Punkt im Vergleichsgebiet dargestellt.

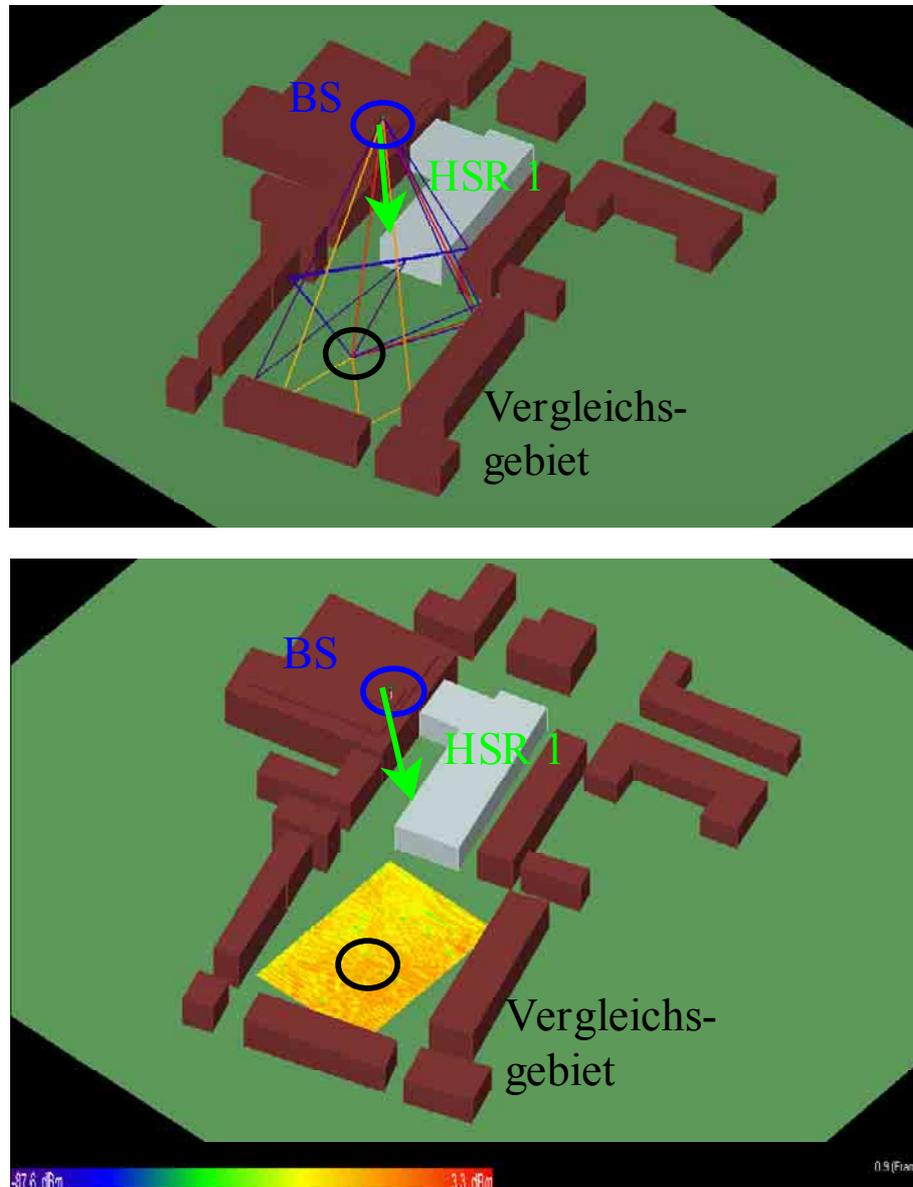


Bild 3.6.44: Simulationsergebnis für das Programm Wireless Insite

Im unteren Teilbild ist die Immissionsverteilung im betrachteten Gebiet zu sehen. Es ist eine deutliche Interferenzcharakteristik auszumachen.

Die Ergebnisse von dem Softwarepaket Quickplan sind wieder in die zweidimensionale und die dreidimensionale Darstellungsweise aufgliedert. Wie bei den anderen Berechnungen auch wird die Oberflächenberechnung zu Grunde gelegt. Hierbei ist nur der stärkste der empfangenden Strahlen berücksichtigt. Für einen Vergleich der Werte mit den Messungen im Vergleichsgebiet wurden wieder Testpunkte platziert, deren einzelnen Empfangsstrahlen leistungsmäßig addiert wurden (Bild 3.6.46).

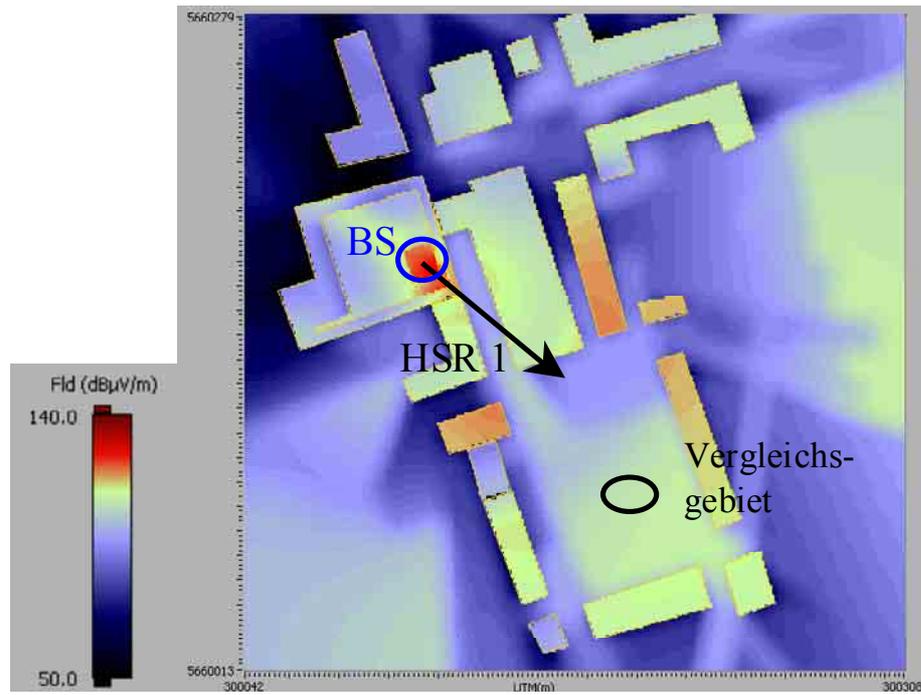


Bild 3.6.45: Simulationsergebnis für das Quickplan, zweidimensional

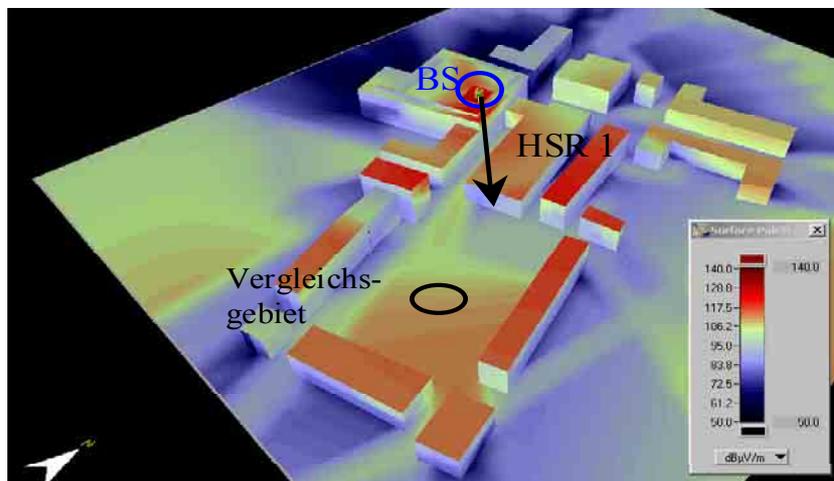
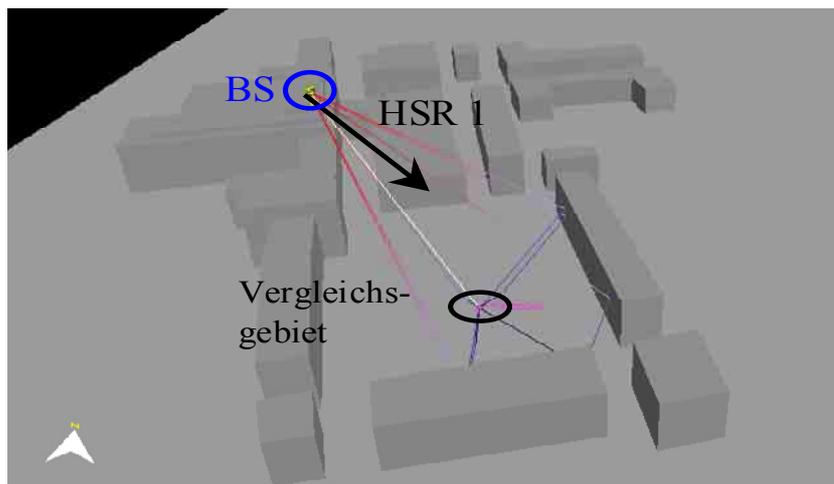


Bild 3.6.46: Simulationsergebnis für das Programm Quickplan, dreidimensional

In Bild 3.6.47 werden die einzelnen Ergebnisse miteinander verglichen. Wie in den Beispielen zuvor wurde auch hier eine Berechnung mit dem Programm Fieldview durchgeführt. Während die Ergebnisse von EFC-400 und Quickplan nahezu mit dem gemessenen Wert übereinstimmen, sind überschätzten EMF-Visual und Wireless Insite die Immissionsituation deutlich.

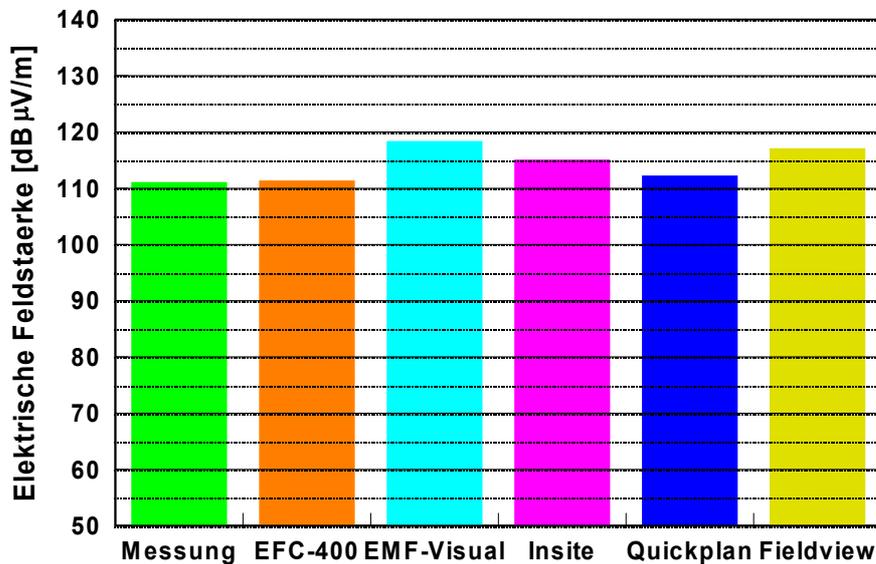


Bild 3.6.47: Vergleich der Simulations- bzw. Messwerte für den Basisstationsstandort Hochstraße 57 (Krefeld) im Vergleichsgebiet, HSR 1 (LoS)

Die Ergebnisse für die Konfiguration 2 werden im folgenden diskutiert. Hierbei liegt das Vergleichsgebiet in der rückwärtigen Richtung des untersuchten Antennensektors. Es werden nicht alle Simulationsergebnisse der einzelnen Programme separat vorgestellt, sondern lediglich die Immission im Vergleichsgebiet gezeigt.

Eine große Schwierigkeit, diese Werte direkt miteinander zu vergleichen liegt darin, dass die Antennendiagramm auf der der Hauptstrahlrichtung entgegen gesetzten Seite sehr unterschiedlich sind. So kann bei EMF-Visual diese aufgrund der Antennenmodellierung nicht wie bei den anderen Programmen aufgefüllt werden. Hinzukommend haben die vorherigen Simulationen gezeigt, dass auch das Programm Quickplan in der Version 1.3.6 auf der rückwärtigen Seite einen Interpolationsfehler der dreidimensionalen Abstrahlcharakteristik aufweist.

Es liegen die berechneten Immissionen zwar alle mehr oder weniger im Bereich der gemessenen, aber ein Schlussfolgerung ist hier aus den vorher genannten Gründen nur schwer möglich.

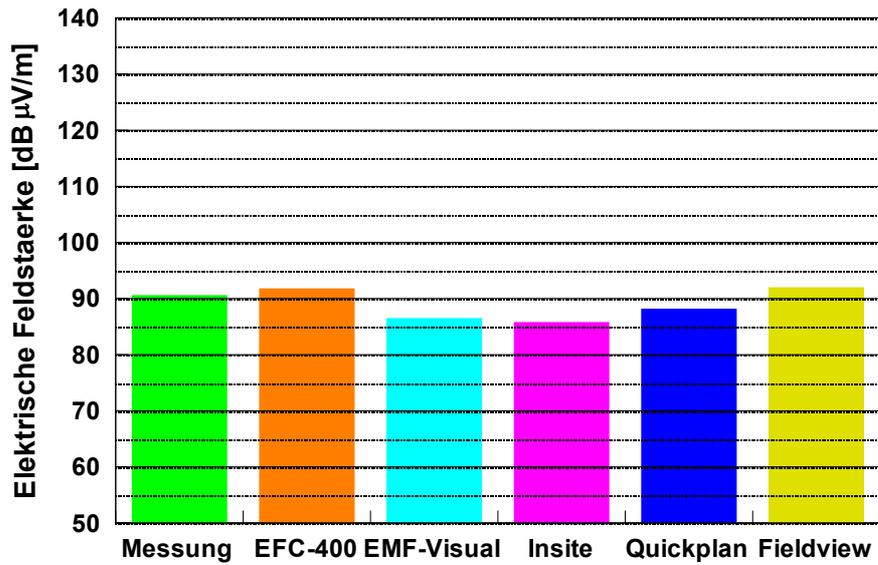


Bild 3.6.48: Vergleich der Simulations- bzw. Messwerte für den Basisstationsstandort Hochstraße 57 (Krefeld) im Vergleichsgebiet, HSR 2 (LoS)

3.6.6 Basisstationsstandort: Katharinenstraße 12, 44137 Dortmund

Bei der nächsten untersuchten Standortkonfiguration handelt es sich um eine sogenannte Mikrozelle. Das Versorgungsgebiet umfasst hierbei nicht mehr als ein paar hundert Meter. Wie in Bild 3.6.49 zu sehen, ist die Mobilfunkantenne an einer Hauswand angebracht.



Bild 3.6.49: Mobilfunksendeanlage: Katharinenstraße 12, 47137 Dortmund

Die Gebäude im Umkreis der Mobilfunksendeanlage weisen eine wesentlich größere Höhe auf als die Montagehöhe der Antenne. In dieser Studie werden hier zwei Vergleichsgebiete näher untersucht. Das erste ist nur wenige Meter von der Sendeanlage entfernt. Hier wird eine gute Übereinstimmung der Immissionsberechnungen mit der Messung erwartet, da es einen dominierenden Ausbreitungspfad gibt. Analog zum ersten liegt auch das zweite Vergleichsgebiet in direkter Sicht zur Sendeanlage. Einziger Unterschied ist nur die Entfernung von gut 50 m. In der folgenden Tabelle sind analog zu den bisher betrachteten Szenarien die Parameter der Basisstationsanlage und des betrachteten BCCHs zu sehen, die gleichzeitig auch den Simulationsparametern entsprechen.

Szenario:	(2), (5)		
Charakteristik der Basisstation:	Mikrozelle: Basisstation an einer Hauswand umgeben von wesentlich höheren Gebäuden		
	Ort	Sicht zur Basisstation	laterale Entfernung zur Basisstation in [m]
Vergleichsgebiet 1	Freier Platz	direkt (LoS)	12
Vergleichsgebiet 2	Freier Platz	direkt (LoS)	45

Tabelle 3.6.10: Überblick über das untersuchte Szenario

Ort: Katharinenstraße 12 47137 Dortmund						
Frequenz [MHz]	HSR [°]	Höhe [m]	Downtilt mechanisch [°]	Downtilt elektrisch [°]	Antenne	BCCH-Leistung am Antenneneingang [W]
945,2	omni	7,5	0	0	K 738 450	1,89 Watt

Tabelle 3.6.11: Basisstations- und Simulationsparameter

Die Ergebnisse, die mit EFC-400 erzielt wurden, sind in der zweidimensionalen Darstellungsweise in Bild 3.6.50 zu sehen. Es ist deutlich zu erkennen, dass es sich bei der Sendeanlage nicht um eine gerichtete Antenne handelt, sondern dass die Abstrahlung in alle Richtungen auf gleiche Weise geschieht. Ferner ist im oberen Bereich der Modellierungsumgebung die Schwierigkeit zu erkennen, verwinkelte bzw. runde Gebäude zu generieren. Dieses kann nur mit einer Verschachtelung geschehen.

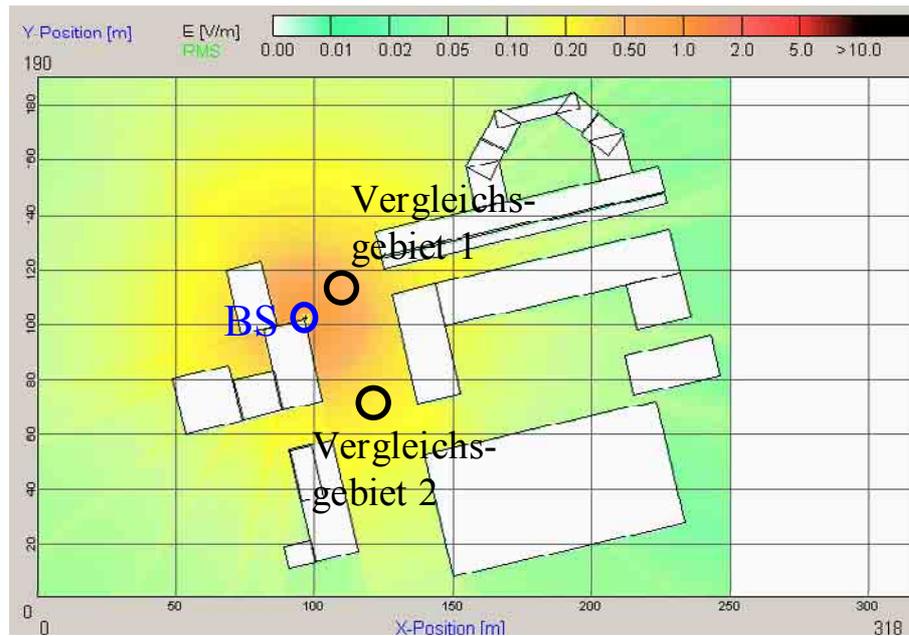


Bild 3.6.50: Simulationsergebnis für das Programm EFC-400, zweidimensional

Die dazugehörige dreidimensionale Darstellungsart der Modellierungsumgebung und der Berechnungsergebnisse ist im folgenden Bild zu sehen.

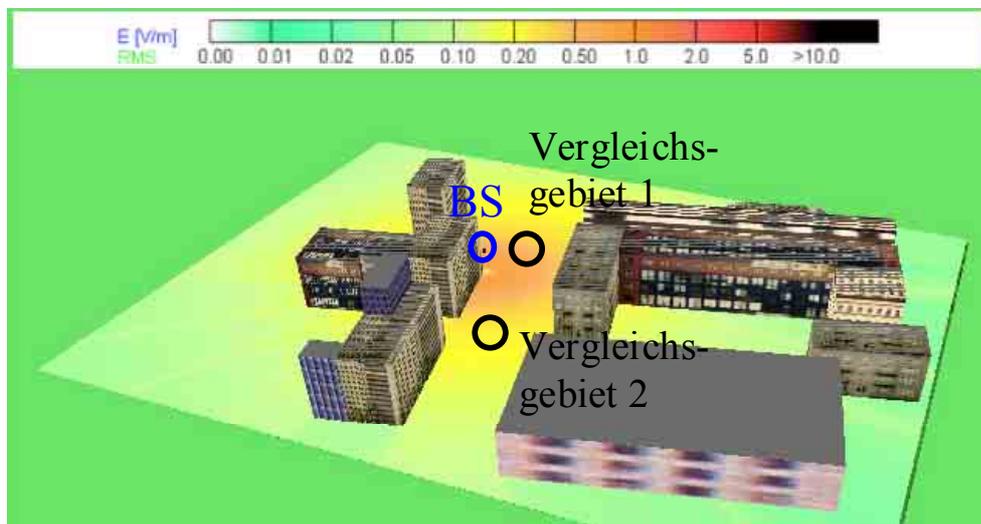


Bild 3.6.51: Simulationsergebnis für das Programm EFC-400, dreidimensional

Das Bild 3.6.52 zeigt die Immissionsverteilung, die mit dem Programm EMF-Visual berechnet wurde. Es ist im Vergleich zum vorangegangenen Bild wieder die unterschiedliche Farbgebung zu erkennen.

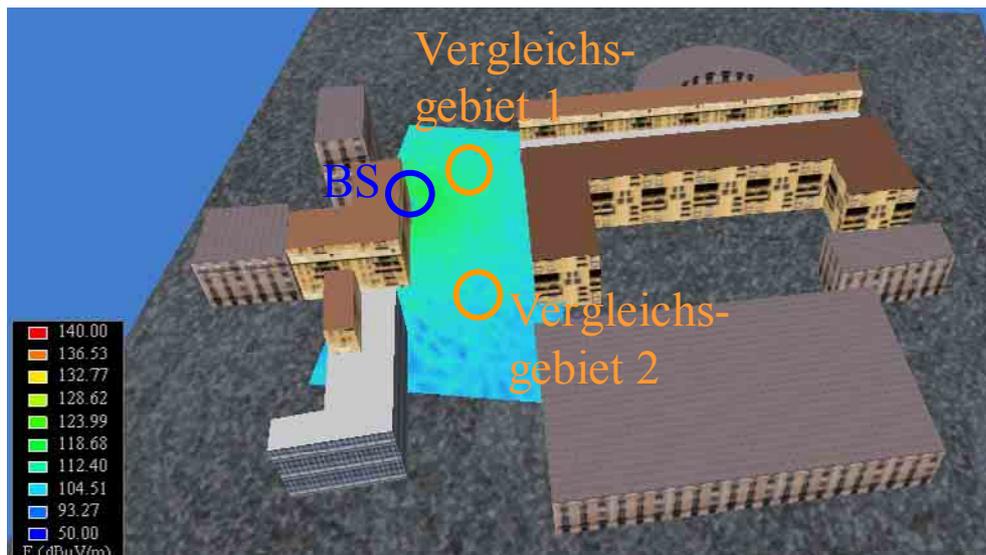


Bild 3.6.52: Simulationsergebnis für das Programm EMF-Visual

In Bild 3.6.53 ist die dreidimensionale Modellierungsumgebung zu sehen, die mit dem Softwareprogramm Wireless Insite erstellt wurde. Es wurde eine Empfangsantenne im Vergleichsgebiet 2 gewählt, deren Empfangspfade dargestellt sind. Die Grenzen für den farbigen Verlauf der Immission wurden wiederum so gewählt, dass sie minimal 50 dBµV/m und maximal 140 dBµV/m entsprechen.

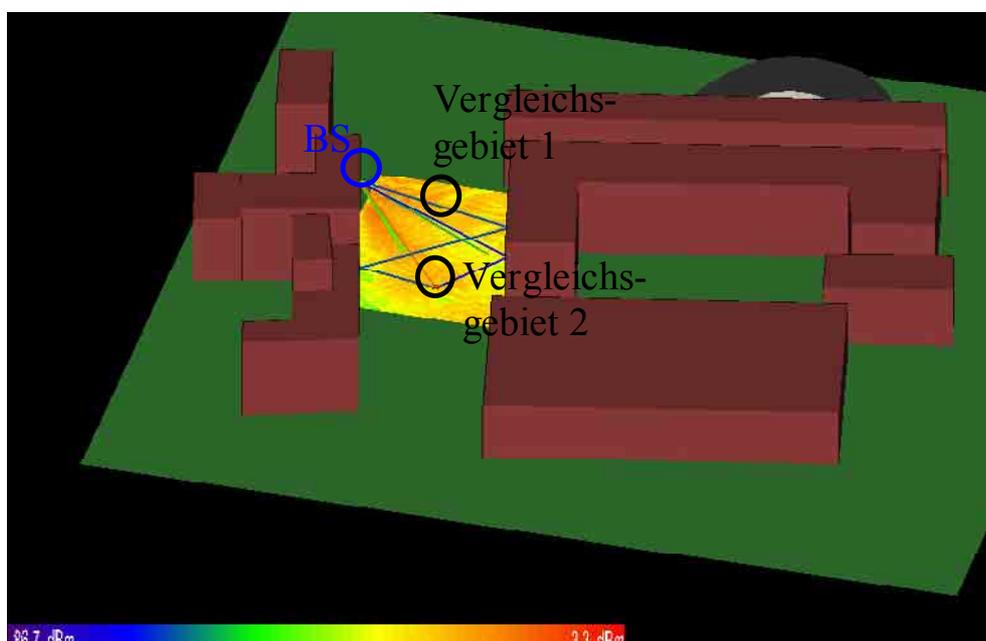


Bild 3.6.53: Simulationsergebnis für das Programm Wireless Insite

In Bild 3.6.54 ist das Simulationsergebnis der Oberflächenberechnung von Quickplan in der zweidimensionalen Darstellungsweise zu sehen. Es sind die Abschattungen der Gebäude und Gebiete, die hauptsächlich über Reflexionen geprägt sind zu erkennen.

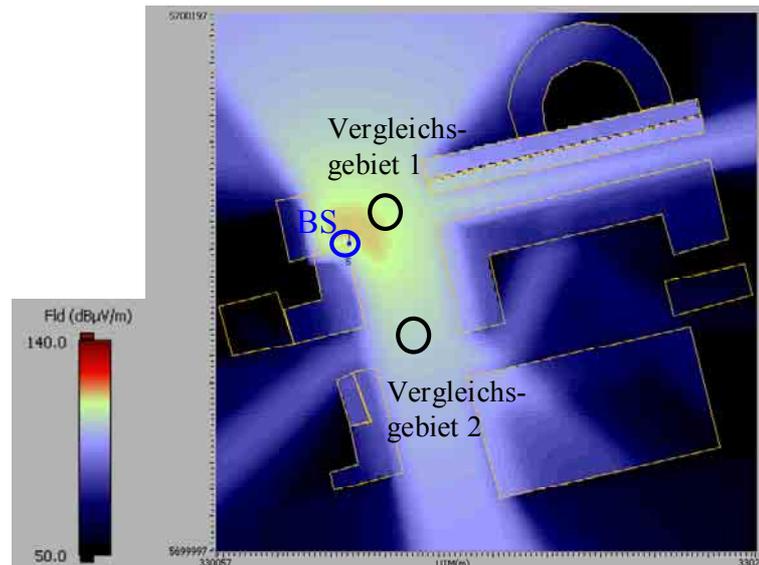


Bild 3.6.54: Simulationsergebnis für das Programm Quickplan, zweidimensional

Die dreidimensionale Darstellungsweise der Modellierungsumgebung mit den dazugehörigen Ergebnissen für die Oberflächenberechnung sind im folgenden Bild zu sehen. Im oberen Teil sind wieder die Empfangspfade für einen einzelnen Testpunkt dargestellt. Zum Vergleich mit den Messungen wurden in den Vergleichsgebieten Testpunkte verteilt und die maximale Immission aller empfangenden Pfade für jeden Testpunkt zusammen berechnet.

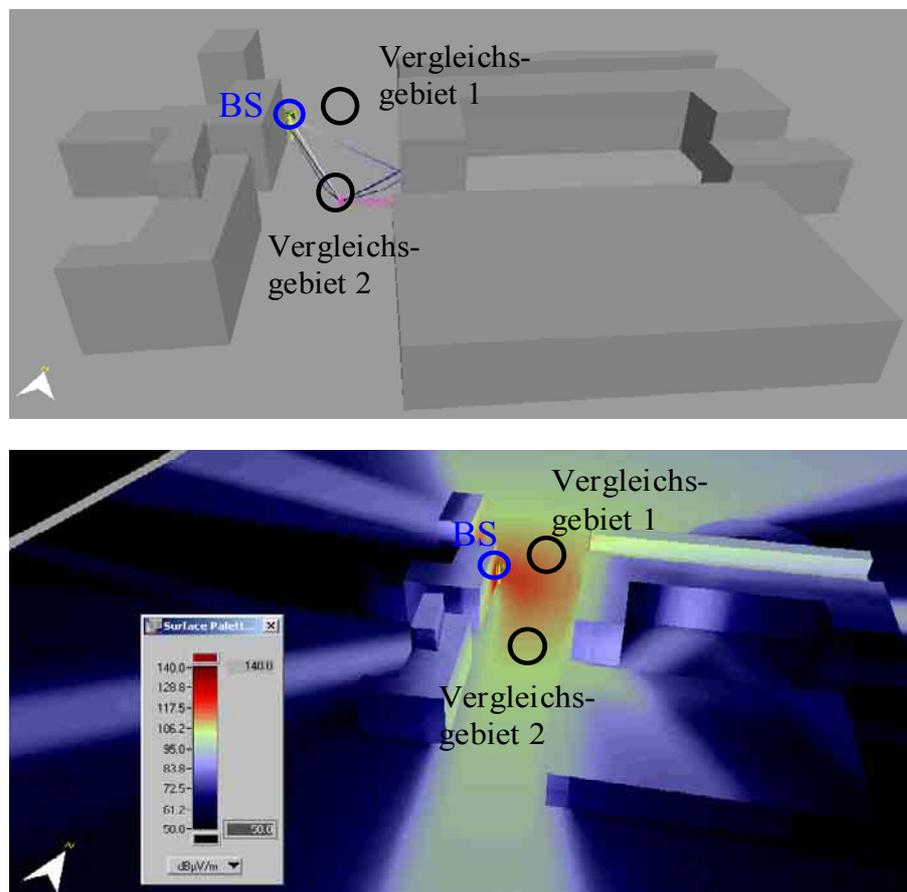


Bild 3.6.55: Simulationsergebnis für das Programm Quickplan, dreidimensional

Der Vergleich der Berechnungsergebnisse aller Programme mit dem Messergebnis ist in Bild 3.6.56 für das Vergleichsgebiet 1 zu sehen. Zusätzlich wurde ebenfalls eine Berechnung mit dem Programm Fieldview durchgeführt, dass reine Freiraumausbereitung mit Berücksichtigung der Bodenreflexion beinhaltet.

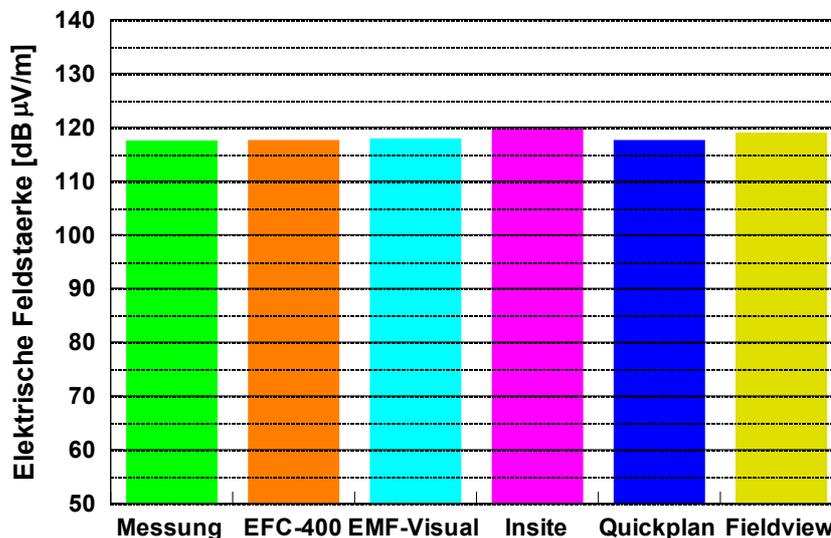


Bild 3.6.56: Vergleich der Simulations- bzw. Messwerte für den Basisstationsstandort Katharinenstraße 12 (Dortmund) im Vergleichsgebiet 1 (LoS)

Insgesamt sind in für dieses Gebiet gute Übereinstimmung der Immission zwischen Berechnungen und Messungen erzielt worden. Ähnliches gilt für die Berechnung im Simulationsgebiet 2 (vergleiche hierzu Bild 3.6.57).

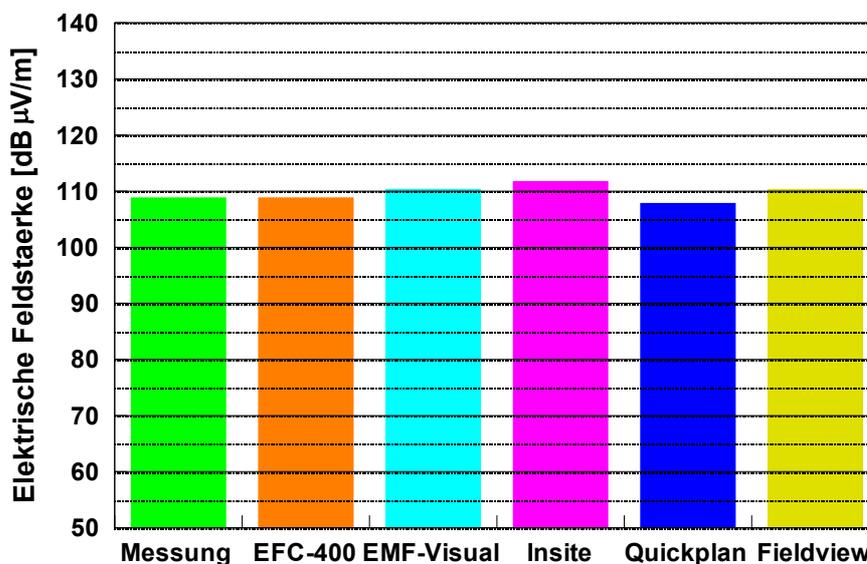


Bild 3.6.57: Vergleich der Simulations- bzw. Messwerte für den Basisstationsstandort Katharinenstraße 12 (Dortmund) im Vergleichsgebiet 2 (LoS)

3.6.7 Basisstationsstandort: Zum Niepmannshof 5, 47475 Kamp-Lintfort

Im folgenden untersuchten Szenario wird die Berechnung der Immissionsverteilung *in einem Gebäude* näher untersucht. In Bild 3.6.58 ist die dazugehörige Umgebung in der Aufsicht und die betrachtete Basisstation in der Seitenansicht zu sehen. Das Vergleichsgebiet befindet sich innerhalb eines Gebäudes. Die Hauptstrahlrichtung der untersuchten Sektorantenne ist wie in den Beispielen zuvor auch mit HSR eingezeichnet.

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die Berechnungen nicht mit dem Programm Quickplan durchgeführt wurden. Dieses beinhaltet keine Möglichkeit, die Immissionsverteilung innerhalb von Gebäuden zu berechnen und darzustellen.

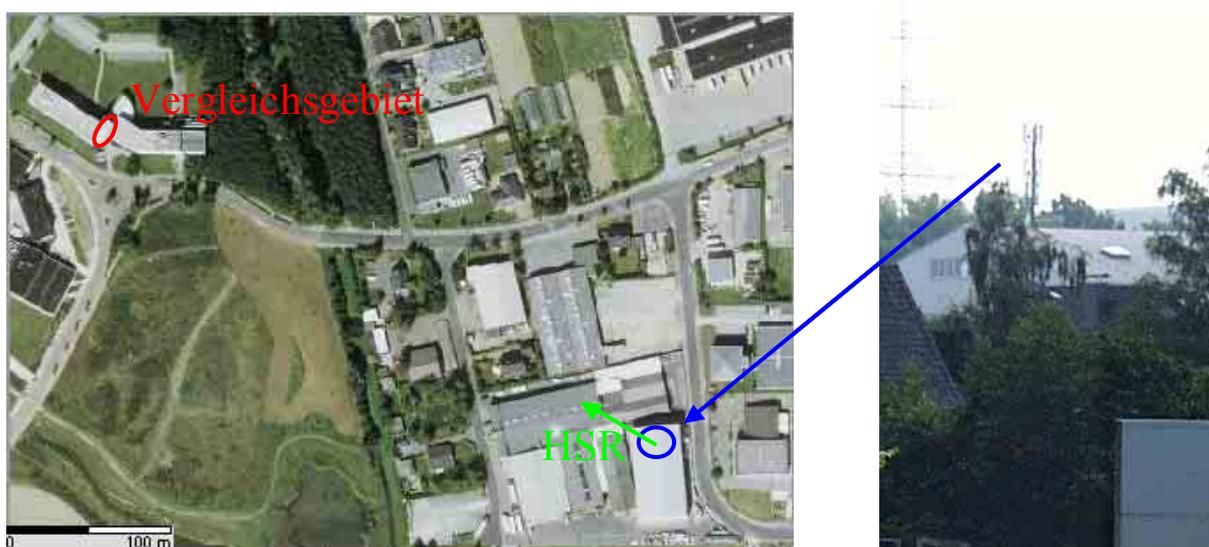


Bild 3.6.58: Mobilfunksendeanlage: Zum Niepmannshof 5, 47475 Kamp-Lintfort

Die folgenden Tabelle enthalten wie bei den Beispielen zuvor auch einen Überblick über das hier untersuchte Szenario und die Parameter der Mobilfunksendeanlage, die auch gleichzeitig die Simulationsparameter darstellen.

Szenario:	(6)		
Charakteristik der Basisstation:	Berechnung der Immission innerhalb eines Gebäudes		
	Ort	Sicht zur Basisstation	laterale Entfernung zur Basisstation in [m]
Vergleichsgebiet	Inhaus	direkt (LoS)	380

Tabelle 3.6.12: Überblick über das untersuchte Szenario

Ort: Zum Niepmannshof 5 47475 Kamp-Lintfort						
Frequenz [MHz]	HSR [°]	Höhe [m]	Downtilt mechanisch [°]	Downtilt elektrisch [°]	Antenne und Länge in [m]	Leistung am Antenneneingang [W]
948,4	300	20,7	3	0	K 739 648 1,296	7,41 Watt

Tabelle 3.6.13: Basisstations- und Simulationsparameter

Die dreidimensionale Umgebungsmodellierung des Programms EFC-400 ist in Bild 3.6.59 zu sehen. Mit BS ist der Ort der Mobilfunksendeanlage gekennzeichnet. Das untersuchte Vergleichsgebiet liegt wie oben bereits erwähnt innerhalb eines Gebäudes. Um die Immissionsverteilung besser betrachten zu können, wird nur dieser Bereich zur Darstellung der Simulationsergebnisse verwendet.

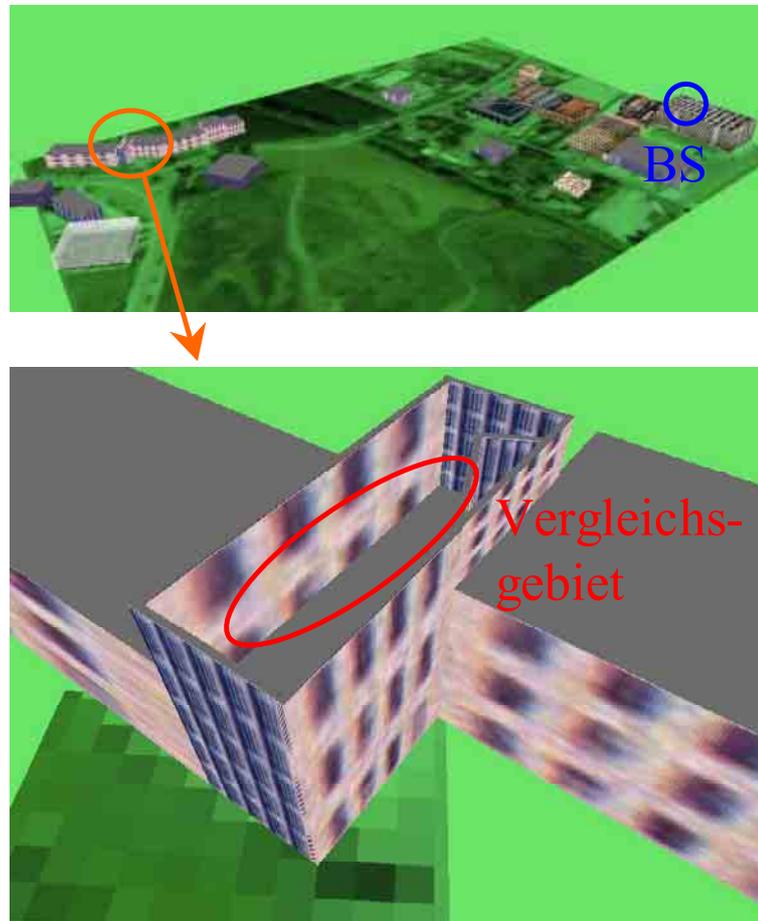


Bild 3.6.59: Modellierte Umgebung mit dem Programm EFC-400

Die Resultate, die mit EFC-400 erzielt wurden, sind in Bild 3.6.60 in zweidimensionaler Darstellungsweise zu sehen.



Bild 3.6.60: Simulationsergebnis mit dem Programm EFC-400

Analog zu der vorherigen Vorstellung der Ergebnisse ist das Vorgehen bei der Software EMF-Visual. Der Bereich des Vergleichsgebietes wird hier vergrößert dargestellt. Hierbei ist darauf zu achten, dass die Gebäude hierfür in Höhe der betrachteten Ebene zur Veranschaulichung der Ergebnisse abgeschnitten wurden. Die Simulation wurde so durchgeführt, dass die Gebäude mit horizontalen und vertikalen Ebenen modelliert wurden. In Bild 3.6.61 sind zur besseren Darstellung nur noch die Gebäudehüllen zu erkennen, auf die bereits weiter oben näher eingegangen wurde. Im Gegensatz zu den Ergebnissen mit auf Freiraumausbreitung basierenden Verfahren in Bild 3.6.60 sind in Bild 3.6.61 die örtlich kleinskaligen Schwankungen innerhalb von Gebäuden zu sehen.

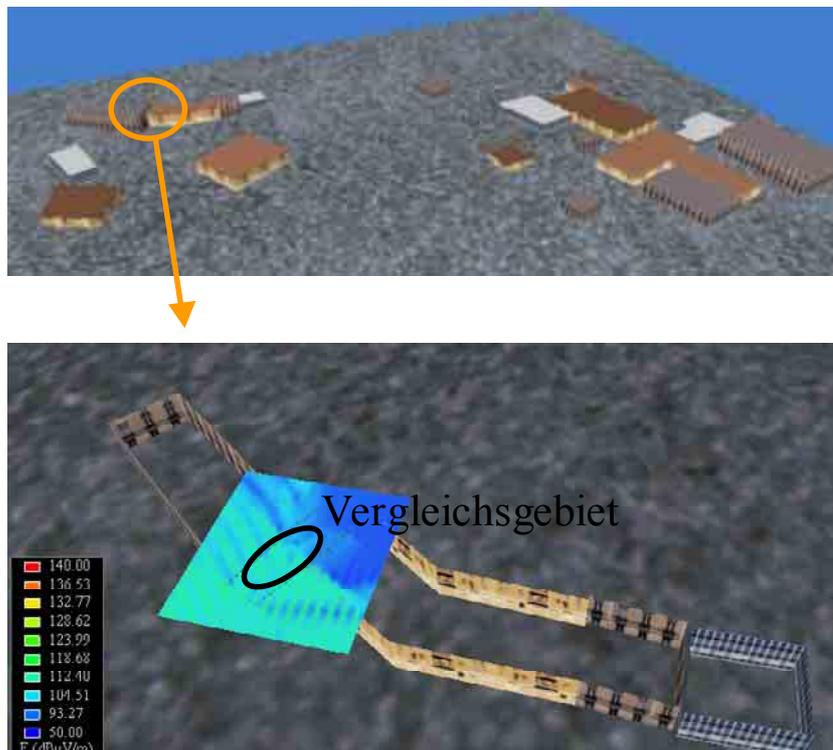


Bild 3.6.61: Modellierung und Simulationsergebnis mit dem Programm EMF-Visual

Abschließend ist in Bild 3.6.62 die Modellierungsumgebung und das dazugehörige Simulationsergebnis von Wireless Insite dargestellt. Zu beachten ist, dass der aus Glas bestehende Teil der Vorderfront des Gebäudes für die Betrachtung entfernt wurde, um die Empfangsantennen sichtbar zu machen. Die Grenzen des farbigen Verteilung der Immission sind wieder für die Grenzen von 50 bzw. 140 dB μ V/m berechnet worden. Zur übersichtlicheren Darstellung wurde ferner im Vergleichsgebiet nur eine Linie von Empfangsantennen gezeigt. Für die Berechnung wurde das gesamte Gebiet untersucht.

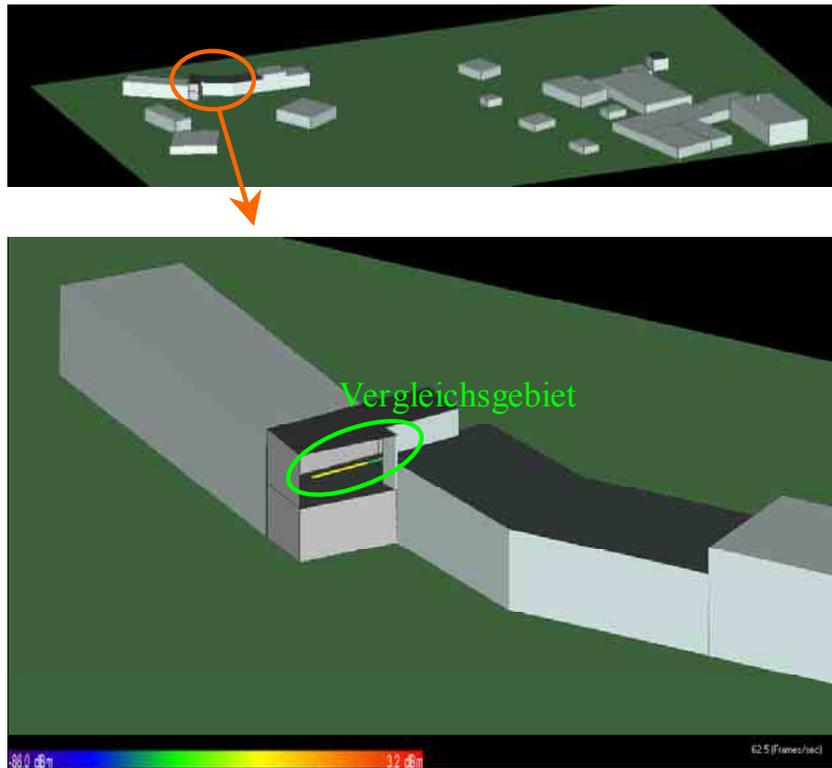


Bild 3.6.62: Modellierung und Simulationsergebnis mit dem Programm Wireless Insite

In Bild 3.6.63 sind die einzelnen Ergebnisse der Berechnungen den Messergebnissen gegenüber gestellt. An dieser Stelle sei wieder angemerkt, dass mit dem Programm Fieldview wieder der Wert der Immission unter reiner Freiraumausbreitung inklusive einem Zuschlag von 3 dB zur Berücksichtigung einer Bodenreflexion berechnet wurde.

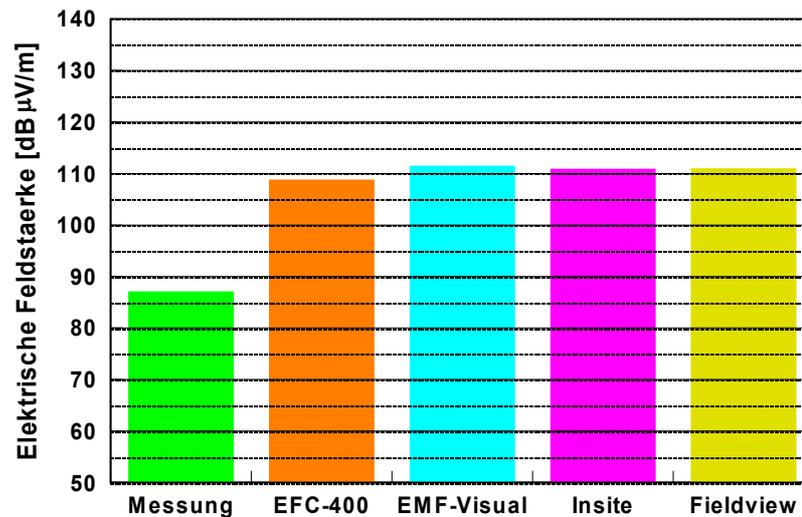


Bild 3.6.63: Vergleich der Simulations- bzw. Messwerte für den Basisstationsstandort Niepmannhof 5 (Kamp-Lintfort) im Vergleichsgebiet (LoS)

Es ist zu erkennen, dass alle Programme den gemessenen Feldstärkewert deutlich überschätzen. Da der Unterschied im Vergleich zu den vorherigen Szenarien unerklärlich hoch war, wurde diese hier vorliegende Konfiguration genauer analysiert. In diesem Zusammenhang ist folgender Punkt zu beachten. Ein Teil der der Basisstationsantenne zugewandten Vorderfront des betrachteten Gebäudes besteht aus Glas. In den Simulationen mit Wireless Insite und EMF Visual wurde dieses berücksichtigt (vgl. Tabelle 3.6.2), während bei EFC-400 eine Wand mit einer Dämpfung von 3 dB angenommen wurde. Für die nähere Untersuchung wurden zwei verschiedene Messungen durchgeführt, bei denen wieder der BCCH-Kanal der Mobilfunkbasisstation gemessen wurde. Durch eine Vergleichsmessung bei offenem bzw. geschlossenem Fenster konnte die Dämpfung der Scheibe mit 25 dB bestimmt werden. Da dieser in den Programmen in dieser Höhe nicht berücksichtigt wurde, werden deswegen nun die Simulationsergebnisse mit den Messergebnissen bei offenem Fenster verglichen. Dieses ist in Bild 3.6.64 zu sehen.

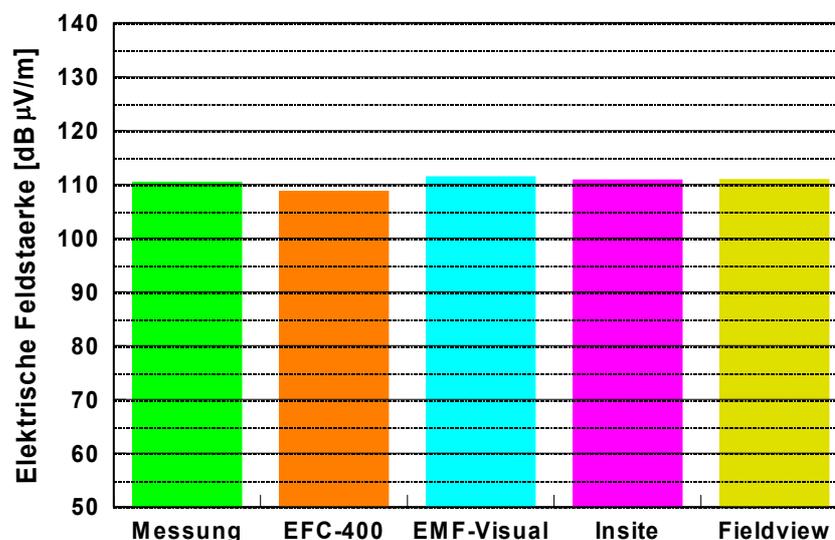


Bild 3.6.64: Vergleich der Simulations- bzw. Messwerte für den Basisstationsstandort Niepmannhof 5 (Kamp-Lintfort) im Vergleichsgebiet (LoS)

Es wird anhand der Ergebnisse deutlich, dass die berechneten Ergebnisse nun mit den gemessenen Immissionen gut übereinstimmen und die Simulationen einen guten Prognosewert liefern.

3.6.8 Basisstationsstandort: Inrather Straße 146, 47803 Krefeld

Die für die Studie zuletzt betrachtete Basisstationskonfiguration befindet sich in der Inrather Straße 146 in Krefeld. Die Sendeanlage ist dort direkt auf dem Gebäude, in dem die Messung durchgeführt wurde, montiert. Eine Aufsicht und die zugehörige Seitenansicht der Basisstation sind in Bild 3.6.65 zu sehen. Mit HSR ist wie vorher auch die Hauptstrahlrichtung der Sektorantenne gemeint, deren BCCH-Kanal für die Berechnung die Basis bildet.

Bei den Simulationsergebnissen ist wie in dem Beispiel zuvor keine Berechnung mit dem Programm Quickplan zu sehen, da eine Berechnung der Immission innerhalb von Gebäuden nicht möglich ist.

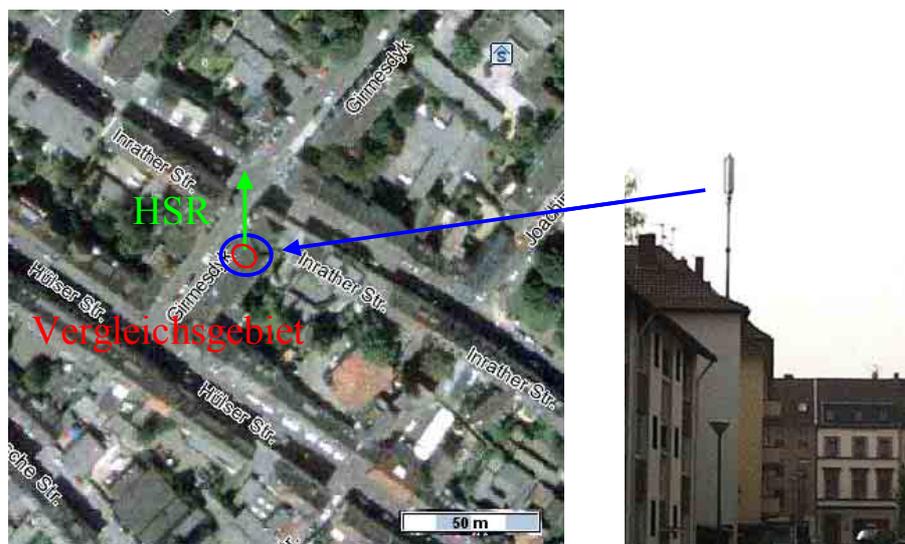


Bild 3.6.65: Mobilfunksendeanlage: Inrather Straße 146, 47803 Krefeld

Der Überblick über das Szenario und die zugehörigen Parameter sind den folgenden Tabellen zu entnehmen.

Szenario:	(6), (7)		
Charakteristik der Basisstation:	Berechnung der Immission innerhalb eines Gebäudes und unterhalb einer Basisstationsantenne		
	Ort	Sicht zur Basisstation	Abstand zur Basisstation in [m]
Vergleichsgebiet	Inhaus	nicht direkt (nLoS)	11

Tabelle 3.6.14: Überblick über das untersuchte Szenario

Ort:	Inrather Straße 146 47803 Krefeld					
Frequenz [MHz]	HSR [°]	Höhe [m]	Downtilt mechanisch [°]	Downtilt elektrisch [°]	Antenne und Länge in [m]	BCCH-Leistung am Antenneneingang [W]
952	0	21,5	0	6 (fix)	K 739 662 2,58	5,725

Tabelle 3.6.15: Basisstations- und Simulationsparameter

Die Ergebnisse der einzelnen Softwarepakete werden im folgenden analog zu den vorangegangenen Beispielen vorgestellt.

In Bild 3.6.66 sind zwei separate Darstellungen zu sehen. Auf der linken Seite ist dreidimensionale Modellierung mit dem Programm EFC-400 und auf der rechten Seite die dazugehörigen Resultate. Die einzelnen Decken wurden mit einer jeweiligen Dämpfung von 3 dB angesetzt.

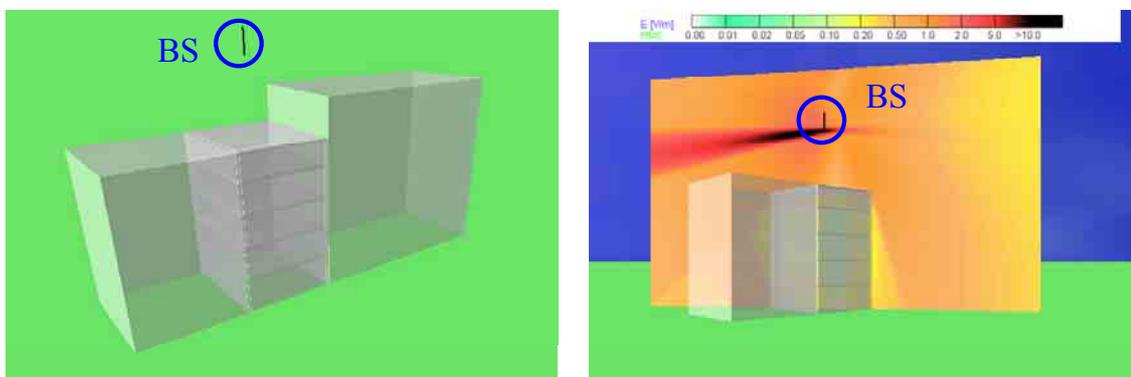


Bild 3.6.66: Modellierungsumgebung und Simulationsergebnis EFC-400

Die berechneten Ergebnisse von EMF-Visual sind in den folgenden zwei Teilbildern zu sehen. Auf der linken Seite ist die dreidimensionale Modellierung dargestellt. Um auch die Immissionsverteilung innerhalb des Gebäudes sichtbar zu machen, wird zur Veranschaulichung die Vorderseite des betrachteten Hauses weggenommen. Zu beachten ist hierbei, dass die einzelnen Decken aus Steinmaterial mit einer Dämpfung von 2,3 dB modelliert wurden. Leider ist kein Material mit einer Dämpfung von 3 dB in EMF-Visual integriert.

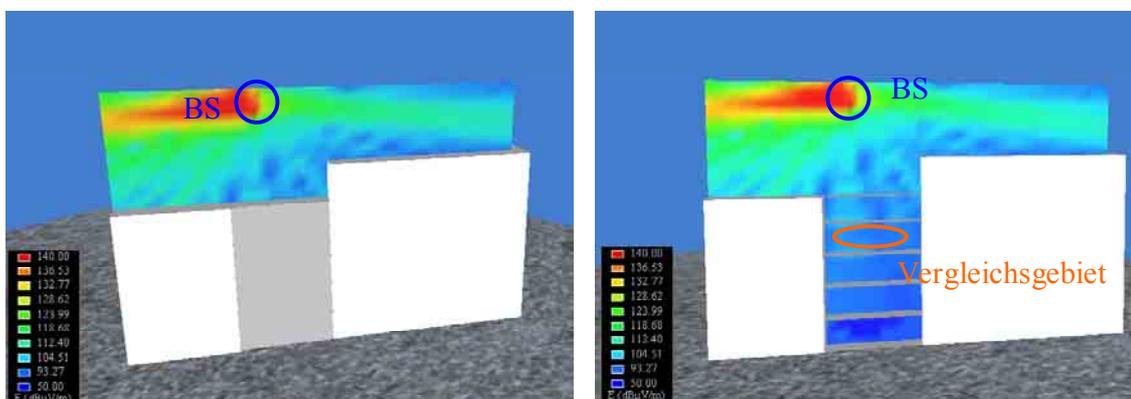


Bild 3.6.67: Modellierung und Simulationsergebnis mit dem Programm EMF-Visual

Bei der Simulation mit dem Programm Wireless Insite wurde als Material für die Decken und Wände Stein mit einer Dicke von 20 cm angenommen. Diese Konfiguration weist einen Dämpfungsfaktor von ca. 1,8 dB auf. In Bild 3.6.68 ist das Ergebnis zu sehen. Es ist deutlich die Vergleichsebene zu erkennen. Ferner wurden wieder für einen Punkt die einzelnen Empfangswege dargestellt. Die Vorderfront des Gebäudes wurde entfernt, um die Ergebnisse sichtbar zu machen.

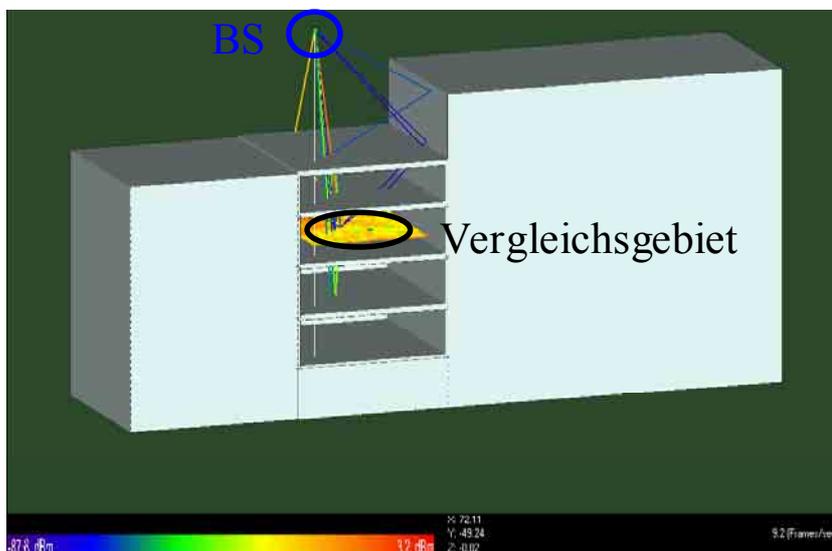


Bild 3.6.68: Modellierung und Simulationsergebnis mit dem Programm Wireless Insite

Die Ergebnisse der einzelnen Programme im Vergleichsgebiet werden mit der Messung in folgender Abbildung miteinander verglichen. Zusätzlich wurde die Immission bei reiner Freiraumausbreitung ohne Berücksichtigung des Gebäudes separat mit dem Programm Fieldview durchgeführt.

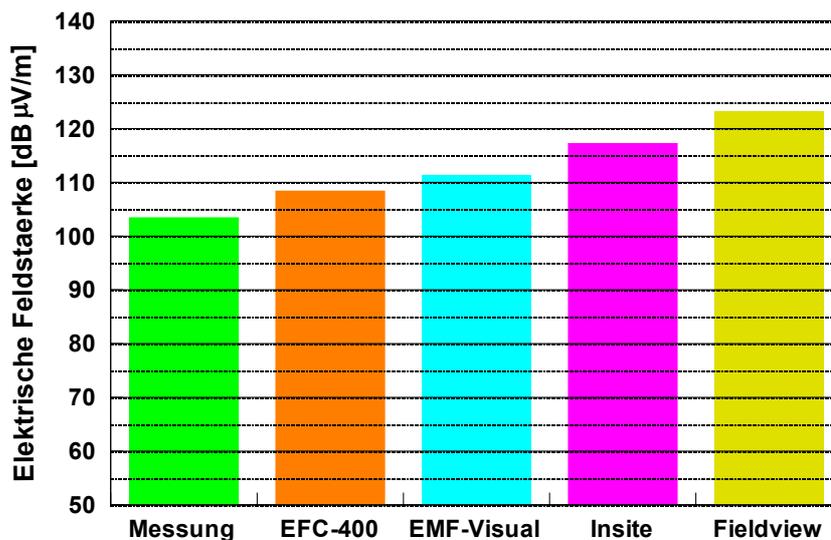


Bild 3.6.69: Vergleich der Simulations- bzw. Messwerte für den Basisstationsstandort Inrather Straße 146 (Krefeld) im Vergleichsgebiet (nLoS)

In Bild 3.6.69 sind die Simulationsergebnisse der einzelnen Programmen und das Messergebnis zu erkennen. Die Unterschiede hierbei sind durch unterschiedliche Dämpfungen oder auch Reflexionen zu erklären.

3.6.9 Auswertung der Berechnungsergebnisse

In folgendem Abschnitt werden die Einzelergebnisse an den oben untersuchten Standorten zusammenfassend ausgewertet.

Zunächst werden hier die Szenarien betrachtet, bei denen direkte Sicht zur Sendeantenne herrschte (LoS). In Bild 3.6.70 sind die Abweichungen der Simulationsergebnisse vom gemessenen Wert dargestellt. Zu beachten ist hier, dass der Messwert genau genommen keinen echten Referenzwert darstellt, da auch er „ungenau“ ist. Deswegen wird zusätzlich zum Messwert die Messunsicherheit angegeben, die in Kapitel 2 mit ca. 3 dB abgeschätzt wurde. Dieser Bereich ist mit den roten Linien gekennzeichnet. Liegen die Ergebnisse in diesem Gebiet, kann von einer guten Vorhersage gesprochen werden

Die jeweiligen Balken entsprechen hierbei den oben simulierten Szenarien in folgender Weise:

- Balken 1: Standort - Handelsstraße 76, 46519 Alpen (Szenario 1)
- Balken 2: Standort - Hochstraße 1-3, 47443 Moers (Szenario 2)
- Balken 3: Standort – Hombergerstraße 162, 47441 Moers (Szenario 2)
- Balken 4: Standort – Hochstraße 57, 47798 Krefeld (Szenario 2, 4)
- Balken 5: Standort – Katharinenstraße 12, 44137 Dortmund (Szenario 2, 5; nah)
- Balken 6: Standort – Katharinenstraße 12, 44137 Dortmund (Szenario 2, 5; fern)
- Balken 7: Standort – Zum Niepmannshof 5, 47475 Kamp-Lintfort (Szenario 6)

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Programme außer einiger Ausnahmen einen Wert prognostizieren, der unter der Berücksichtigung der Messunsicherheit gut mit dem gemessenen Wert übereinstimmt.

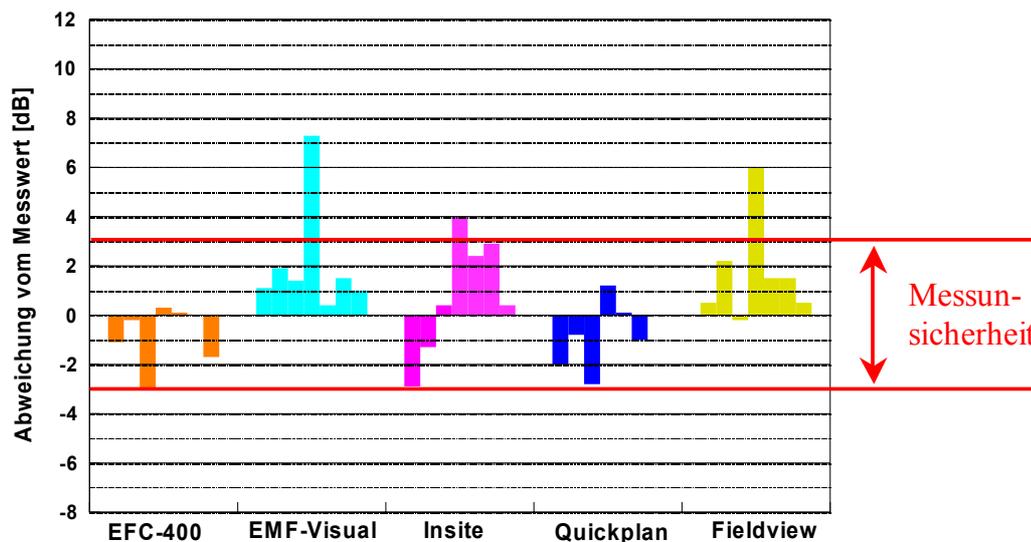


Bild 3.6.70: Abweichung der Simulationsergebnisse vom Messwert bei direkter Sicht zur Sendeanlage (LoS)

Im folgenden werden die Abweichungen der berechneten Immissionswerte bei denjenigen Konfigurationen betrachtet, bei denen keine direkte Sicht zur Sendeanlage herrschte. Diese nLoS Situationen können nochmals in zwei Untergruppen unterteilt werden. Zum einen lag das Vergleichsgebiet in Schatten von Gebäuden und zum zweiten lag es direkt im gleichen Gebäude, auf dem die Mobilfunkanlage montiert war. Die einzelnen Balken kennzeichnen die weiter oben simulierte Konfiguration in folgender Weise

- Balken 1: Standort - Hochstraße 1-3, 47443 Moers (Szenario 2,3)
- Balken 2: Standort - Hombergerstraße 162, 47441 Moers (Szenario 2,3)
- Balken 3: Standort - Inrather Straße 146, 47803 Krefeld (Szenario 6, 7)

Wie die Abweichungen bei den Szenarien mit direkter Sicht, werden in Bild 3.6.71 die Unterschiede für die Konfigurationen mit indirekter Sicht aufgezeigt. Die Messunsicherheit von 3 dB ist wiederum durch die zwei roten Linien gekennzeichnet.

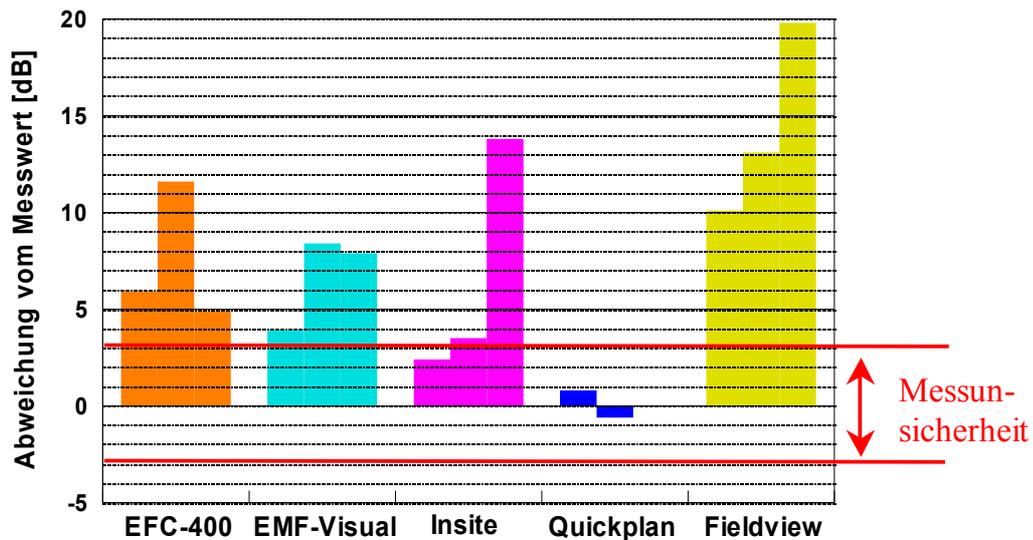


Bild 3.6.71: Abweichung der Simulationsergebnisse vom Messwert bei nicht direkter Sicht zur Sendeanlage (non LoS)

Es ist deutlich zu erkennen, dass die reine Freiraumberechnung inklusive einem Zuschlag von 3 dB (Fieldview) den gemessenen Wert grundsätzlich deutlich überschätzt. Eine Verbesserung hinsichtlich einer geringeren Überschätzung liefert hier die Freiraumberechnung mit Berücksichtigung von Bodenreflexion (Faktor 1,7 bzgl. der Leistungsflussdichte) und der Gebäudedämpfung (3 dB). Bei den auf Strahlenoptik basierenden Programmen kann festgehalten werden, dass sie zwar in der Regel die Immission auch überschätzen, aber im Mittel gesehen, den gemessenen Immissionswert genauer wiedergeben.

Die für diese Studie simulierten Szenarien lassen aufgrund ihrer Anzahl keine statistische Auswertung der Ergebnisse zu. Dennoch können folgende Feststellungen getroffen werden:

Liegt ein Szenario vor, in dem direkte Sicht zur Antenne herrscht (LoS), geben sowohl auf Freiraumausbreitung als auch auf Strahlenoptik basierende Programme eine sehr gute Näherung zum gemessenen Wert wieder.

Wird dagegen eine Konfiguration untersucht, in der keine direkte Sicht zur sendenden Antenne vorliegt (nLoS), überschätzt die Methode „Freiraumausbreitung + 3 dB“ die tatsächliche Immission stark. Eine Verbesserung hinsichtlich einer geringeren Überschätzung liefert hier die Freiraumberechnung mit Berücksichtigung von Bodenreflexion (Faktor 1,7 bzgl. der Leistungsflussdichte) und der Gebäudedämpfung (3 dB). Auf Strahlenoptik basierende Programme liefern bessere Ergebnisse, die die tatsächliche Immission aber auch unterschätzen können. An dieser Stelle kann zwischen drei Fällen unterschieden werden:

1. Wird eine Worst-Case Prognose gefordert, die unabhängig vom Szenario den tatsächlichen Wert der Immission in der Regel nicht unterschätzt, sollte die Berechnungsmethode „Freiraumausbreitung + 3 dB“ angewendet werden. Dieses hat aber die Konsequenz, dass in nLoS-Konfigurationen die Überschätzung der Immission groß sein kann. Speziell für diese Methode werden in [WUSCH 03] Daten zur Verfügung gestellt, die eine begrenzte statistische Auswertung erlauben. Die Ergebnisse eines Vergleichs von 63

Messpunkten mit den dazugehörigen Berechnungen nach der hier betrachteten Methode sind in folgender Tabelle zu sehen.

Für den Vergleich herangezogen	63 Messpunkte
Gute Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung	8 Messpunkte (12,7%)
Berechnete Feldstärke mehr als das 1,45-fache vom Messwert	54 Messpunkte (85,7%)
Berechnete Feldstärke weniger als 55 % vom Messwert	1 Messpunkt (1,6%)
Durchschnittlicher Unterschiedsfaktor (Messwert / Berechnung)	0,40 (d.h. ca. 8 dB)
Medianwert des Unterschiedsfaktors	0,30 (d.h. ca. 10 dB)
Spannweite des Unterschiedsfaktors	0,03 2,01
Unterschiedsfaktor bei Sichtverbindung (LoS)	0,56 (d.h. ca. 5 dB)
Unterschiedsfaktor bei fehlender Sichtverbindung (nLoS)	0,15 (d.h. ca. 16 dB)

Tabelle 3.6.16: Vergleich von Messung und Berechnung mit der Methode „Freiraumausbreitung + 3°dB aus [WUSCH 03]

2. Wird hingegen gefordert, dass die Prognose möglichst gut den tatsächlichen Wert wieder spiegelt, sollte auf alle Fälle die Gebäudedämpfung in der Berechnung berücksichtigt werden. Hierbei ist aber zu beachten, dass mit einer wesentlich komplizierteren Modellierung gerechnet werden muss. Auf Strahlenoptik basierende Programme mit der zusätzlichen Berücksichtigung von Reflexion, Streuung und Beugung geben in der Regel im Vergleich zu einer Messung den genauesten Prognosewert wieder – unter Umständen muss aber auch mit einer Unterschätzung der Immission gerechnet werden.
3. Wird bezüglich einer Grenzwertüberprüfung mittels der konservativen Methode „Freiraumausbreitung + 3 dB“ der Grenzwert überschritten, besteht folgende Möglichkeit: Mittels einer Berechnung mit Berücksichtigung von Dämpfung, Beugung, Reflexion und Streuung an Gebäuden in einem Gebiet werden diejenigen Areale bestimmt, in denen mit der maximalen Immission zu rechnen ist. Hier sollten anschließend aufgrund der Tatsache, dass durch dieses Verfahren auch Unterschätzungen der tatsächlichen Immission möglich sind, überprüfende Messungen durchgeführt werden (vgl auch [BAK 02]). Die Vorhersage dieser zu bestimmenden Gebiete hängt allerdings wie oben bereits beschrieben stark von der Genauigkeit der Eingabeparameter wie z.B. Gebäudematerialien zusammen. Mit zunehmender Genauigkeit kann hierbei das Gebiet, in dem die überprüfenden Messungen durchgeführt werden müssen, minimiert werden.

3.7 Beurteilung der Programme und Zusammenfassung

Im folgenden Abschnitt wird, basierend auf den Erfahrungen bei der Anwendung der einzelnen Softwarepakete (Modellierung, Aufwand usw.) sowie der in den letzten Abschnitten ermittelten Genauigkeiten, eine zusammenfassende Bewertung bezüglich der Anforderungen, die in [BOR 02-1] an Rechenverfahren definiert wurden, vorgenommen.

Kriterium	Analytische Modelle		
	strahlenoptisch	feldtheoretisch	hybrid
Grenzwertüberprüfung	möglich	möglich	möglich
Frequenzbereich	ok	ok	ok
Entfernungsbereich	ok	wenige Meter	ok
Anwendungsbereich	alle	in Gebäuden	städtisch
Systematische Fehler	gering	sehr gering	gering
Bedienungsfreundlichkeit	aufwändig	sehr aufwändig	sehr aufwändig
Erford. Eingabedaten	hoch	sehr hoch	sehr hoch
Erforderliche Rechenleistung / Speicherbedarf	hoch	sehr hoch	sehr hoch
Genauigkeit	hoch	sehr hoch	sehr hoch
Auflösung	hoch	sehr hoch	sehr hoch

Tabelle 3.7.1: Vergleich der unterschiedlichen Berechnungsverfahren (vgl. [BOR 02-1])

Im folgenden werden die Umsetzung bzw. die Behandlung der in Tabelle 3.7.1 aufgeführten Kriterien in den einzelnen Softwarepaketen, die für die Untersuchungen in diesem Forschungsvorhaben herangezogen wurden, ausführlich behandelt. Da viele der zu untersuchenden Kriterien eng miteinander verbunden sind, werden die Betrachtungen für jedes Softwarepaket separat vorgestellt.

3.7.1 Empire und Feko

Zunächst wird kurz auf das feldtheoretische Programm Empire und das Hybridprogramm Feko eingegangen. Wie schon in [BOR 02-1] beschrieben sind die Programme aufgrund der Bedienungsfreundlichkeit, der erforderlichen Eingabedaten und der Rechenleistung sowie Speicherbedarf sehr aufwändig. Beispielsweise benötigt das Programm Empire für die Raumsimulation mit Person (vgl. Abschnitt 3.6.1.1) bei einer Frequenz von 900 MHz ca. 1 Gbyte Arbeitsspeicher und mehrere Stunden Rechenzeit. Hieran wird bereits deutlich, dass u.a. aufgrund des hohen Bedarfs an Arbeitsspeicher Simulationen mit einem feldtheoretischen Programm auf einen kleinen Raum begrenzt sind und keinesfalls das gesamte Umfeld einer Basisstation adäquat erfasst werden kann.

Darüber hinaus ist die Integration der Basisstationsantennen in einem feldtheoretischen bzw. hybriden Softwarepaket schwierig und mit hohem Aufwand verbunden: Der genaue Antennenaufbau bzgl. elektrischer und geometrischer Eigenschaften muss hierbei zunächst einmal bekannt sein, um anschließend detailgenau modelliert werden zu können. Allein dieser Punkt verlangt ein großes technisches Know How und viel Erfahrung im Umgang mit den Softwarepaketen. Die Eingabe eines Antennendiagramms ist in der Regel nicht möglich. Das durch die Modellierung der Antenne erhaltende Abstrahlendiagramm spiegelt darüber hinaus wie in Abschnitt 3.4 beschrieben nur einen Betriebszustand (elektrischer Downtilt, Frequenz) wieder.

Es kann an dieser Stelle demnach festgehalten werden, dass das Programm Empire durch den u.a. begrenzten Simulationsraum als nicht geeignet anzusehen ist, die Exposition in der Umgebung von Mobilfunkbasisstationen zu bestimmen. Dieser zu untersuchende Simulationsraum steht bei dem Softwarepaket Feko zwar zur Verfügung, aber der hohe Aufwand der Modellierung (z.B. Mobilfunkantenne) und das große einzubringende Know How stellt sehr hohe Anforderungen an den Benutzer. Sie sind deswegen nur für Benutzer zu empfehlen, die bereits Erfahrung und Know How im Umgang mit der numerischen Feldberechnung aufweisen. Darüber hinaus sind auch profunde Kenntnisse in der Antennentechnik vonnöten.

Beide Programme sind auf der anderen Seite aber gut geeignet, Details Aussagen z.B. über den Einfluss der Montageumgebung auf die Abstrahlcharakteristik zu treffen. Ferner ist es möglich Ausbreitungserscheinungen in Wohnungen bzw. Gebäuden zu untersuchen, da es die Programme durch ihre sehr hohe Genauigkeit und Auflösung ermöglichen, Gegenstände mit ihren materialspezifischen Eigenschaften exakt zu modellieren. Hierbei sind feldtheoretische Programme auf einen kleineren Modellierungsbereich beschränkt als Hybridverfahren.

3.7.2 Wireless Insite

Bei *Wireless Insite* ist zu beachten, dass die Simulationsergebnisse die empfangenen Leistungen der einzelnen Receiverantennen sind. Es ist demnach außerhalb des Programms eine Umrechnung nach Formel (3.6.1) und (3.6.2) nötig, um die äquivalente elektrische Feldstärke zu erhalten. Eine direkte Grenzwertüberprüfung ist also nicht möglich.

Die Receiverantennen können zum Beispiel als ein zweidimensionales Gitter oder auf einer Strecke verteilt werden. Die Höhe über Grund und der Abstand der Antennen auf der Strecke oder auf dem Gitter können separat angegeben werden. Hierdurch ist eine schnelle Verteilung von einer großen Anzahl von Receiverantennen möglich. Indem dieses Gitter oder die Strecke auf ein bestimmtes Areal begrenzt werden, ist auch die Ermittlung der maximalen Feldstärke in diesem Gebiet möglich. Um ein flächendeckendes, dreidimensionales Bild einer Immissionslage zu berechnen, müssen im gesamten Simulationsraum Receiverantennen verteilt werden. Je nach Abstand dieser Antennen und Dimension des Berechnungsraumes ist mit einer großen Anzahl von Receiverantennen und damit auch mit einem großen Rechenaufwand zu rechnen (für 1000 Receiverantennen im Innenstadtbereich ist eine Rechenzeit von ca. ½ Stunde nötig.). Hierfür erscheint es sinnvoll, zuerst eine grobe Berechnung mit einem großen Abstand der Receiverantennen zu wählen, um Bereiche mit einer hohen Immission zu bestimmen. Daran anschließend können diese ermittelten Bereiche mit einer höheren Genauigkeit (d.h. dichterem Abstand der Empfangsantennen) untersucht werden. Darüber hinaus ist

als Nachteil festzuhalten, dass die *kombinierte Berechnung* der Beiträge mehrerer Basisstationen mit Wireless Insite (Version 1.4.4) nicht möglich ist.

Das Programm beinhaltet die Frequenzbereiche für GSM 900, GSM 1800 und UMTS und ist für den Fernfeldbereich geeignet. Es können alle relevanten Umgebungen (ländliche Gebiete, Vor- und Innenstädte) berechnet werden. Auch die Berechnung der Feldstärken innerhalb von Gebäuden ist mit Wireless Insite möglich. Generell können *Abstrahlcharakteristiken* aus Herstellerdaten in das Programm eingefügt werden. Einen Fehler gibt es in der Version 1.4.4 wie oben bereits beschrieben bei dem Import eines Antennendiagramms im MSI-Format. Umgangen werden konnte dieser, indem eine generierte dreidimensionale Abstrahlcharakteristik eingefügt wurde. Im Bezug auf die *Bedienungsfreundlichkeit* kann festgehalten werden, dass ein Grundverständnis der Materie grundsätzlich notwendig ist – auch um Fehlerquellen (vgl. Abschnitt 3.5) minimieren zu können. Der Benutzer sollte erkennen, ob die Ergebnisse plausibel sind. Ferner sollten einige kleinere Berechnungen durchgeführt werden, die eine Überprüfung mit einer analytischen Berechnung erlauben. Darüber hinaus erfordert das Programm ein technisches Grundverständnis vom Benutzer in der Art, dass Umrechnungen von dBm in z.B. dB μ V/m zur Kontrolle der Grenzwerte nötig sind.

Die *erforderlichen Eingabedaten* (Parameter der Mobilfunkanlage, Geodaten) können in das Programm importiert oder selbständig generiert werden. Zu beachten ist hierbei die Gebäudemodellierung. Die Koordinaten der Gebäudeecken, die sowohl in kartesischen, UTM oder Länge und Breite angegeben werden können, müssen bekannt sein oder aus dem Satellitenbild oder Katasterplan generiert werden. Eine Nachbearbeitung der Gebäude ist möglich. Die Rechenleistung und der Speicherbedarf sind wie oben bereits beschrieben eng verknüpft mit der Auflösung und der Genauigkeit. Alle für diese Studie berechneten Szenarien haben auf dem oben beschriebenen Computer nicht länger als 1 Stunde gedauert.

3.7.3 Quickplan

Im folgenden wird das Softwarepaket Quickplan im Hinblick auf die oben genannten Kriterien näher beschrieben. Die Simulationsergebnisse können sowohl in elektrischer Feldstärke als auch in empfangener Leistung dargestellt werden, so dass eine Überprüfung der Grenzwerte möglich ist. Zu beachten ist, dass eine flächige Verteilung der Immission mittels der *Oberflächenberechnung* simuliert werden kann. Da hierbei aber nur der elektrische Feldstärkewert des stärksten empfangenen Strahls in das Ergebnis einfließt, ist eine Unterschätzung der tatsächlichen Immission möglich. Um alle Empfangspfade betrachten zu können, gibt es die Methode der *Testpunktberechnung*. Hierbei müssen aber wie in Abschnitt 3.6 beschrieben, außerhalb des Programms die einzelnen einfallenden elektrischen Feldstärken addiert werden. Ab der Version 2.0 von Quickplan ist dieses auch innerhalb der Software möglich. In diesem Zusammenhang ist für die Grenzwertüberprüfung bzw. Ermittlung der maximalen Feldstärke in einem Areal zu beachten, dass die Receiverantennen nur *einzel*n platziert werden können, wodurch der Aufwand je nach Größe des zu untersuchenden Gebiets und Dichte der einzelnen Empfangsantennen stark ansteigen kann.

Für das Softwarepaket Quickplan ist zusammenfassend folgende Vorgehensweise zu empfehlen: Zunächst wird die sogenannte Oberflächenberechnung durchgeführt. In den Bereichen, in denen hierbei die größte Immission berechnet wurde, werden dann mittels Verteilung und

anschließender Berechnung von Testpunkten die genauen elektrischen Feldstärkewerte bestimmt. Hierbei ist wie oben bereits beschrieben zu beachten, dass die Verteilung von Testpunkten mitunter sehr aufwändig werden kann, da jeder einzelne Testpunkt separat eingegeben werden muss. Eine *kombinierte Berechnung* der Beiträge mehrerer Basisstationen ist mit Quickplan in der Oberflächenberechnung möglich. Bei der genaueren Testpunktvariante ist dieses nicht berücksichtigt. Das Programm beinhaltet die Frequenzbereiche für GSM 900, GSM 1800 (ab Version 2.0 u.a. auch UMTS) und ist für den Fernfeldbereich geeignet. Es können alle relevanten Umgebungen (ländliche Gebiete, Vor- und Innenstädte) berechnet werden. Die Simulation der Feldstärken innerhalb von Gebäuden ist mit Quickplan nicht möglich. Generell können *Abstrahlcharakteristiken* aus Herstellerdaten in das Programm eingefügt werden. Im Bezug auf die *Bedienungsfreundlichkeit* kann auch hier festgehalten werden, dass ein Grundverständnis der Materie notwendig ist. Der Benutzer sollte erkennen, ob die Ergebnisse plausibel sind. Darüber hinaus sollte der Anwender geübt im Umgang mit erdbezogenen Koordinatensystemen sein (UTM, Länge/Breite). Eine Eingabe über kartesische Koordinaten ist nicht möglich.

Die *erforderlichen Eingabedaten* (Parameter der Mobilfunkanlage, Geodaten) können in das Programm importiert oder selbständig generiert werden. Bei der Gebäudemodellierung ist zu beachten, dass die Eckpunkte der Häuser über ein im Programm integriertes Tool anhand von Satelliten- oder Katasterbildern mittels eines Cursors bestimmt werden können. Eine Nachbearbeitung der so erhaltenen Gebäude ist möglich. Alle für diese Studie berechneten Szenarien konnten problemlos auf dem oben beschriebenen Computer mit einer maximalen Zeitdauer von ½ Stunde simuliert werden. Mit Quickplan ist es auch möglich, Hardwareressourcen von anderen Computern in einem Netzwerk über Auslagerung von Berechnungen zu nutzen und die Simulation somit zu beschleunigen.

3.7.4 EMF-Visual

Beim Programm EFM-Visual können die simulierten Ergebnisse direkt im Programm mit den Grenzwerten der 26. BImSchV verglichen werden. Generell ist es möglich ein flächendeckendes, dreidimensionales Bild einer Immissionslage zu berechnen. Wie aber während der Beschreibung der einzelnen untersuchten Szenarien schon angemerkt, erhöht sich die Rechenzeit erheblich, wenn Objekte mit materialspezifischen Parametern eingefügt werden. So konnte die Rechenzeit von den oben durchgeführten Simulationen nur dadurch begrenzt werden, dass nicht alle Gebäude, sondern nur die in unmittelbarer Umgebung des zu untersuchenden Areals für die Berechnung berücksichtigt wurden (Reduktion der Rechenzeit von 8 Tagen auf 1 Stunde). In diesem Zusammenhang ist auch die Modellierung der dreidimensionalen Umgebung zu nennen. Ähnlich wie bei dem Programm Quickplan ist es möglich, basierend auf einem Satellitenbild oder Katasterplan die Häuserecken mittels eines Cursors zu definieren. Die so erhaltenen Gebäude stellen aber nur Gebäudehüllen dar, die in einer Berechnung nicht berücksichtigt werden. Um dieses dennoch gewährleisten zu können, müssen entweder quaderförmige Objekte oder horizontale oder vertikale Ebenen eingefügt werden, die dann den Gebäudehüllen angepasst werden müssen. Es ist nur eine Eingabe über kartesische Koordinaten möglich.

Eine *kombinierte Berechnung* der Beiträge mehrerer Basisstationen ist mit EMF Visual möglich. Ferner beinhaltet das Programm die Frequenzbereiche für GSM 900, GSM 1800 und UMTS. Es können alle relevanten Umgebungen (ländliche Gebiete, Vor- und Innenstädte) berechnet werden (hierbei sei aber nochmals die Einschränkung in der Gebäudeanzahl zu nennen). Die Simulation der Feldstärken innerhalb von Gebäuden ist mit EMF-Visual möglich. Die Berücksichtigung der Geländehöhe ist aber nicht vorgesehen. Abstrahlcharakteristiken aus Herstellerdaten können in der Form in das Programm integriert werden, indem das Abstrahlverhalten der Antenne bestehend aus der vertikalen Strahlungsbreite, deren prozentualen Fehler, der Anzahl der Unit-Cells (vgl. Abschnitt 3.3.2) und deren Abstand und der Dämpfung des ersten Nebenzipfels angegeben wird. Eine Unit-Cell wird hierbei durch die horizontale Strahlungsbreite und dem Front to Back Ratio definiert.

Die Antennenbehandlung basiert auf einer Antennenmodellierung aus sogenannten Unit-Cells (zum Beispiel besitzt eine Unit-Cell die Abstrahlcharakteristik eines Dipols innerhalb einer Mobilfunkantenne). Diese haben den Vorteil, dass auch das Nahfeld einer Antenne nachgebildet werden kann. Gängige Mobilfunkantennen sind im Programm bereits implementiert. Eine Integration einer Antennencharakteristik nach Abschnitt 3.4.5 in das Programm ist nicht möglich. Daher kann nur *ein* Betriebszustand bezüglich des elektrischen Downtilts und der Frequenz mit *einer* Simulation berechnet werden. Die Aktualisierungserfordernisse einer Berechnung entsprechen demnach mindestens dem gleichen Zyklus wie er im Frequenzplanwechsel vorgesehen ist. Hierbei ist die Umstellung der elektrischen Downtilts nicht berücksichtigt. Wie auch bei den vorher beschriebenen Softwarepaketen sollte der Benutzer in der Lage sein zu erkennen, ob die berechneten Ergebnisse plausibel sind.

3.7.5 EFC-400

Abschließend folgt eine nähere Beschreibung des Programmpakets EFC-400. Wie auch bei EMF-Visual ist eine Überprüfung der Grenzwerte nach der 26.BImSchV direkt im Programm integriert. Die Berechnung erfolgt nur in einer der drei senkrecht aufeinander stehenden Ebenen des dreidimensionalen Raumes, die beliebig verschoben werden können (vgl. hierzu Bild 3.7.1). Die Grenzwertüberprüfung bzw. Ermittlung der maximalen Feldstärke ist in einer Simulation demnach nur in einer Ebene möglich.

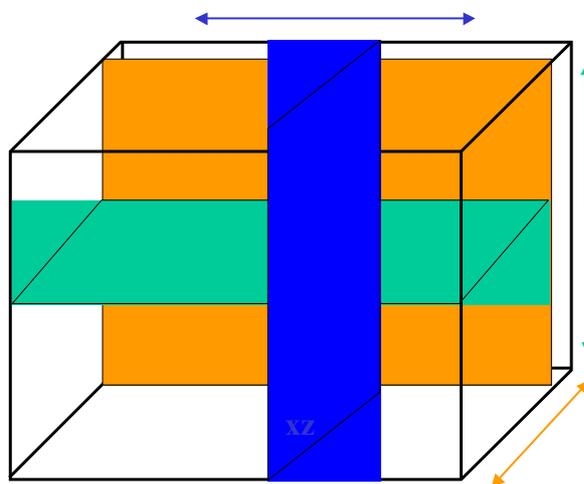


Bild 3.7.1: Die drei verschiedenen Simulationsebenen in EFC-400.

Die Simulation zum Erhalt eines dreidimensionalen Bildes einer Immissionslage erfordert etliche Simulationen, die getrennt voneinander durchgeführt werden müssen. Das Programm beinhaltet die Frequenzbereiche für GSM 900, GSM 1800 und UMTS und ist für den Fernfeldbereich geeignet. Es können alle relevanten Umgebungen (ländliche Gebiete, Vor- und Innenstädte) berechnet werden. Auch die Berechnung der Feldstärken innerhalb von Gebäuden ist mit EFC-400 möglich. Generell können *Abstrahlcharakteristiken* aus Herstellerdaten in das Programm eingefügt werden. Somit ist es auch möglich, ein synthetisiertes Abstrahl-diagramm wie in Abschnitt 3.4.5 beschrieben einzubinden. Eine kombinierte Berechnung der Beiträge mehrerer Basisstationen ist möglich

Im Bezug auf die *Bedienungsfreundlichkeit* muss ebenfalls festgehalten werden, dass ein Grundverständnis der Materie vonnöten ist. Der Benutzer sollte erkennen, ob die Ergebnisse plausibel sind. Ferner sollten einige kleinere Berechnungen durchgeführt werden, die eine Überprüfung mit einer analytischen Berechnung erlauben.

Bei der Gebäudemodellierung ist folgendes zu beachten. Es kann ein Hintergrundbild (Satellitenbild oder Katasterbild) in das Programm eingefügt werden. Auf diesem Bild können Häuser platziert werden. Hierfür ist es nötig, die Eingabedaten (Breite, Länge, Drehwinkel) so lange zu variieren, bis der Grundriss mit dem auf dem Bild in Größe und Position übereinstimmt. Eine Modellierung von verwinkelten Häusern ist nur durch eine Verschachtelung mehrerer Häuser möglich, was aber mit einer Vergrößerung der Dämpfung einhergeht.

Alle oben betrachteten Szenarien wurden mit einer maximalen Zeitdauer von ½ Stunde simuliert. Hierbei ist aber wieder zu beachten, dass eine Vergrößerung der Auflösung einer Verlängerung der Rechenzeit entspricht.

3.7.6 Fazit

Ein Überblick über die Programme und die jeweiligen Kriterien ist der Tabelle 3.7.2 zu entnehmen. Ein "o" steht hierbei für grundsätzlich integriert. Mit "-" wird verdeutlicht, dass das zugehörige Kriterium nicht erfüllt ist. Ein „+“ dagegen zeigt an, dass das Kriterium im Programm integriert ist und die Art und Weise der Behandlung gegenüber den anderen Softwarepaketen hervorzuheben ist.

Zusammenfassend kann an dieser Stelle gesagt werden, dass alle Softwarepakete sowohl ihre Vorteile aber auch Nachteile im Vergleich zu den anderen Programmen haben (siehe Tabelle 3.7.2) Eine generelle Bewertung, welches Softwarepaket am besten geeignet ist, ist deswegen nicht möglich.

Sowohl auf Freiraumausbreitung als auch auf Strahlenoptik basierende Programme geben bei einer Konfiguration, bei der direkte Sicht zur Antenne herrscht (LoS), eine sehr gute Näherung zum gemessenen Wert wieder. Wird dagegen eine Konfiguration untersucht, in der keine direkte Sicht zur sendenden Antenne vorliegt (nLoS), überschätzt die Methode „Freiraumausbreitung + 3 dB“ die tatsächliche Immission stark. Eine Verbesserung hinsichtlich einer geringeren Überschätzung liefert hier die Freiraumberechnung mit Berücksichtigung von Bodenreflexion (Annahme: Faktor 1,7 (trockener Boden) bzgl. der Leistungsflussdichte) und der Gebäudedämpfung (3 dB). Auf Strahlenoptik basierende Programme liefern insgesamt bessere Ergebnisse. Hierbei ist aber zu beachten, dass die tatsächliche Immission unter

Umständen auch unterschätzt werden kann. Ein Maß für die Fehlbewertung ist sicherlich auch abhängig von den eingesetzten Materialparametern für Gebäude. So hat z.B. die Berechnung für das Szenario 6 (siehe Abschnitt 3.6.6) gezeigt, dass die Annahme von einfachem Fensterglas eine deutliche rechentechnische Überschätzung zur Folge hatte. Für eine genaue Simulation müssen demnach nicht nur detaillierte Gebäudeangaben, sondern auch die verwendeten Materialien vorliegen. Hierbei ist aber auch zu beachten, dass in den einzelnen untersuchten Programmen selbst bei denselben Baustoffen Unterschiede in den Materialparametern auftreten (siehe Abschnitt 3.6.1.4).

Im Sinne einer Worst Case Abschätzung sollte demzufolge mit Freiraumausbreitung inklusive eines Zuschlages von 3 dB gerechnet werden, was gegenüber den strahlenoptischen, feldtheoretischen und den Programmen, die die Gebäudedämpfung berücksichtigen, den Vorteil einer wesentlich einfacheren Modellierung bietet.

Darüber hinaus ist in diesem Zusammenhang festzuhalten, dass eine Integration des synthetisierten Antennendiagramms in EMF-Visual nicht möglich ist, so dass hier jeweils nur ein möglicher Betriebszustand der Mobilfunksendeanlage simuliert werden kann.

Die Abschätzung der Einarbeitungszeit in die einzelnen Softwarepakete kann in Abhängigkeit von bereits vorhandenem Know How und Erfahrung des anwendenden Benutzers differieren und deswegen nur qualitativ angegeben werden. Generell wird die Dauer natürlich durch die Anzahl der zu berücksichtigten Parameter beeinflusst. In der folgenden Tabelle ist eine qualitative Übersicht über einzelnen Einarbeitungszeiten und die Zeiten angegeben, ein typisches Szenario einzugeben, durchzurechnen und auszuwerten.

Softwarepaket	Einarbeitungszeit	Zeit für typischen Basisstationsstandort
Fieldview	Stunden	Stunden
EFC-400	Tage	Tag
EMF-Visual	Tage	Tag
Wireless Insite	Woche	Tag
Quickplan	Woche	Tag

Tabelle 3.7.4: Vergleich der Einarbeitungszeit bzw. der Zeit für die Modellierung, Berechnung und Auswertung eines typischen Szenarios zwischen den einzelnen Programmen

	EFC - 400 (Version 5.04)	EMF-Visual (Version 2.1)	Wireless Insite (Version 1.4.4)	Quickplan (Version 1.3.6)
Grenzwertüberprüfung	-im Programm integriert -kombinierte Berechnung möglich	-im Programm integriert -kombinierte Berechnung möglich	- <i>nicht</i> integriert -kombinierte Berechnung <i>nicht</i> möglich	- nicht integriert - kombinierte Berechnung bei Testpoint Variante <i>nicht</i> möglich - Einzelne Beiträge von empfangenen Strahlen werden nicht addiert
Frequenzbereiche				
GSM 900	0	0	0	0
GSM 1800	0	0	0	0
UMTS	0	0	0	-
Entfernungsbereich				
Nahfeld	0	0	-	0
Fernfeld (mindestens bis 200 m)	0	0	0	0
Anwendungsbereich				
Ländliche Gebiete	0	0	0	0
Vor – und Innenstädte	0	0	0	0
Inhaus	0	0	0	-
Systematische Fehler vom Programm	-Keine Beugungs- und Streueffekte - Nur Modellierung von Häusern mit rechteckigem Grundriss	-Fernfelddiagramm differiert von Herstellerdaten (Nur EIN Betriebszustand simulierbar (siehe Abschnitt 3.4))		
Bedienungsfreundlichkeit	Grundsätzliche Kenntnisse notwendig	Grundsätzliche Kenntnisse notwendig	Grundsätzliche Kenntnisse notwendig	Grundsätzliche Kenntnisse notwendig (auch für erdbezogene Koordinatensysteme)
Eingabedaten:				
Höhendaten	0	-	0	0
Gebäudedaten	0	0	0	+
Antennendiagramm (Import MSI-Format)	+	-	-	+
Materialdaten	0	+	+	0
Erforderliche Rechenleistung und Speicherbedarf	-Büro – PC -Rechenzeit abhängig von Auflösung (bei simulierten Szenarien bei 0,2m Auflösung maximal 1 Stunde)	-Büro – PC -Rechenzeit stark abhängig von Anzahl der Häuser (bei simulierten Szenarien bis zu 8 Tagen)	-Büro – PC -Rechenzeit abhängig von der Anzahl der Empfangsantennen (bei simulierten Szenarien maximal 1 Stunde)	-Büro – PC -Rechenzeit bei Oberflächenberechnung hauptsächlich abhängig von der Fläche (bei simulierten Szenarien maximal 10 min) - bei Testpoint-Berechnung abhängig von der Anzahl (wenige Minuten für 20 Testpunkte)
Minimal mögliche Auflösung	1 mm	1 cm	1 mm	1 cm

Tabelle 3.7.3: Überblick über die in der Studie betrachteten Softwarepakete

3.8 Flächendeckendes Kataster

Die Realisierung eines flächendeckenden Katasters ist prinzipiell nicht nur messtechnisch (wie in Kapitel 2 beschrieben), sondern auch rechentechnisch möglich. Dieses kann aber bei vertretbarem Aufwand nur in Form einer zweidimensionalen Darstellung erfolgen. Demnach muss festgelegt werden, in welcher Höhe diese Immission berechnet werden soll. Hierbei gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten: So könnten die Immissionen z.B. in Bodennähe und damit in dem Gebiet berechnet werden, in dem sich viele Menschen aufhalten. Dagegen ist wie in [BOR 02-1] festgestellt, mit der größten Immission eher in gleicher Höhe der Basisstationen zu rechnen. Gerade das Umfeld der Antenne ist von einer starken Höhenabhängigkeit der Immission geprägt.

Folgende Aspekte werden im weiteren in Bezug auf die berechnungstechnische Realisierung eines flächendeckenden Katasters diskutiert.

- Datenverfügbarkeit
- Aktualisierung
- Allgemeine Anforderungen an die eingesetzte Berechnungssoftware
- Genauigkeit
- Aufwandsabschätzung

3.8.1 Datenverfügbarkeit

Die zur Verfügung zu stellenden Daten spalten sich grob in zwei unterschiedliche Bereiche auf. Zunächst sind hier die Informationen zu nennen, die für eine dreidimensionale Modellierung benötigt werden. Wie in Abschnitt 3.5.1 beschrieben ist ein Großteil der Gebäudedaten in den Geobasisdaten der Liegenschaftskataster enthalten. In NRW sind zum Beispiel 80% der Fläche digital erfasst. Hinzukommend können auch Satellitenbilder zur Erstellung der Gebäude verwendet werden. Einziger Nachteil beider Varianten ist, dass die Höhen der einzelnen Gebäude nicht erfasst sind. Für die Realisierung eines flächendeckenden Katasters besteht demnach zunächst die Anforderung, diese Daten zu generieren. Die Höhendaten der Landschaft sind auf der anderen Seite im DGM5 verfügbar.

Der zweite Teil der notwendigen Informationen bezieht sich auf die Basisstationsparameter. Wie in Abschnitt 3.5.2 bereits beschrieben, sind einige der benötigten Daten der Standortbescheinigung zu entnehmen. Darüber hinaus ist aber die Mitarbeit der einzelnen Mobilfunkanbieter unumgänglich. Auch wenn sich die Betreiber in der Regel bzgl. der zur Verfügung zu stellenden Daten für einzelne Anlagen sehr kooperativ zeigen, ist bei der Bereitstellung der Daten für alle Anlagen einer Stadt, eines Bundeslandes oder sogar für ganz Deutschland mit erheblichen Einschränkungen zu rechnen.

Als Alternative könnte hierbei der Einbezug RegTP zu sehen sein, da hier bereits ein Großteil der benötigten Daten vorhanden ist.

3.8.2 Aktualisierung

Da wie in Abschnitt 3.4 detailliert beschrieben durch die Synthese der Abstrahlcharakteristik der Mobilfunkantenne mehrere Betriebszustände gleichzeitig simuliert werden können, kann der Zeitraum der Aktualisierung der Daten vergrößert werden. So ist zum Beispiel der anbieterabhängige Wechsel der Betriebsfrequenz einer Basisstation in der Berechnung bereits erhalten. Die Aktualisierung bezüglich der Basisstationsparameter muss demnach zu dem Zeitpunkt vorgenommen werden, wenn sich entweder die Standortbescheinigung einer Basisstation ändert oder ein ganz neuer Standort erstellt wird. Beispielsweise hat der derzeitige Aufbau der UMTS Mobilfunkstationen eine täglichen Änderung des Netzzustandes zur Folge, der dementsprechend auch in einer täglich notwendigen Aktualisierung resultiert.

Darüber hinaus ist beim Einsatz von Software, die die umliegende Bebauung simuliert, auch eine Aktualisierung erforderlich, wenn bauliche Änderungen in der Umgebung von Basisstationen durchgeführt werden.

3.8.3 Anforderungen an das eingesetzte Berechnungsverfahren

Im folgenden werden die Anforderungen zur Realisierung eines flächendeckenden Katasters bezüglich der Berechnung näher diskutiert. Grundsätzlich ist es möglich, mit allen hier vorgestellten Berechnungsprogrammen ein flächendeckendes Kataster zu realisieren. Dennoch gibt es bestimmte Rahmenbedingungen, die hierbei beachtet werden müssen.

Zunächst ist in diesem Zusammenhang der Umgang mit dem *Simulationsraum* zu diskutieren. Hierbei spalten sich die Anforderungen in zwei Gruppen auf. Zunächst sollte das Programm ein erdbezogenes Koordinatensystem beinhalten, damit die zu untersuchende Fläche exakt und eindeutig definiert werden kann. Da die Standorte der Basisstationen in Länge und Breite gegeben sind, ist dieses auch als Vereinfachung zum Einbinden der Mobilfunksendeanlagen zu sehen.

Hinzukommend erscheint es unter anderem bezüglich des Rechenaufwandes sinnvoll, den Simulationsraum in kleinere Untersuchungsgebiete aufzuspalten. Dieses könnte insofern geschehen, dass das Berechnungsgebiet aus einer Basisstation und einem Umkreis von mehreren 100 m besteht, in dem alle weiteren enthaltenen Basisstationen mit berücksichtigt werden. Diese Vorgehensweise hat aber zur Konsequenz, dass eine Vielzahl von Dateien generiert werden würden. Sie könnte durch eine datenbankbasierte Berechnung vereinfacht werden.

Als eine weitere Anforderung ist zu nennen, dass das Softwarepaket eine kombinierte Berechnung von mehreren Basisstationen gestatten muss. In der folgenden Tabelle sind die gerade beschriebenen Anforderungen und die Umsetzung in den einzelnen Programmen im Überblick zu sehen.

Softwarepaket \ Anforderungen	EFC-400	EMF-Visual	Wireless Insite	Quickplan
flächendeckende Berechnung	möglich	möglich	möglich (Verteilung einer Vielzahl von Empfangsantennen nötig (vgl. Abschnitt 3.7))	möglich (Oberflächenberechnung)
erdbezogenes Koordinatensystem	Nein (nur kartesisch)	Nein (nur kartesisch)	Ja	Ja
Kombinierte Berechnung von Basisstationsbeiträgen	Ja	Ja	Nein	Ja - bei Oberflächenberechnung
Aufspalten des Simulationsraumes: einzelne Dateien	Ja	Ja	Ja	Nein
Datenbank basiert	Nein	Nein	Nein	Ja

Tabelle 3.7.4: Vergleich der Anforderungen bezüglich eines flächendeckenden Katasters in Bezug auf das Berechnungsprogramm

Aus dieser Aufstellung ist zu sehen, dass bezüglich der berechnungstechnischen Realisierung eines flächendeckenden Katasters das Programm Quickplan Vorteile gegenüber den anderen Programmen aufweist. Gerade der datenbankbasierte Aufbau der Software stellt für die Umsetzung eine große Vereinfachung dar. Auf der anderen Seite ist aber die Einschränkung der Oberflächenberechnung zu sehen, da hierbei nur der stärkste empfangene Strahl berücksichtigt wird.

3.8.4 Genauigkeit

Die *Genauigkeit* der Berechnung hängt im allgemeinen von der Genauigkeit der Eingabeparameter ab. In dieser Studie hat sich gezeigt, dass eine gute Übereinstimmung zwischen der durch verschiedene Softwarepakete prognostizierten Immission und der tatsächlich gemessenen genau dann existiert, wenn eine LoS Konfiguration vorliegt. Dagegen wird bei nur indirekter Sicht zur Antenne die Immission durch „Freiraumausbreitung + 3 dB“ stark überbewertet, wohingegen auf Strahlenoptik basierende Programme bessere Ergebnisse liefern, die tatsächliche Immission aber auch unterschätzt werden kann.

In diesem Zusammenhang ist aber zu beachten, dass es nicht sinnvoll ist (siehe Abschnitt 3.6.1) die Feldstärken an einem bestimmten Punkt zu vergleichen, sondern ein Vergleichsgebiet zu verwenden.

3.8.5 Aufwandsabschätzung

Zur Aufwandsabschätzung werden im folgenden zwei vereinfachte Beispiele hinzugezogen. Es wird vorausgesetzt, dass alle benötigten Eingangsdaten (Geodaten, Satellitenbilder oder Kataster, Gebäudehöhen, Basisstationsparameter) vorliegen.

Zunächst wird als Simulationsraum das Stadtgebiet von Köln mit einer Fläche von 400 km² herangezogen. Zur Vereinfachung wird ferner angenommen, dass sich auf einem Areal von

1 km² jeweils nur eine Mobilfunksendeanlage bestehend aus drei Sektoren befindet, was einer Basisstationsanzahl von 400 entspricht. Es hat sich während der in dieser Studie durchgeführten Simulation gezeigt, dass für die Simulation mit Programmen (Strahlenoptik + EFC-400) unter den oben genannten Vereinfachungen mit einem Zeitaufwand von ca. 1,5 Tagen pro Basisstation zu rechnen ist. Werden diese vereinfachten Annahmen zugrunde gelegt, entspräche das einer Zeitdauer von ungefähr 3 Mannjahren für eine Realisierung eines flächendeckenden Katasters für das gesamte Stadtgebiet von Köln.

Als zweites wird die gesamte Fläche von Deutschland mit einer Größe von 375.000 km² betrachtet. Hierauf verteilen sich etwa 50.000 Basisstationen in ländlichen und städtischen Gebieten. Da bei ca. ¼ der Standorte Mehrfachbelegungen vorliegen und hierdurch die Umgebungsmodellierung nur einmal durchzuführen ist, wird für diese Abschätzung eine durchschnittliche Zeit *einem Tag* für die Modellierung und die Berechnung pro Basisstation angenommen. Hierdurch ergäbe sich ein Zeitaufwand von etwa 227 Mannjahren.

3.8.6 Fazit

Zusammenfassend kann an dieser Stelle festgehalten werden, dass eine berechnungstechnische Realisierung einen flächendeckenden Katasters wie die beiden vorherigen Beispiele belegen mit einem sehr großen Aufwand verbunden sind. Hierbei ist ferner zu beachten, dass die Beispiele zur Abschätzung noch keine Zeiten für Aktualisierungen aufgrund von Änderungen der Daten (Basisstation und Gebäude) enthalten. Darüber hinaus ist der Aufwand, die für eine Berechnung notwendigen Daten zu beschaffen, nicht unwesentlich.

Gerade bzgl. der Betreiberdaten stellt die rechentechnische Realisierung eines flächendeckenden Katasters gegenüber einer messtechnischen (wenn nicht auf maximale Anlagenauslastung extrapoliert wird) einen großen Nachteil dar, wobei die Berechnungen eher einen kontinuierlichen Verlauf der Immission liefern als diese Messungen leisten können.

Wie Messungen können natürlich auch Berechnungen in verschiedenen Höhen durchgeführt werden. Bezüglich der Messungen bedeutet dieses aber einen extremen Aufwand, wenn in Innenräumen gemessen wird (z.B. muss der Zutritt erst einmal beschafft werden). Deswegen ist es am einfachsten, Messungen für ein flächendeckendes Kataster outdoor durchzuführen, wodurch man aber keine Maximalwerte, sondern durchschnittliche Immissionswerte erhält. Analog sind in diesem Zusammenhang die Berechnungen zu beurteilen. Hierbei sind erschwerend die Baudaten der Gebäude zu sehen. Ungenaue Materialdaten resultieren hierbei direkt in einem ungenauen Berechnungsergebnis (vgl. Abschnitt 3.6.6), so dass auch ein rechentechnisches Kataster vorzüglich outdoor durchzuführen ist.

Danksagung

Bei der Realisierung dieses Projektes haben zahlreiche Personen und Organisationen mitgewirkt, denen an dieser Stelle ausdrücklich gedankt wird.

Dank gilt vor allem dem Auftraggeber, dem Bundesamt für Strahlenschutz, für die Initiierung und finanzielle Förderung vorliegenden Untersuchungsvorhabens, sowie für die vielen fachlichen Diskussionen und Anregungen.

Als besonders wertvoll haben sich zahlreiche Fachgespräche zu Mess- und Berechnungsverfahren mit Herrn Professor Wuschek von der Fachhochschule Deggendorf erwiesen. Insbesondere ist hier auch die Bereitstellung des Prognosetools Fieldview sowie von statistischen Vergleichsdaten Messung-Rechnung zu nennen.

Herrn Ryser vom Bundesamt für Metrologie und Akkreditierung (METAS) aus Bern sei an dieser Stelle für die fachlichen Diskussionen zu den in der Schweiz diskutierten Messmethoden und den dabei eingesetzten Antennen gedankt sowie für die Erlaubnis, Daten aus der METAS-Studie zu Vergleichsmessungen an Mobilfunk Basisstationen auszugsweise zu zitieren.

Darüber hinaus gilt unser Dank Herrn Dr. Plotzke von der FGEU GmbH für die kostenneutrale Bereitstellung der Software EFC-400 sowie Herrn Dr. Jakobus und Herrn Berger von der EM Software & Systems GmbH für die Unterstützung mit dem Umgang der Software Feko.

Des weiteren sind an dieser Stelle Herr Perrot und Herr Doare von der Firma Antennessa für die kostengünstige Bereitstellung der Software EMF-Visual und die darüber hinaus gehenden schnellen Reaktionen und die Unterstützung bei Fragen bzgl. der Software dankend zu erwähnen.

Für den nach mehreren Versuchen unsererseits hergestellten Kontakt zu der Firma TeS sei an dieser Stelle Frau Marsalek (Plattform Mobilfunk Initiativen Österreich) gedankt.

Ferner sind Herr Dr. Lo Forti, Herr Dr. Arenaccio, Herr Dr. Gensabella und Herr Dr. Ferrarotti der Firma TeS für die kostengünstige Bereitstellung der Software Quickplan dankend zu erwähnen. Sehr wertvoll waren die schnellen Reaktionen und die Unterstützung bei der Software und darüber hinaus gehende Fragen.

Nicht zuletzt hat auch die konstruktive Mitarbeit der Mobilfunk Netzbetreiber T-Mobile Deutschland GmbH, Vodafone D2 GmbH, E-Plus Mobilfunk GmbH & Co. KG und O2 (Germany) GmbH & Co. OHG einen großen Anteil am Gesamtprojekt. Dies betrifft vor allem die Bereitstellung der technischen Daten der betrachteten Anlagen, die für eine korrekte messtechnische Erfassung sowie die rechentechnische Simulation notwendig waren.

Literaturverzeichnis

- [26. BImSchV] **26. BImSchV**, *Sechszwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV)*, BGBl. Jg. 1996 Teil I Nr. 66, (20.12.1996).
- [ANFR/DR-15] **Protocole de mesure in situ**, *Visant à vérifier pour les stations émettrices fixes, le respect des limitations, en terme de niveaux de référence, de l'exposition du public aux champs électromagnétiques prévues par la recommandation du Conseil de l'Union Européenne du 12 juillet 1999 (1999/519/CE)*, Agence Nationale des Frequences, Republique Francaise, Edition (2001).
- [BAK 02] **R. Coray, P. Krähenbühl, M. Riederer, D. Stoll, G. Neubauer, B. Szentkuti**, *Immissionen in Salzburg*, Studie erstellt durch das Bundesamt für Kommunikation (BAKOM) in Zusammenarbeit mit dem Forschungszentrum ARC Seibersdorf research GmbH; dem Magistrat Salzburg, Amt für Umweltschutz; und der EMC-RF Szentkuti, Februar 2002
- [BLA 00] **N. Blaunstein**, *Radio Propagation in Cellular Networks*, Artech House, Norwood,
- [BMBF 04] **Mobilkommunikation und Rundfunk der Zukunft – Konzepte zur Minimierung der Exposition der Bevölkerung durch elektromagnetische Felder**, DLR im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung, Köln 2004
- [BOCH 03-1] **U. Bochtler, R. Eidher und M. Wuschek**, *Großräumige Ermittlung von Funkwellen in Baden-Württemberg, Beschreibung und wissenschaftliche Bewertung des Messvorhabens*, Ergebnisbericht botronic gmbh Stuttgart, Aschaffenburg/Stuttgart/Regensburg, (06. Juli 2003).
- [BOCH 03-2] **U. Bochtler, R. Eidher und M. Wuschek**, *Großräumige Ermittlung von Funkwellen in Baden-Württemberg, Ergebnisse des Funkwellenmessprojektes 2001-2003*, Ergebnisbericht botronic gmbh Stuttgart, Aschaffenburg/Stuttgart/Regensburg, (06. Juli 2003).
- [BOCH 03-3] **U. Bochtler, R. Eidher und M. Wuschek**, *Großräumige Ermittlung von Funkwellen in Baden-Württemberg, Messergebnisse Untersuchungsgebiet Stuttgart*, Ergebnisbericht botronic gmbh Stuttgart, Aschaffenburg/Stuttgart/Regensburg, (06. Juli 2003).
- [BGR] **BGR B11 (ZH1/257)**, *Elektromagnetische Felder*, Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektronik, Juni 2001.
- [BOR 01] **Chr. Bornkessel, O. Plotzke und J. Haala**, *Vorstudie zur Prüfung der Realisierbarkeit eines Katasters elektrischer und magnetischer Felder für den Immissionsschutz*, Studie für das Landesumweltamt Essen, Düsseldorf, (2001).

- [BOR 02-1] **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, Literaturstudie zu bestehenden Mess- und Berechnungsverfahren*, Zwischenbericht zum BfS-Projekt, Kamp-Lintfort, (2002).
- [BOR 02-2] **Chr. Bornkessel, A. Schramm und M. Neikes**, *Messverfahren zur Ermittlung der Immission durch Mobilfunk Basisstationen*, Studie für das MUNLV NRW, IMST 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, Analyse der Immissionsverteilung*, Zwischenbericht zum BfS-Projekt, Kamp-Lintfort, (2004).
- [BOR 96] **C. Bornkessel, T. Becks und U. Kullnick**, *Katastermäßige Erfassung der elektromagnetischen Belastung in Nordrhein-Westfalen: Vorschläge zur Durchführung*, IMST-Report für das MURL NRW, Kamp-Lintfort, (1996).
- [BOR 97] **Chr. Bornkessel, U. Kullnick, H.-P. Neitzke und H. Voigt**, *Maßnahmenkatalog zur Verminderung der elektromagnetischen Umweltbelastung*, Studie im Auftrag des MURL NRW, (1998).
- [BUWAL 01] **Messempfehlung für GSM-Basisstationen, Entwurf vom 20. März 2001**, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) und Bundesamt für Metrologie und Akkreditierung (METAS), Bern, (2001).
- [BUWAL 02] **Messempfehlung für GSM-Basisstationen**, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) und Bundesamt für Metrologie und Akkreditierung (METAS), Bern, (2002).
- [CEPT 04] **Revised ECC Recommendation (02)04**, *Measuring Non-ionising Electromagnetic Radiation (9 kHz – 300 GHz)*, Edition October, 2003.
- [COST 281] **Europäisches Forschungsprojekt COST 281**, Arbeitsgruppe „Base Station Emission Monitoring“, www.cost281.org.
- [EFC 03] **Narda Safety Test Solutions GmbH und FGEU GmbH**, *EFC-400 – Magnetic and Electric Field Calculation (Telecommunication, Power Lines and Stations)*, Benutzerhandbuch, Berlin 2003
- [EMF 04] Internetseite der Software EMF-Visual: www.antennessa.com
- [EMP 04] Internetseite der Software Empire: www.empire.de
- [EN 50360] **EN 50360**, *Produktnorm zum Nachweis der Übereinstimmung von Mobiltelefonen mit den Basisgrenzwerten hinsichtlich der Sicherheit von Personen in elektromagnetischen Feldern (300 MHz bis 3 GHz)*, CENELEC Norm, Brüssel, Juli 2001.
- [FEK 04] Internetseite der Software Feko: www.feko.co.za

- [FV 04] **Fieldview**; Software der EM-Institut GmbH, Carlstraße 5, 93049 Regensburg
- [GIL 01] **Francisco Gil, Ana R. Claro, José M. Ferreira, Carlos Pardelinha, Luis M. Correija**, *A 3D Interpolation Method for Base-Station-Antenna Radiation Patterns*; IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 43, No. 2, April 2001
- [GUM] **Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement**, „GUM“, ISBN 9267101889, (1993/1995).
- [HAI 04] **H. Haider**, *Paralleles Langzeitmonitoring von Basisstationssignalen unter Berücksichtigung meteorologischer Einflüsse*, EMV 2004 12. Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit, VDE-Verlag Berlin, Offenbach, S. 549-556, (2004).
- [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).
- [KAT] Internetseite der Firma Kathrein – www.kathrein.de
- [KEL] **H. Keller**, *Normgerechte Personenschutzmessungen im HF- und Mikrowellenbereich mit den Feldstärkemessgeräten EMR-20 / EMR-30*, Firmenschrift Wandel & Goltermann (jetzt: Narda Safety Test Solutions), verfügbar unter www.narda-sts.de/en/produktliteratur/fachartikel.htm
- [KRA 03] **A. Kramer, N. Nikoloski und N. Kuster**, *Analysis of Indoor RF-Field Distribution*, 15th. Intl. Zurich Symposium and Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility, Zürich, Supplement S. 305-306, (Februar 2003).
- [KVR] Internetseite des Kommunalverbands Ruhrgebiet – www.kvr.de
- [LAI 04] **Länderausschuss für Immissionsschutz**, *Hinweise zur Durchführung der Verordnung über elektromagnetische Felder (26. Bundes-Immissionsschutzverordnung)*, überarbeitete Fassung gemäß Beschluss des LAI, 107. Sitzung, (15.-17.03.2004).
- [LEH 03] **H. Lehmann, P. Fritschi und B. Eicher**, *The Variability of the Electric Field in Rooms Near Mobile Phone Base Stations*, 15th. Intl. Zurich Symposium and Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility, Zürich, S. 161-166, (Februar 2003).
- [NEU 03] **G. Neubauer, H. Haider, K. Lamedschwandner, M. Riederer und R. Coray**, *Measurement Methods and Legal Requirements for Exposure Assessment Next to GSM Base Stations*, 15th. Intl. Zurich Symposium and Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility, Zürich, S. 143-148, (Februar 2003).

- [NSMA 99] **Working Group 16 of NSMA: Recommendation WG16.99.050, NSMA – Antenna Systems – Standard Format for digitized Antenna Patterns, (20.05.1999).**
- [prEN 50401] **prEN 50401 Draft, Product Standard the Compliance of Radio Base Stations and Fixed Terminal Stations for Wireless Telecommunication Systems With the Basic Restrictions or the Reference Levels Related to General Public Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields (110 MHz - 40 GHz), When Put into Service, Draft basic standard, CENELEC TC 106X, (June 2004).**
- [QP 04] Internetseite der Software Quickplan : www.t-e-s.it
- [RAU 00] **Chr. Rauscher, Grundlagen der Spektrumanalyse, Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, München, 1. Aufl. (2000).**
- [RegTP] **EMF-Datenbank der RegTP, emf.regtp.de.**
- [REGTP 03] **Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post, Reg TP MV 09/EMF/3 Messvorschrift für bundesweite EMVU-Messreihen der vorhandenen Umgebungfeldstärken, Ausgabe Februar 2003, RegTP, Bonn, (28.02.2003).**
- [RS 04-1] **Radio Network Analyzer R&S TSMU, Data sheet Ver. 03.00, May 2004, in Verbindung mit Software „RFEX“, www.rohde-schwarz.com.**
- [RS 04-2] **Portables System für EMVU-Messungen R&S TS-EMF, Datenblatt Ausgabe 0203, www.rohde-schwarz.com.**
- [RYS 02] **H. Ryser, Vergleichsmessung an Mobilfunk-Basisstationen, METAS Bericht 2002-256-472, Bern-Wabern, (2002). Die auszugsweise Darstellung von einzelnen Messergebnissen und Grafiken in vorliegendem Bericht erfolgt mit ausdrücklicher Genehmigung des Verfassers.**
- [SAT5] Software D-Sat5
- [SCHÜ 01] **T. M. Schüller, Stellungnahme auf den gemeinsamen Fragenkatalog zur öffentlichen Anhörung „Mobilfunk“, Deutscher Bundestag, Ausschuss für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin, (02.07.2001).**
- [SICTA 01] **SICTA, Ermittlung der Immissionen und Überprüfung der NISV-Grenzwerte bei Mobilfunknetzen, Vorschlag der 4 Mobilfunkbetreiber zum BUWAL-Entwurf vom 20. März 2001, Schweiz, Bern, (2001).**
- [WI 04] Internetseite der Software Wireless Insite: www.remcom.com
- [WUSCH 02] **M. Wuschek, Feldstärkemessungen in der Umgebung von GSM-Mobilfunkbasisstationen, EMV 2002 10. Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit, VDE-Verlag Berlin, Offenbach, S. 683-692, (2002).**
- [WUSCH 03] **M. Wuschek, Ergebnisbericht über die Messungen elektromagnetischer Felder in der Umgebung von Mobilfunksendeanlagen im Kanton Schwyz; Zürich/Regensburg, 28.November 2003**

- [WUSCH 04] **M. Wuschek**, *Feldstärkemessungen in der Umgebung von UMTS-Mobilfunkbasisstationen*, EMV 2004 12. Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit, VDE-Verlag Berlin, Offenbach, S. 539-548, (2004).

Abkürzungsverzeichnis

3GPP	3rd Generation Partnership Project
AM	Amplitudenmodulation
BImSchV	Bundes-Immissionsschutzverordnung
BCCH	Broadcast Control Channel (engl.) → Sende Kontrollkanal
BS	Basisstation
CDMA	Code Division Multiple Access (engl.) → Codemultiplex
COST	European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research (engl.) → Europäische Zusammenarbeit auf dem Gebiet der wissenschaftlichen und technischen Forschung
DTX	Discontinuous Transmission (engl.) → Sprachausstattung in Sprechpausen
GO	Geometrische Optik
GSM	Global System for Mobile Communications (engl.) → Globales System für Mobilkommunikation
GUI	Graphical User Interface
HSR	Hauptstrahlrichtung einer Mobilfunksektorantenne
LAI	Länderausschuss für Immissionsschutz
LOS	Line of Sight (engl.) → Sichtverbindung
MU	Messunsicherheit
NLOS	Non Line of Sight (engl.) → keine Sichtverbindung
RegTP	Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post
RBW	Resolution bandwidth (engl.) → Auflösungsbandbreite
SAR	Spezifische Absorptionsrate
Span	Frequenzbereich bei frequenzselektiven Messungen = Stopfrequenz - Startfrequenz
SFH	Synthesizer Frequency Hopping
TCH	Traffic Channel (engl.) → Gesprächs- bzw. Nutzkanal
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System (engl.) → Universelles Mobiltelekommunikationssystem
UTD	Universal Theory of Diffraction (engl.) → Allgemeine Beugungstheorie
UTM	Universales Transversales Mercator System
VBW	Video bandwidth (engl.) → Videobandbreite

Verzeichnis häufig verwendeter Symbole

c	Konvertierungsfaktor für Messunsicherheit
d	(lateraler) Abstand
f	Frequenz
g_i	isotroper Gewinn (logarithmisches Maß)
h	Höhe
k	Antennenfaktor (logarithmisches Maß)
k	Erweiterungsfaktor für Messunsicherheit
r	(radialer) Abstand
u	Standardunsicherheit
u_c	kombinierte Standardunsicherheit
A_w	Antennenwirkfläche
D	maximale geometrische Ausdehnung der Antenne
E	Elektrische Feldstärke
G_i	isotroper Gewinn (lineares Maß)
H	Magnetische Feldstärke
K	Antennenfaktor (lineares Maß)
N	Anzahl der Kanäle pro Sektor
P	Leistung
S	elektrische Leistungsflussdichte
U	Spannung
U	erweiterte Messunsicherheit
Z_{F0}	Feldwellenwiderstand des freien Raumes
c_0	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
$\lambda_{(0)}$	(Freiraum-) Wellenlänge

Anhang: Vorgaben für eine Messnorm

In diesem Anhang werden diejenigen Aspekte zusammengefasst, die aus technischer Sicht relevant für eine Messnorm auf dem Gebiet der Ermittlung der Exposition der Bevölkerung durch elektromagnetische Felder in der Nähe von Mobilfunk Basisstationen unter besonderer Berücksichtigung der Eignung des Verfahrens zur Grenzwertüberprüfung sind.

Die Vorgaben konzentrieren sich auf die Messung von GSM Basisstationen. Im Abschlussbericht sind darüber hinaus Ausführungen zur Messung der Immissionen an UMTS Stationen angegeben. Allerdings wird hier noch Forschungsbedarf gesehen, der eine definitive Messnorm zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht sinnvoll erscheinen lässt.

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

1 Zweck

Diese Messnorm definiert ein Verfahren zur messtechnischen Ermittlung der Exposition der Bevölkerung durch elektromagnetische Felder im Umfeld von GSM Mobilfunk Basisstationen außerhalb des durch die RegTP festgelegten Sicherheitsabstandes. Das Verfahren ist zur Überprüfung der Grenzwerte geeignet.

(...)

2 Geltungsbereich

(...)

3 Begriffe

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

4 Vorgehensweise

4.1 Auswahl der Messpunkte

Die Messpunkte sind abhängig von der konkreten Aufgabenstellung zu wählen. Oftmals sind die Messpunkte aufgrund öffentlichen Interesses (z.B. sensibler Orte) schon vor Beginn der Messung festgelegt. In allen anderen Fällen sollen solche Messpunkte ausgesucht werden, die

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

An diesen Orten ist mit einem Maximum der Immission durch die Basisstation zu rechnen.

Unterstützend können Messungen mit einer Breitbandsonde oder numerische Simulationen eingesetzt werden, um die am höchsten exponierten Orte zu bestimmen.

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

4.2 Messgeräte und Hilfsmittel

Für die Messungen sind frequenzselektive Messgeräte (Spektrumanalysatoren bzw. Messempfänger) mit auf den jeweiligen Frequenzbereich abgestimmten Empfangsantennen einzusetzen. Unterstützend können Breitbandsonden verwendet werden, um z.B. die Orte bzw. Raumbereiche mit der höchsten Immission vorzuselektieren.

Als Antennen können logarithmisch-periodische Antennen, bikonische Antennen oder Dipolantennen eingesetzt werden. Logarithmisch-periodische Antennen sind aufgrund der geringen Beeinflussung durch den Messenden sowie durch Wände bzw. Mobiliar zu bevorzugen. Zur Reduzierung dieser Einflüsse sollen die Antennen an einer nichtmetallischen Verlängerung betrieben werden.

Alle Messgeräte und Hilfsmittel sind regelmäßig zu kalibrieren.

4.3 Messparameter

Es sind die Messparameter nach Tabelle 4.1 zu verwenden.

System	Startfrequenz [MHz]	Stopfrequenz [MHz]	RBW [kHz]	Mindest-VBW [kHz]	Detektor	Sweep-Time [ms]
GSM 900	935	960	100-300 ¹⁾	100-300 ²⁾	Peak oder RMS	100 ³⁾
GSM-R	921	960	100-300 ¹⁾	100-300 ²⁾	Peak oder RMS	100 ³⁾
GSM 1800	1805	1880	100-300 ¹⁾	100-300 ²⁾	Peak oder RMS	100 ³⁾

Tabelle 4.1 Empfohlene Einstellungen für die Messparameter bei frequenzselektive Messungen

- ¹⁾ Die korrekte Kanalbandbreite für GSM beträgt 200 kHz. Falls diese Filtergröße nicht vorhanden ist, sollte mit 300 kHz gemessen werden oder, sofern das Spektrum dicht belegt ist, auch mit 100 kHz. In diesem Falle sind aber die dadurch entstehenden, gerätespezifischen Messfehler zu quantifizieren.
- ²⁾ Die VBW ist gleich oder größer der RBW zu wählen.
- ³⁾ Die 100 ms gelten streng genommen nur für die Verwendung des RMS Detektors. Bei Anwendung des Peak Detektors sind auch kürzere Sweep Times möglich; hier kann auf die Auto Couple Funktion des Spektrumanalysators zurückgegriffen werden.

4.4 Messdurchführung

Die Messungen sind mit der Schwenkmethode durchzuführen.

Bei der Schwenkmethode wird ein Messvolumen am Messpunkt mit der handgeführten Messantenne abgetastet, wobei gleichzeitig die Vorzugsrichtung und die Polarisationsrichtung der Messantenne variiert werden. Der Schwenkbereich erstreckt sich vorrangig bis in ca. 1,75 m Höhe. Während des ganzen Suchvorgangs wird das Spektrum mit der „Maxhold“ Funktion des Messgerätes kontinuierlich erfasst. Es resultiert ein „Maxhold“ Spektrum, aus dem für jeden BCCH die zugehörige Feldstärke abgelesen und für die Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung weiter ausgewertet wird. Die Bewegung der Antenne muss bezogen auf die Sweep Time des Spektrumanalysators langsam erfolgen.

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

Für jedes der Mobilfunksysteme (GSM 900, GSM 1800) ist ein separater Schwenk durchzuführen. Eine Messzeit von mindestens 6 Minuten laut Normvorgabe ist nicht notwendig, da die für die weitere Auswertung erfassten BCCH-Kanäle in ihrer Intensität anlagenseitig nicht schwanken. Messzeiten von ca. 1 bis 2 Minuten pro Schwenkvorgang sind ausreichend.

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

Der Schwenkvorgang ist auch bei Messungen im Freien durchzuführen.

5 Auswertung

Die originär gemessenen Spannungs- bzw. Leistungspegel müssen in Feldstärke- oder Leistungsflussdichtewerte umgerechnet werden. Dies kann durch die Eingabe von entsprechenden Antennen Korrekturfaktoren in das Messgerät vor Beginn der Messungen erfolgen.

Ist dies nicht möglich, ist die Umrechnung nach Gleichung 5.1 bzw. 5.2 vorzunehmen.

$$S = \frac{P \cdot 4\pi \cdot f^2}{c_0^2 \cdot G_i} \quad (5.1)$$

$$E = \sqrt{S \cdot Z_{F0}} \quad (5.2)$$

Dabei ist:

P	am Spektrumanalysator gemessene Leistung in W,
S	für Grenzwertaussage benötigte Leistungsflussdichte in W/m ² ,
E	für Grenzwertaussage benötigte elektrische Feldstärke in V/m,
Z _{F0}	Freiraumwellenwiderstand,
G _i	isotroper Gewinn der Empfangsantenne, ohne Einheit,
f	Frequenz des mit der Antenne gemessenen Feldes in Hz,
c ₀	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum, c ₀ ≈ 3·10 ⁸ m/s.

Die Kabeldämpfung ist ebenfalls zu berücksichtigen.

Anschließend sind die gemessenen Werte auf den Zustand bei maximaler Anlagenauslastung zu extrapolieren. Dazu müssen von den Netzbetreibern der gemessenen und ggf. der umliegenden Mobilfunkanlagen folgende Informationen eingeholt werden:

- Anzahl der Sektoren (Zellen) pro Basisstation,
- bei der RegTP beantragte, maximale Anzahl der Kanäle pro Sektor (Zelle) und
- Frequenzen der unterschiedlichen Kanäle (BCCH und TCH).

Zur Ermittlung der maximal möglichen *Leistungsflussdichte* wird für jeden Sektor

- die durch den BCCH erzeugte Leistungsflussdichte identifiziert und mit der Anzahl der möglichen Kanäle (BCCH + TCH) multipliziert,
- im Spektrum die Immissionen durch die TCH herausgestrichen.

Dieses Vorgehen ergibt die maximal mögliche Leistungsflussdichte im betrachteten Sektor.

Mit den anderen Sektoren der Anlage ist gleichermaßen zu verfahren. Die maximale Gesamtleistungsflussdichte durch die komplette Anlage ergibt sich durch Summierung der maximalen Leistungsflussdichten der einzelnen Sektoren. Mit den Leistungsflussdichten durch benachbarte Stationen ist, sofern relevant, gleichermaßen zu verfahren. Somit ergibt sich für die maximale Gesamtleistungsflussdichte:

$$S_{\max, \text{gesamt}} = \sum_{i=1}^n (S_{i \max} \cdot N_i) \quad (5.3)$$

Dabei bezeichnet N die Anzahl der Kanäle pro Sektor (Zelle) und n die Zahl der Sektoren.

Wird die Gesamtmission als *elektrische Feldstärke* E ausgedrückt, dann wird

- die Gesamtmission eines Sektors durch Multiplikation der Feldstärke des BCCH mit der Quadratwurzel der Kanalzahl dieses Sektors gebildet und
- die Gesamtmissionen der Sektoren geometrisch aufsummiert:

$$E_{\max, \text{gesamt}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (E_{i \max} \cdot \sqrt{N_i})^2} . \quad (5.4)$$

In der Praxis kann es in Einzelfällen vorkommen, dass nicht der BCCH, sondern ein TCH die stärkste Immission von einer Zelle erzeugt. Ist dies der Fall, hat die Hochrechnung nicht mit dem BCCH, sondern auf Basis des entsprechenden TCH zu erfolgen.

Ein weiterer Spezialfall ergibt sich, wenn die Anlage seitens des Betreibers nicht mit der maximal beantragten, sondern einer geringeren Sendeleistung pro Sektor gefahren wird. Das Verhältnis beider Sendeleistungen ist dann in die Hochrechnung einzubeziehen, da der maximal mögliche Betriebszustand relevant für eine Grenzwertaussage ist.

Einige Netzbetreiber verwenden in ihren Mobilfunksystemen Frequency Hopping. Beim sogenannten Synthesizer Frequency Hopping (SFH) sind mehr Frequenzen in der Luft, als physikalische Kanäle vorhanden sind. Liegt dieser Fall vor, hat die Extrapolation nicht auf Basis der Anzahl der Hopfrequenzen, sondern auf Basis der Anzahl der tatsächlich vorhandenen physikalischen Kanäle zu erfolgen. Auch hier sind die Daten über die Sendeanlage vom Netzbetreiber vonnöten.

6 Dokumentation

Die Dokumentation soll die folgenden Punkte umfassen:

- Administrative Daten: Auftraggeber, Auftragnehmer mit den entsprechenden Anschriften und Kontaktpersonen, Messzeit, Messort, beteiligte Personen, eindeutige Nummerierung des Berichtes, eindeutige Bezeichnung der gemessenen Anlage
- Gegenstand der Messung
- Daten der untersuchten Mobilfunk-Sendeanlage: Ort der Anlage, Betreiberinformation, sofern verfügbar: Anzahl der Sektoren und Kanäle pro Sektor, ggf. Frequenzinformation der Kanäle, ggf. Information zu umliegenden Mobilfunk Sendeanlagen (mit Fotos)
- Beschreibung der Messpunkte (mit Fotos)
- Eingesetzte Messgeräte mit Hersteller, Seriennummer und Kalibrierdaten
- Beschreibung des eingesetzten Messverfahrens

- Messergebnisse: Originär gemessene Daten und Ergebnisse der Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung
- Angewendete Grenzwerte und Vergleich der Messergebnisse zu den Grenzwerten
- Messunsicherheit: Es ist ein Messunsicherheitsbudget nach Tabelle 6.1 aufzustellen. Dabei sind die Unsicherheitsbeiträge der eingesetzten Messgeräte, des Kabels und der Antennen sowie von Fehlanpassungen (Antenne – Kabel, Kabel – Messgerät, Antenne – Messgerät) zu berücksichtigen. Für verfahrensbedingte Unsicherheiten sind die Unsicherheiten der Probennahme sowie die Rückwirkung der Umgebung (Messpersonal, Wände, Mobiliar) auf das Messresultat abzuschätzen. Die Erweiterte Messunsicherheit ist mit einem Erweiterungsfaktor von 2 zu bilden (95 % Vertrauensintervall). Die Messunsicherheit ist nicht auf die Messergebnisse aufzuschlagen.

Komponente	Einflussfaktor	Spezifizierte Unsicherheit [dB]	Verteilung	Divisor	Standardunsicherheit [dB]
Empfänger	Faktor a				
Empfänger	Faktor b				
Empfänger	...				
Kabel	Absolutkalibrierung				
Kabel	Interpolation				
Antenne	Absolutkalibrierung				
Antenne	Interpolation				
Fehlanpassung	Antenne / Empfänger / Kabel				
Antennentyp	Umgebung				
Probennahme	Reproduzierbarkeit				
Kombinierte Standardunsicherheit					
Erweiterte Messunsicherheit (k=2)					

Tabelle 6.1 Aufstellung des Messunsicherheitsbudgets

- Endergebnis: Das Ergebnis der Messung ist kurz und prägnant darzulegen.

Zwischenbericht
"Literaturstudie zu bestehenden
Mess- und Berechnungsverfahren"

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	6
1.1	Zielsetzung des Forschungsvorhabens.....	6
1.2	Hintergrund des Forschungsvorhabens	6
1.3	Einordnung des vorliegenden Zwischenberichtes	7
2	Berechnungsverfahren im Mobilfunkbereich	8
2.1	Grundlagen der Funkwellenausbreitung	8
2.1.1	<i>Ausbreitungserscheinungen</i>	8
2.1.2	<i>Mehrwegeausbreitung</i>	9
2.1.3	<i>Wellenausbreitung innerhalb von Gebäuden</i>	10
2.2	Anforderungen an Berechnungsverfahren	10
2.3	Wellenausbreitungsmodelle.....	11
2.3.1	<i>Empirische und semi-empirische Modelle</i>	13
2.3.1.1	Empirische Ausbreitungsmodelle	13
2.3.1.1.1	<i>ITU-R-Modell</i>	13
2.3.1.1.2	<i>Log-distance Path-loss Modell</i>	14
2.3.1.1.3	<i>Okumura-Hata-Modell</i>	14
2.3.1.1.4	<i>COST-Hata-Modell [COS 99]</i>	15
2.3.1.2	Einfache Beugungsmodelle	16
2.3.1.2.1	<i>Epstein-Peterson-Modell</i>	17
2.3.1.2.2	<i>Deygout-Modell</i>	18
2.3.1.2.3	<i>Giovanelli-Modell</i>	18
2.3.1.3	Semi-empirische Ausbreitungsmodelle	18
2.3.1.3.1	<i>COST-Walfisch-Ikegami-Modell</i>	19
2.3.2	<i>Analytische Modelle</i>	21
2.3.2.1	Strahlenoptische Ausbreitungsmodelle	21
2.3.2.2	Feldtheoretische Modellierung	24
2.3.2.2.1	<i>Finite Elemente Methode (FEM)</i>	24
2.3.2.2.2	<i>Finite Differenzen Methode (FDM)</i>	24
2.3.2.2.3	<i>Finite Differenzen im Zeitbereich (Finite Difference Time Domain, FDTD)</i>	24
2.3.2.2.4	<i>Integralgleichungsmethode (Integral Equations, IE)</i>	25
2.3.2.3	Hybridmethoden	25
2.3.3	<i>Out-to-indoor Modelle</i>	25
2.4	Beurteilung der Eignung der verschiedenen Verfahren	26
2.4.1	<i>Zu erwartende Genauigkeiten</i>	26
2.4.2	<i>Voraussetzungen für die Anwendung analytischer Modelle</i>	28

2.4.3	<i>Grenzen der analytischen Modellierung</i>	28
2.5	Fazit	29
3	Messverfahren im Mobilfunkbereich	31
3.1	Einleitung	31
3.1.1	<i>Grundsätzliche Einteilung von Messaufgabenstellungen</i>	31
3.1.2	<i>Vorgehensweise bei der Untersuchung der Messverfahren</i>	32
3.2	Anforderungen an Messverfahren	32
3.3	Überblick über die Normungssituation	34
3.3.1	<i>Einleitung</i>	34
3.3.2	<i>Normungssituation in Deutschland</i>	35
3.3.3	<i>Internationale Ansätze</i>	37
3.3.4	<i>Zusammenfassung</i>	45
3.4	Beschreibung der vorhandenen Messverfahren	46
3.4.1	<i>Grundsätzliche Messverfahren</i>	46
3.4.2	<i>Auswahl der Messpunkte</i>	47
3.4.3	<i>Messgeräte und Hilfsmittel</i>	48
3.4.3.1	Frequenzselektives Messverfahren.....	48
3.4.3.2	Breitbandiges Messverfahren	50
3.4.3.3	Kalibrierung der Messgeräte	51
3.4.3.4	Nahfeld-Fernfeld Problematik	51
3.4.4	<i>Wahl der Messparameter</i>	51
3.4.5	<i>Messdurchführung</i>	52
3.4.5.1	Frequenzselektives Messverfahren.....	52
3.4.5.2	Breitbandiges Messverfahren	54
3.4.5.3	Mittelungsmethoden	54
3.4.6	<i>Auswertung</i>	56
3.4.6.1	Umrechnung der Messwerte auf Leistungsflussdichten bzw. Feldstärken.....	56
3.4.6.2	Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung (Spektrumanalysator)	57
3.4.6.2.1	<i>Vorgehen bei GSM Anlagen</i>	57
3.4.6.2.2	<i>Vorgehen bei UMTS Anlagen</i>	58
3.4.6.2.3	<i>Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung (Breitbandmessgerät)</i>	59
3.4.7	<i>Dokumentation</i>	59
3.5	Eignung der verschiedenen Messverfahren	60
4	Zusammenfassung	64
	Literaturverzeichnis	66

Abkürzungsverzeichnis.....	75
Verzeichnis häufig verwendeter Symbole.....	77

1 Einleitung

1.1 Zielsetzung des Forschungsvorhabens

Der vorliegende Zwischenbericht ist Bestandteil des Forschungsvorhabens "Entwicklung von Mess- und Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Exposition der Bevölkerung durch elektromagnetische Felder in der Umgebung von Funksendeanlagen" des Bundesamtes für Strahlenschutz.

Der flächendeckende Ausbau der Mobiltelefonnetze, der Aufbau der modernen breitbandigen Multimedianeetze (UMTS) sowie der Aufbau des terrestrischen digitalen Rundfunks führen zu einer Erhöhung der Feldexposition der Bevölkerung insgesamt. Nicht zuletzt hervorgerufen durch die neue UMTS Technologie und den damit verbundenen Bedarf an etwa 40.000 neuen Basisstationen allein in Deutschland [SCHÜ 01] stehen derzeit vor allem die *Mobilfunk Basisstationen* der GSM und UMTS Netze im Zentrum der öffentlichen Diskussion. Deswegen werden andere HF Emittenten, wie z.B. Rundfunk- oder Fernsehsender, von einer weiteren Betrachtung in dieser Studie ausgeklammert. Weiterhin unberücksichtigt bleiben die Immissionen durch die Mobilfunk Endgeräte, d.h. die Handys für GSM oder UMTS.

Für den Strahlenschutz ist es dabei dringlicher denn je, *verlässliche* Daten über die tatsächlich vorliegende elektromagnetische Immission im Umfeld der Mobilfunk Basisstationen zu erhalten. Hierzu sind neben modellmäßigen Berechnungen vor allem Messungen erforderlich. Ziel des Vorhabens ist es deshalb, Mess- und Berechnungsverfahren zu entwickeln, die geeignet sind, die Exposition von Personen im Umfeld von Mobilfunk Basisstationen zu ermitteln.

1.2 Hintergrund des Forschungsvorhabens

Die tatsächlich vorliegende Exposition der Bevölkerung im Umfeld von Mobilfunk Sendeanlagen ist oftmals nicht bekannt. Die im Rahmen der immissionsschutzrechtlichen Prüfung zugrunde gelegte Standortbescheinigung macht hierzu keine Aussagen, sondern bestätigt anhand einer konservativen Abschätzung (worst case Ansatz) lediglich die Einhaltung der gesetzlichen Grenzwerte.

Bezüglich einer *Berechnung* der vorliegenden Immissionen 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 Grund sind Berechnungen in der Praxis meist ungenau. Es müssen je nach Anwendungsfall Vereinfachungen gemacht werden, die den tatsächlichen Immissionswert überschätzen (z.B. zur Sicherstellung der Einhaltung der Grenzwerte im Rahmen der Standortbescheinigung) oder unterschätzen (z.B. zur Sicherstellung der Mindestfeldstärke in einem bestimmten Bereich im Rahmen der Funknetzplanung).

Die Hochfrequenzmesstechnik ist prinzipiell ebenfalls gut entwickelt. Es stehen für den gesamten Frequenzbereich grundlegende Messverfahren zur Verfügung. Diese sind jedoch oftmals nur sehr allgemein einsetzbar und nicht für ein spezielles Anwendungsgebiet, wie

etwa für die Bestimmung von Immissionen durch Mobilfunk Basisstationen in Innenräumen, angepasst. Oftmals sind die Verfahren auch primär für Laboranwendungen (z.B. EMV- oder Antennenmesstechnik in künstlichen, reflexionsarmen Umgebungen) oder Anwendungen unter definierten Randbedingungen entwickelt und validiert worden. Speziell für den Mobilfunkbereich besteht großer Klärungsbedarf. Problematisch sind hier zum Beispiel die erheblichen zeitlichen und örtlichen Schwankungen der Feldverteilung, die ein geeignetes Messverfahren und eine spezielle Methodik hinsichtlich der Messdurchführung erfordern. Verlässliche, gut definierte und genormte Verfahren zur Erfassung der tatsächlichen Immissionen, denen die Bevölkerung durch Mobilfunk Basisstationen ausgesetzt ist, existieren derzeit im nationalen und internationalen Rahmen nur ansatzweise.

Unter dem Begriff *Umfeld der Mobilfunk Basisstation* soll in diesem Forschungsvorhaben der Bereich außerhalb des durch die Standortbescheinigung festgelegten Sicherheitsabstandes (in der Regel einige Meter in Hauptstrahlrichtung der Antenne, in andere Richtungen weniger) bis zu einer Entfernung von etwa 200 m von der Mobilfunk Basisstation entfernt verstanden werden. Der Bereich innerhalb des Sicherheitsabstandes wird ausgeklammert, da dieser bereits durch die Standortbescheinigung als jener Bereich klassifiziert worden ist, in dem mit einer Überschreitung der gesetzlichen Grenzwerte zu rechnen ist. In diesem Bereich ist ein Zutritt von Personen beschränkt bzw. ein Aufenthalt der Allgemeinheit nicht zulässig. Eine Überprüfung der Immissionen in diesem Bereich ist deswegen irrelevant. Der somit für das *Umfeld* gewählte Entfernungsbereich umfasst diejenigen Gebiete, in denen der Erfahrung nach das Interesse der Bevölkerung an der vorliegenden Immissionsituation am größten ist.

1.3 Einordnung des vorliegenden Zwischenberichtes

Der vorliegende Zwischenbericht bezieht sich auf das Arbeitspaket 1 des Forschungsvorhabens. Im Sinne einer *Bestandsaufnahme* wird innerhalb dieses Arbeitspaketes der derzeitige Stand der Technik auf dem Gebiet der theoretischen Verfahren (Berechnungsverfahren) und der praktischen Verfahren (Messverfahren) zur Bestimmung der Immission im Umfeld der Mobilfunk Basisstationen ermittelt.

Es wird insbesondere diskutiert, inwieweit derzeit verfügbare Verfahren für eine Erhebung der tatsächlich vorliegenden Immissionen geeignet sind. Ausgangspunkt der Diskussion ist die Definition der Anforderungen, die allgemein an Verfahren zur Immissionsbestimmung unter realen Bedingungen in Innenräumen und im Freien zu stellen sind.

Die Untersuchungen werden im Rahmen einer Literaturstudie durchgeführt. In die Literaturstudie werden sowohl nationale, als auch internationale Arbeiten einbezogen.

2 Berechnungsverfahren im Mobilfunkbereich

Das vorliegende Kapitel gibt einen Überblick über existierende Berechnungsmethoden für elektromagnetische Feldstärken im Mobilfunkbereich. 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.

2.1 Grundlagen der Funkwellenausbreitung

2.1.1 Ausbreitungserscheinungen

Die Wellenausbreitung bei den für Mobilfunk 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:

Abschattung – tritt auf, wenn die Verbindungslinie zwischen Sender und Empfänger durch ein Hindernis unterbrochen wird. Bereiche im Funkschatten eines Hindernisses erreicht 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 Natur des Phänomens ist ähnlich der Reflexion, mit der Ausnahme, dass die einfallende Funkwelle in nicht eine, sondern in viele Richtungen zurückgeworfen wird. Streuung ist abhängig von den elektrischen Materialeigenschaften, der Oberflächenrauigkeit des Hindernisses und dem Einfallswinkel der Funkwelle.

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

2.1.2 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 Polarisierung) zu einer Gesamtfeldstärke. Diese Überlagerung bewirkt eine sehr starke Veränderlichkeit der resultierenden Feldstärke mit lokalen Maxima und Minima, die räumlich nur wenige Wellenlängen auseinander liegen. Dabei können sich Maximal- und Minimalwert leicht um den Faktor 100 – 1000 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

Hier dominiert der Anteil der direkten Welle, d.h. die ungestörte Ausbreitung entlang der Sichtlinie zwischen Sender und Empfänger. Die Anteile der reflektierten oder gebeugten Wellen sind dagegen deutlich kleiner.

- Beobachtungspunkt ohne Sichtverbindung zum Sender

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

2.1.3 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 Mobilfunkfrequenzen 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 sehr starken 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; die lokalen Maxima werden verschoben und auch im Pegel verändert.

2.2 Anforderungen an Berechnungsverfahren

An Verfahren zur Berechnung der Immission im Umfeld von Mobilfunk 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 wünschenswert. 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 900 MHz und 2,3 GHz (GSM 900, GSM 1800, UMTS) umfassen.

Entfernungsbereich: Der Gültigkeitsbereich des Modells muss den Bereich zwischen einigen Metern (Sicherheitsabstand) und 200 m von der Sendeanlage 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.

Bedienungsfreundlichkeit: Das Modell muss durch Personen ohne ingenieurwissenschaftliche Ausbildung bedienbar sein, robust gegen ungenaue Eingabedaten sein und die Ergebnisse auf einfache Art und Weise darstellen, um schnell eine Aussage hinsichtlich der Grenzwerte treffen zu können.

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.

Erforderliche Rechenleistung und Speicherbedarf: Das Modell muss auf einem Büro PC bei vertretbarer Rechenzeit implementierbar sein.

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.

Berücksichtigung der Montageumgebung der Sendeantenne: Das Modell sollte die Berücksichtigung der Einflüsse der Montageumgebung der Sendeantenne auf die Abstrahlung zulassen.

2.3 Wellenausbreitungsmodelle

Für die Planung von Funksystemen wurden Modelle zur Ermittlung des Ausbreitungsverhaltens elektromagnetischer Wellen entwickelt. Deren Einsatzbereich reicht von der Planung der Flächenversorgung (vielfach als Coverage bezeichnet) über die Abschätzung der Frequenzselektivität des Funkkanals durch Mehrwegeausbreitung bis hin zur Analyse der Interferenzen im Netz. Die Modelle treffen Aussagen

- über die mittlere Empfangsleistung, als auch
- über das zeitvariante und frequenzselektive Verhalten des Funkkanals,

von denen jedoch nur die Empfangsleistung für die hier vorliegende Aufgabenstellung interessiert. Aus der Empfangsleistung kann unter der Kenntnis der Empfangsantenne auf die Leistungsdichte zurückgeschlossen werden. Die Umgebung, in der die Ausbreitungsmodelle eingesetzt werden sollen, variiert sehr stark. Da die relevanten Einflussfaktoren in ausgedehnten ländlichen Gebieten, in urbanen (städtischen) Bereichen und bei der Ausbreitung innerhalb von Gebäuden (Inhaus, Indoor) erheblich differieren, ist es bislang noch nicht gelungen, ein allumfassendes Modell zu entwickeln. Abhängig vom Frequenzbereich, der Ausbreitungsumgebung (Land, Stadt, Inhaus) und dem Verwendungszweck (Rundfunk, Mobilfunk, Richtfunk etc.) existiert daher eine Vielzahl verschiedener Modelle. Im Mobilfunk wird die Umgebung dabei vielfach durch die Begriffe Makro-, Mikro- und Piko-Zelle unterschieden (siehe Tab. 2.1). Aufgrund der Aktualität wurden die meisten Modelle für den Einsatz in Mobilfunkkommunikationsnetzen optimiert. Deshalb werden Größen, die sich auf den Sender beziehen, häufig mit BS (Basisstation) indiziert und die für den Empfänger mit MS (Mobilstation). Eine Verwendung der Ausbreitungsmodelle zur Berechnung der elektromagnetischen Immissionslage wurde bisher noch nicht durchgeführt. Ob dies praktikabel ist, soll diese Studie zeigen.

Typ der Funkzelle	typischer Zellradius	Erläuterungen (Umgebung, Antennen etc.)
Makro-Zelle	500m bis 30 km	außerhalb von Gebäuden (ländlich oder städtisch), BS-Antenne oberhalb aller Hindernisse
Mikro-Zelle	250m bis 2 km	außerhalb von Gebäuden (städtisch), BS-Antenne unterhalb des mittleren Gebäudeniveaus
Piko-Zelle	Bis zu ca. 500 m	innerhalb von Gebäuden

Tabelle 2.1 Begriffsbestimmung zu Makro-, Mikro- und Piko-Zelle im Mobilfunk

Für eine rechtechnische Erfassung der Immissionslage wäre es optimal, wenn es gelingen würde, die das Problem beschreibenden Maxwell'schen 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 immensen 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 aufwendig, weshalb trotz der immensen Steigerung der verfügbaren Rechenleistung auch heute noch sog. empirische und semi-empirische Verfahren überwiegen. Rein empirische Verfahren basieren auf der statistischen Auswertung vieler Messungen und der Wahl geeigneter Näherungsfunktionen, um die Messwerte möglichst gut zu approximieren. Die Physik spielt bei diesen Verfahren keine bzw. wenn überhaupt eine untergeordnete Rolle. Semi-empirische Verfahren verwenden einfache theoretische Ansätze, wie z.B. die Abschätzung der Beugungsdämpfung durch Multiple-knife-edge-Modelle oder die Zweistrahlltheorie 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.

2.3.1 Empirische und semi-empirische Modelle

2.3.1.1 Empirische Ausbreitungsmodelle

Die Prognose von Empfangsleistung und Funkfelddämpfung wird bei nur unzureichender Information bezüglich der Umgebung vielfach mit Hilfe empirischer Modelle durchgeführt. Mit einer Ausnahme sind diese Verfahren allerdings nicht in der Lage, die Beugungsdämpfung bei der Ausbreitung über Hindernisse hinweg abzuschätzen. Daher sind sie nur für eine mehr oder weniger flache Umgebung zu gebrauchen. Zur Einbeziehung der Beugung lassen sich diese empirischen Modelle z.B. mit den Multiple-knife-edge-Modellen von Epstein u. Peterson [EPS 53], Deygout [DEY 66, DEY 91] oder Giovaneli [GIO 84] koppeln. Durch die Verschmelzung von deterministischen Ansätzen, durch welche die Gelände- oder Gebäudehöhen in die Berechnung einbezogen werden, und empirischer Methoden, die anhand umfangreicher Messungen gewonnen wurden, ergeben sich semi-empirische Verfahren.

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 sowohl mit dem Abstand, als auch mit der Frequenz quadratisch ab. Da eine reine Freiraumausbreitung in der Realität nicht auftritt, wurde ein sehr einfaches Ausbreitungsmodell, die sog. Zweistrahtheorie, entwickelt. Für Sende- und Empfangsantenne über einer ideal ebenen Grenzfläche überlagern sich die Anteile einer direkten und einer bodenreflektierten Teilwelle.

Die Einhüllende der Funkfelddämpfung zeigt hier für genügend kleine Abstände eine quadratische Entfernungsabhängigkeit und ebenso eine quadratische Frequenzabhängigkeit. Für sehr große Entfernungen nimmt die Funkfelddämpfung hingegen proportional zur vierten Potenz zu, ist aber unabhängig von der Frequenz. Der Breakpunkt ist die Entfernung, bei der das Interferenzmuster, welches sich im Nahbereich bei der Zweistrahtheorie ausbildet, endet.

2.3.1.1.1 ITU-R-Modell

Das Basismodell eines von der ITU-R (International Telecommunications Union – Radio Communications Sector) für die Prognose der Wellenausbreitung in Rundfunknetzen vorgeschlagenen Berechnungsverfahrens für den Frequenzbereich zwischen 30 MHz und 1 GHz berücksichtigt die Topographie durch statistische Parameter.

Für verschiedene Frequenzbänder (VHF: 30-250 MHz, UHF: 450-1000 MHz), unterschiedliche Ausbreitungsbedingungen (Ausbreitung über Land, warmen oder kalten Wasserflächen) und verschiedene Zeitwahrscheinlichkeiten werden in [ITU 370] Kurvenscharen für den Empfangsfeldstärkepegel angegeben. Diese wurden durch statistische Auswertung einer großen Zahl von Messungen ermittelt und sind für Entfernungen zwischen 10 km und 1000 km gültig. Die Unterscheidung verschiedener Zeit- und auch Ortswahrscheinlichkeiten berücksichtigt, dass der Pegel sowohl zeitlich, als auch örtlich schwankt. Unter gewissen Voraussetzungen lassen sich hieraus Pegelwerte für die Empfangsleistung oder die Funkfelddämpfung berechnen.

Dem ITU-R Basismodell liegen empirisch ermittelten Ausbreitungskurven zugrunde. Es überrascht daher nicht, dass dieses Modell eine nur ungenügende Berücksichtigung der realen Umgebung zulässt.

Vorteil ist die einfache Handhabung und der geringe Rechenzeitbedarf, da keine direkte Ausbreitungsberechnung durchgeführt wird, sondern im wesentlichen Tabellenwerte ausgelesen werden. Im Widerspruch zu einer detaillierten Feldstärkevorhersage steht die grobe Berücksichtigung der Topographie. Außerdem sind Aussagen für den Nahbereich um den Sender (< 10 km) nicht möglich.

2.3.1.1.2 *Log-distance Path-loss Modell*

Auch für den städtischen Bereich gibt es rein empirische Modelle, bei denen außer einer groben Charakterisierung (z.B. Vorstadt, Stadtzentrum) keinerlei Informationen zur Bebauung verarbeitet werden können. Sie nehmen lediglich eine gewisse Entfernungs- und Frequenzabhängigkeit an und verarbeiten die Antennenhöhen bestenfalls durch empirische Korrekturen.

Für eine vorgegebene Trägerfrequenz und feste Antennenhöhen wird vielfach von einer exponentiellen Entfernungsabhängigkeit ausgegangen, wobei der Exponent in Abhängigkeit von der Grobcharakterisierung des Geländes gewählt wird. Für den Exponenten gilt bei idealer Freiraumausbreitung 2 und für die Zweistrahtheorie jenseits des Breakpunkts 4. Durch Auswertung statistischer Ergebnisse resultieren für die urbane Ausbreitung Exponenten zwischen 2,7 und 3,5, falls eine Sichtverbindung besteht, und 3-5 sofern keine Sichtverbindung besteht [RAP 96]. Der wirkliche Nutzen dieser Modelle ist jedoch gering. Sie sollten bestenfalls für erste überschlägige Betrachtungen verwendet werden. Das hier für die urbane Ausbreitungsmodellierung vorgestellte Konzept ist vielfach auch bei der Modellierung der Wellenausbreitung in Gebäuden zu finden.

Vereinfachte Modelle dieser Klasse werden zur Zeit bereits im Bereich der Immissionsberechnung eingesetzt, z. B. das Verfahren der deutschen RegTP zur Standortbescheinigung sowie die Schweizer Berechnungsmethode [BUWAL 02a]. Die Berechnung der Feldstärken erfolgt unter Annahme von Fernfeldbedingungen und Freiraumausbreitung und ggf. einer Gebäudedämpfung.

Ein kommerzielles Produkt in diesem Bereich ist das Programm "WinField", entwickelt von der Firma FGEU in Berlin.

2.3.1.1.3 *Okumura-Hata-Modell*

Das Okumura-Hata-Modell ist ebenfalls ein Berechnungsverfahren, das auf der Auswertung umfangreicher Messungen, hier für die Frequenzen zwischen 200 MHz und 2 GHz, basiert [OKU 68]. Für diese Messwerte wurden von Hata [HAT 80] für den Teilfrequenzbereich bis 1500 MHz Näherungsgleichungen zur Berechnung der isotropen Funkfelddämpfung angegeben, allerdings wie auch die Messungen von Okumura nur für vertikale Polarisation. Die Näherungsgleichungen benötigen lediglich folgende vier Parameter: die Frequenz, die Entfernung und die Antennenhöhen. Das Okumura-Hata-Modell darf dabei allerdings nur innerhalb der folgenden Grenzen angewendet werden:

Frequenz	150 .. 1500 MHz
Entfernung	1 .. 20 km
Höhe der Basisstationsantenne	30 .. 200 m
Höhe der Mobilstationsantenne	1 ..10 m

Tabelle 2.2 Gültigkeitsbereich des Okumura-Hata-Modells

Ausgegangen wird beim Okumura-Hata-Modell von einer Basisdämpfung für urbanes Gebiet über quasi-ebenem Gelände. Zur Berücksichtigung der Antennenhöhe der MS wird ein Korrekturterm abhängig von der Art der Umgebung (Kleinstadt oder Großstadt) gewählt. Zusätzlich zur Geländeklasse urban kennt das Okumura-Hata-Modell die Klassen suburban (z.B. Dorf) und ländlich offen (z.B. Wiese oder Acker). Für diese Klassen ergibt sich die isotrope Funkfelddämpfung aus der Basisdämpfung durch Hinzufügen von konstanten und frequenzabhängigen Korrekturen.

Die gegenüber der Freiraumausbreitung und Zweistahltheorie im Mittel erhöhten Dämpfungswerte resultieren daraus, dass stets Hindernisse die Ausbreitung behindern, was zusätzliche Verluste hervorruft. Da diese Effekte nur pauschal berücksichtigt werden, ergeben sich in den zahlreichen Fällen, in denen das Gelände vom angenommenen Normgelände abweicht, große Fehler. Die mit wachsender Entfernung monoton steigende Funkfelddämpfung vernachlässigt alle lokalen Effekte, wie z.B. Abschattung oder Reflexion. Eine derartige monoton steigende Funkfelddämpfung entspricht in aller Regel nicht der Realität. Das empirische Okumura-Hata-Modell liefert bestenfalls einen ersten Anhaltspunkt.

2.3.1.1.4 *COST-Hata-Modell [COS 99]*

Das Okumura-Hata-Modell ist beschränkt auf Frequenzen zwischen 150 MHz und 1500 MHz. Daher ist 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

Tabelle 2.3 Gültigkeitsbereich des COST-Hata-Modells

Ebenso wie beim 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 Basis-

dämpfung 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. Für die Grenzen des Modells, wie z.B. die Nichtberücksichtigung aller lokalen Effekte, gelten die Aussagen des vorhergehenden Kapitels sinngemäß.

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 Okumura-Hata- oder des COST-Hata-Modells nicht 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 Okumura-Hata- bzw. des COST-Hata-Modells im Prinzip zulässt, häufig sinnvoller, Verfahren zu verwenden, welche den Ausbreitungseffekten innerhalb von bebauten Gebieten besser Rechnung tragen.

2.3.1.2 Einfache Beugungsmodelle

Da die Beugung elektromagnetischer Wellen an Hindernissen (Topographie, Bebauung) ein wichtiger Ausbreitungsmechanismus ist, wurden in der Vergangenheit eine Vielzahl einfacher Verfahren zur Berechnung der Beugungsdämpfung entwickelt. Nahezu alle basieren auf der Knife-edge-Beugung. Bei diesen einfachen Verfahren zur Berechnung der Beugungsdämpfung wird das Pfadprofil, d.h. der Verlauf der Gebäudehöhen zwischen Sender und Empfänger, durch eine endliche Zahl von Ersatzhindernissen ersetzt (siehe Bild 2.1), und danach für diese Anordnung der Ersatzhindernisse die Beugungsdämpfung ermittelt.

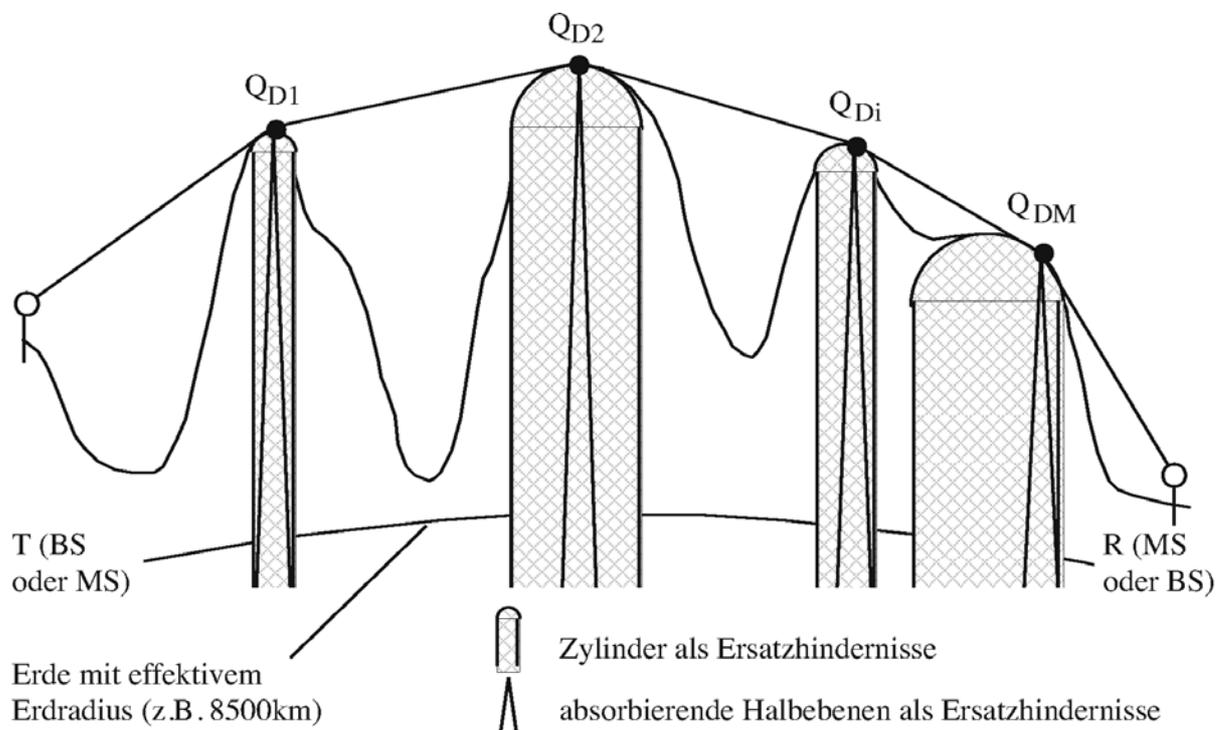


Bild 2.1 Geländeprofil zwischen Sender und Empfänger und Ersatzhindernisse (Halbebenen für Multiple-knife-edge-Modelle, Zylinder für Cascaded-cylinder-Modelle)

Nachfolgend wird das prinzipielle Vorgehen für die vielfach verwendeten Knife-edge-Modelle nach Epstein u. Peterson [EPS 53], Deygout [DEY 66], [DEY 91] und Giovanelli [GIO 84] erläutert. Die für diese Modelle benötigten Geometrieparameter sind in Bild 2.2 für die Beugung an zwei Halbebenen skizziert.

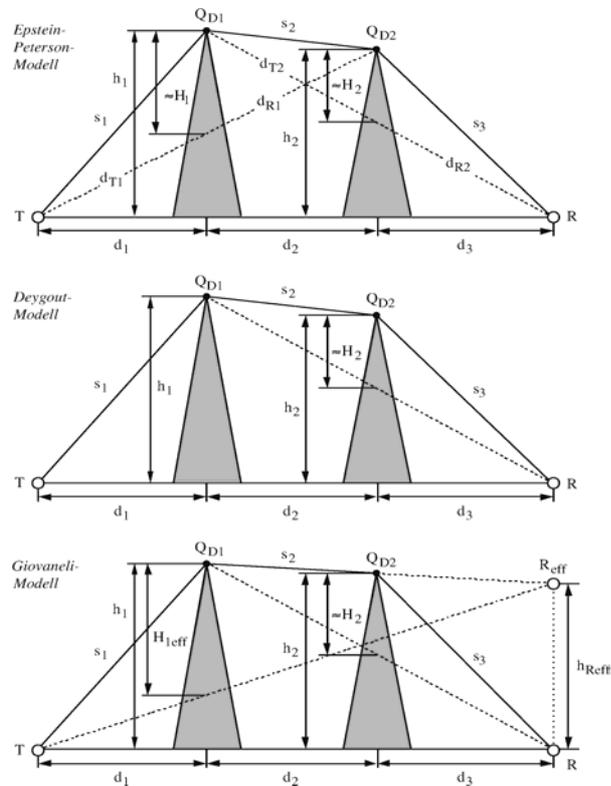


Bild 2.2 Geometrie für die Multiple-knife-edge-Modelle nach Epstein u. Peterson [EPS 53], Deygout [DEY 66], [DEY 91] und Giovanelli [GIO 84] am Beispiel der Beugung an zwei absorbierenden Halbebenen

2.3.1.2.1 Epstein-Peterson-Modell

Das Modell nach Epstein u. Peterson [EPS 53] ersetzt den gesamten Ausbreitungspfad nach Bild 2.2 durch eine Sequenz von Teilpfaden, welche jeweils eine einzelne Halbebene enthalten. Der Gesamtübertragungsfaktor ergibt sich für dieses Modell einfach aus dem Produkt der einzelnen Übertragungsfaktoren. Das Epstein-Peterson-Modell verwendet keinerlei Korrektur zur Reduzierung der vielfach sehr großen Fehler. Zur Darstellung wird meist die Beugungsdämpfung D_B , d.h. das Betragsverhältnis der Feldstärke ohne und mit Hindernissen, verwendet. Bei der Berechnung wird davon ausgegangen, dass die horizontalen Entfernungen sehr viel größer sind als die Höhen der Halbebenen. Nebenhindernisse zwischen den Haupthindernissen, d.h. Hindernisse unterhalb der jeweiligen Verbindungslinie zwischen den Haupthindernissen, dem Sender und dem Empfänger, werden im Originalmodell von Epstein u. Peterson nicht explizit berücksichtigt.

2.3.1.2.2 Deygout-Modell

Das Modell nach Deygout [DEY 66], [DEY 91] ist rekursiv. Zunächst wird das Haupthindernis und die zugehörige Beugungsdämpfung ermittelt. Das Haupthindernis ist dabei jenes, für das bei Berücksichtigung nur einer einzigen Halbebene zwischen Sender und Empfänger die größte Beugungsdämpfung resultieren würde. Zur Beugungsdämpfung für das Haupthindernis wird die Beugungsdämpfung für die weiteren Teilstrecken hinzuaddiert. Dieses Vorgehen würde die Beugungsdämpfung erheblich überschätzen, weshalb Korrekturterme für Hindernisse auf sekundären Teilstrecken wieder abgezogen werden. Das Modell von Deygout lässt sich schrittweise in mehreren Ebenen anwenden, wobei in der Regel vier Ebenen völlig ausreichen.

2.3.1.2.3 Giovaneli-Modell

Das Modell nach Giovaneli [GIO 84] ist wie das Deygout-Modell rekursiv, verwendet jedoch eine davon abweichende Methode, um das Überschätzen der Beugungsdämpfung zu korrigieren. Für eine Strecke mit zwei Halbebenen nach Bild 2.2 wird zunächst wiederum die Auswirkung des Haupthindernisses ermittelt. Allerdings wird nicht der wirkliche Ort des Empfängers, sondern ein davon abweichender Ort verwendet. Zur Ermittlung der Beugungsdämpfung wird daher auch die effektive Höhe des Haupthindernisses eingesetzt, die aus der zweifachen Anwendung des Strahlensatzes folgt. Die gesamte Beugungsdämpfung ergibt sich wiederum aus der Addition der Teilstrecken.

Die empirische Korrektur ist nicht wie beim Deygout-Modell in einem additiven Dämpfungsterm, sondern in der veränderten effektiven Höhe enthalten. Für die Beugung an zwei Halbebenen liegt die mit dem Giovaneli-Modell prognostizierte Dämpfung in der Regel zwischen den Werten des Epstein-Peterson-Modells und des Deygout-Modells ohne Berücksichtigung des Korrekturterms.

2.3.1.3 Semi-empirische Ausbreitungsmodelle

Semi-empirische Modelle resultieren z.B. aus einer Verknüpfung der zuvor vorgestellten Knife-edge- oder Cascaded-cylinder-Modelle, die ein Teilproblem der Ausbreitungsmodellierung deterministisch anhand von Höhendaten lösen, mit ansonsten rein empirischen Modellen bzw. Korrekturen, welche aus der statistischen Auswertung vieler Messergebnisse gewonnen wurden. Nahezu jeder Nutzer derartiger semi-empirischer Ausbreitungsmodelle kalibriert ein eigenes oder erworbenes Modell anhand eigener Messungen innerhalb eines repräsentativen Gebiets. Da ebenso viele semi-empirische Modelle existieren, wie es Anwender (z.B. Mobilfunk-Netzbetreiber) gibt, ist eine Auflistung an dieser Stelle weder möglich noch sinnvoll.

So werden z.B. die weiter oben beschriebenen Okumura-Hata- oder COST-Hata-Modelle, welche nur für quasi-ebenes Gelände definiert sind, durch Kombination mit einem der Verfahren zur Beugungsberechnung auch auf hügeliges oder städtisches Gelände erweitert. Zur Verbesserung der Vorhersage 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 Modelle sind auch semi-empirische Modelle nur bedingt dazu in der Lage, Bebauungsdaten detailliert in eine Analyse einzubeziehen. Dennoch werden zur Zeit für die Planung von Funksystemen und insbesondere auch von Mobilfunksystemen primär Modelle eben dieser Klasse eingesetzt. Dies ist vor allem in der Einfachheit semi-empirischer Verfahren und dem geringen Aufwand bezüglich Rechenzeit und Speicherplatz begründet.

Aufgrund ihrer abstrakten Modellierung der Geländestruktur bzw. durch die Einführung von empirischen Korrekturfaktoren besitzen diese Modelle nur eine eingeschränkte Gültigkeit bezüglich Frequenz, Topographie und Morphographie.

2.3.1.3.1 *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 Okumura-Hata- und 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 der zahlreichen Erweiterungen vorgestellt werden.

Bild 2.3 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

Tabelle 2.4 Gültigkeitsbereich des COST-Walfisch-Ikegami-Modells

Auch das COST-Walfisch-Ikegami-Modell, nachfolgend kurz COST-WI-Modell, ist somit 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.

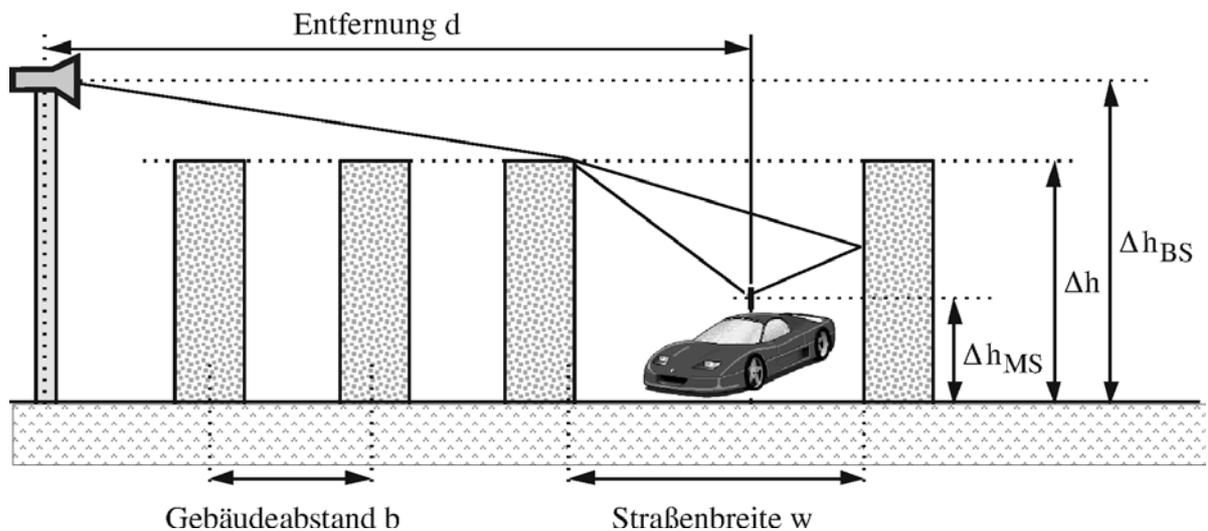


Bild 2.3 Definition der statistischen Beschreibungsgrößen beim COST-Walfisch-Ikegami-Modell

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.

2.3.2 Analytische Modelle

Die Ergebnisse empirischer oder semi-empirischer Modelle können natürlich nicht mit der physikalischen Realität übereinstimmen, da sie die wirkliche Lage, Orientierung, Form und Größe der Gebäude ebenso wenig berücksichtigen wie die Materialeigenschaften der Wände. Zahlreiche Arbeiten der letzten Jahre [CIC 93, CIC 94, LEV 92, MAT 95, RIZ 97, RUS 93, VAN 93, VAN 93a, VAN 93b, VAN 94] hatten daher das Ziel, Modelle zu entwickeln, die Ausbreitungsmechanismen mittels mathematischer Methoden beschreiben, 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.

2.3.2.1 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 [DOT 00].

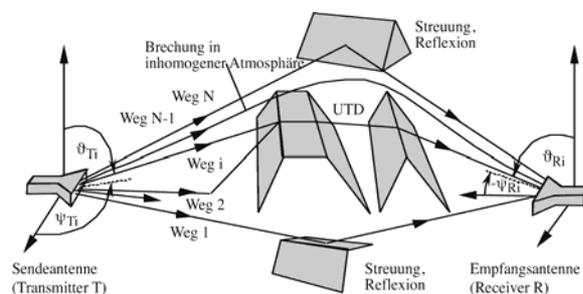


Bild 2.4 Mehrwegeausbreitung und Deutung einzelner Übertragungswege als Strahlenbahnen

In Bild 2.4 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 sehr gut zu einer konsistenten Beschreibung der Mehrwegeausbreitung zwischen Sende- und Empfangsantenne verbinden, 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 Polarisierung der Welle verändert. Eventuell muss der einzelne Strahl auch in mehrere aufgespalten werden. Dies ist für die Reflexion/Transmission unmittelbar ersichtlich. Bei der Beugung muss ein eintreffender Strahl im Prinzip sogar in unendlich viele Strahlen aufgespalten 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 Feldern. 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.

Am Beobachtungspunkt ergibt sich die Feldstärke durch die kohärente Summation aller durch diejenigen Strahlen repräsentierter Felder, welche den Beobachtungspunkt 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 insbesondere der 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. Vernachlässigt man die variierenden Phasen und addiert lediglich die Leistungen der einzelnen Mehrwegesignale (inkohärente Überlagerung), welche näherungsweise als konstant angesehen werden können, ergibt sich als Ergebnis eines strahlenoptischen Ausbreitungsmodells sinnvollerweise eine Prognose für die über eine gewisse Zeit und/oder einen gewissen Raumbereich gemittelte Feldstärke. Lokal, sowohl zeitlich als auch räumlich, kann die Feldstärke größer oder auch kleiner als dieser Mittelwert sein. Die erzielten Ergebnisse sind jedoch für die meisten praktischen Anwendungen in der Funknetzplanung ausreichend.

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.

Ein kommerzielles Produkt aus diesem Bereich und speziell zur Immissionsberechnung entwickelt ist das Programm "EMF Visual" von France Telecom und der Firma Antennessa.

2.3.2.2 Feldtheoretische Modellierung

Die vom Berechnungsverfahren her genauesten Ergebnisse ließen sich erzielen, wenn die empirischen, semi-empirischen oder strahlenoptischen Modelle durch feldtheoretische ersetzt würden.

Die direkte numerische Lösung der Maxwell'schen Gleichungen mit Hilfe von Integral- oder Differentialgleichungssystemen wird bei Strukturen mit Abmessungen von wenigen Wellenlängen erfolgreich eingesetzt (elektronische Bauteile, Antennen). 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. Die wichtigsten Varianten werden im folgenden kurz beleuchtet:

2.3.2.2.1 Finite Elemente Methode (FEM)

Die Methode der finiten Elemente basiert auf der Lösung der Maxwell'schen Gleichungen in ihrer Differentialform. Die exakte Lösung wird durch die Überlagerung einfacherer analytischer Ausdrücke angenähert. Um diesen Ansatz verwenden zu können, muss das Berechnungsgebiet in ein dreidimensionales Gitter unterteilt werden. Die Berechnung der oben erwähnten einfachen Ausdrücke erfolgt dann für alle Gitterpunkte. Durch die beliebige Diskretisierung eignet sich die FEM besonders zur Berechnung komplizierter Geometrien.

2.3.2.2.2 Finite Differenzen Methode (FDM)

Die Finite Differenzen Methode basiert ebenfalls auf der Lösung der Maxwell'schen Gleichungen in ihrer Differentialform. Jedoch startet der Ansatz mit der Näherung der räumlichen Ableitungen durch endliche Differenzen. Dies führt zu einem Gleichungssystem, in dem die Unbekannten die elektromagnetischen Größen an den Punkten eines Gitters darstellen. Die FDM erfordert die Diskretisierung des Berechnungsgebietes in ein regelmäßiges Gitter, was einige Einschränkungen hinsichtlich der modellierbaren Geometrien mit sich bringt. Die Struktur des entstehenden Gleichungssystems erlaubt die Anwendung optimierter Algorithmen zur Lösung und Speicherung.

2.3.2.2.3 Finite Differenzen im Zeitbereich (Finite Difference Time Domain, FDTD)

Die Anwendung der Methode der finiten Differenzen im Zeitbereich ist weit verbreitet. Die Maxwell'schen Gleichungen werden hier direkt in Raum und Zeit diskretisiert. Jedem Volumenelement werden elektrische Materialparameter zugeordnet. Durch Lösen der Differentialgleichungen im Zeitbereich werden die elektrischen und magnetischen Feldstärken in jedem Volumenelement zu jedem betrachteten Zeitpunkt mit hoher Genauigkeit bestimmt. Da auch bei FDTD das gesamte Berechnungsgebiet in den drei Raumrichtungen diskretisiert werden muss, wobei die Schrittweite höchstens ein Zehntel der untersuchten Wellenlänge betragen darf, ergibt sich eine sehr große Anzahl von zu berechnenden Unbekannten. Allerdings steigt der Berechnungsaufwand lediglich linear mit der Anzahl der Gitterzellen. Zur Vereinfachung kann die Feldstärkeberechnung nur zweidimensional, also nur auf dem Gebäudegrundriss,

durchgeführt werden. Dabei bleiben Inhomogenitäten senkrecht zum Grundriss (z.B. Inneneinrichtung) unberücksichtigt [LAU 94, LAU 95].

2.3.2.2.4 Integralgleichungsmethode (*Integral Equations, IE*)

Diese Methode beginnt mit der Ableitung von Integralausdrücken für das elektrische und das magnetische Feld aus den Maxwell'schen Gleichungen unter Zuhilfenahme von Greenschen Funktionen.

Es gibt eine Reihe von direkten und iterativen Algorithmen zur Lösung des entstehenden Integralgleichungssystems. Am bekanntesten sind dabei die Momentenmethode (Method of Moments, MoM), Galerkin Methode, Point Matching Methode und Boundary Element Methode (BEM).

IE Methoden werden vorzugsweise für offene Probleme eingesetzt, d.h. wenn die Abstrahlung in den Raum berücksichtigt werden soll.

2.3.2.3 Hybridmethoden

Bei solchen Modellen wird versucht zwei oder mehr Methoden zu kombinieren, um die Nachteile der einen Methode durch die Vorteile einer anderen auszugleichen. So lässt sich beispielsweise zuerst FDTD im Nahbereich (wenige Wellenlängen) um die Antenne einsetzen, um ein effektives Strahlungsdiagramm unter Berücksichtigung der Montageumgebung zu berechnen [KOI 97], und anschließend ein strahlenoptisches Modell anwenden, um die "großen" Strecken bis zum Beobachtungsgebiet zu überbrücken, um schließlich wieder mittels FDTD die kleinräumige Struktur im Beobachtungsgebiet (wenige Wellenlängen) zu berechnen [BCP 00]. Die entstehenden Gleichungssysteme werden mittels geeigneter Kontinuitätsbedingungen an den gemeinsamen Bereichsgrenzen verbunden.

In [BAS 02, AHS 01] werden 3 Methoden, FEM/BEM/UTD, kombiniert, um beliebig geformte, inhomogene und elektrisch große Szenarien zu berechnen. Diese Methode wurde vorgeschlagen, um die Feldstärken in der Nähe von Basisstationsantennen (bis zu etwa 10 m) unter Berücksichtigung der tatsächlichen Installationsumgebung zu bestimmen.

Diese Verfahren sind zur Zeit noch nicht sehr fortgeschritten und es liegen keine Angaben zum benötigten Rechenaufwand vor. Darüber hinaus gilt wie für jedes analytische Modell auch hier, dass die Qualität des Berechnungsergebnisses stark von der Verfügbarkeit und Qualität der benötigten detaillierten Umgebungsdaten abhängt.

2.3.3 Out-to-indoor Modelle

In der Nähe von Basisstationen sind vielfach auch die innerhalb von Gebäuden auftretenden Feldstärken von Interesse. Sofern exakte Daten zur Innenraumarchitektur der Gebäude sowie zu den Materialparametern von Wänden und Decken verfügbar sind, lassen sich hierfür im Prinzip ebenfalls strahlenoptische Verfahren verwenden [ALE 82, AMC 89, CMN 85, LLL 94, SEI 91, YEK 91]. Aufgrund der Notwendigkeit, auch transmittierte Strahlen zu berück-

sichtigen, wird die Suche der Ausbreitungswege aber sehr komplex (in [SOB 97] finden sich Simulationsdauern von 6 h pro Etage). Es scheint außerdem fraglich, ob ein solch detailliertes und deshalb äußerst aufwändiges Vorgehen überhaupt Sinn macht, da z.B. die veränderliche Inneneinrichtung der Räume deutlichen Einfluss auf die Feldstärkeverteilung hat [DCF 97], aber kaum in eine Simulation einbezogen werden kann. Meist werden daher einfach die über Transmission durch Wände oder durch Kantenbeugung in das Gebäude eintretenden Strahlen mit empirisch ermittelten Eindringverlusten (Penetration loss) für Außen- und Innenwände reduziert und so der Empfangspegel im Gebäudeinneren abgeschätzt [SPE 95, DEJ 01]. Die Eindringverluste liegen abhängig von der Frequenz, den Wandparametern und dem Einfallswinkel der Teilwelle zwischen ca. 5 dB und 30 dB [COS 99].

In einem anderen Ansatz wird das Innere des Gebäudes als homogenes Medium mit einer bestimmten längenabhängigen Dämpfung, welche an das jeweilige Gebäude durch Messungen angepasst werden muss [LAF 90, KEN 90], betrachtet.

In der Regel wird also nur der direkte Ausbreitungsweg durch das Gebäude untersucht. Auswirkungen der Bauweise, der Anordnung der Räume und die Beschaffenheit der Wände fließen nicht in die Modelle ein, so dass nur anhand eines einzigen Pfades Aussagen über die Mehrwegeausbreitung getroffen werden. Die empirischen Modelle brauchen allerdings aufgrund der starken Vereinfachungen wenig Rechenzeit und Speicherplatz.

2.4 Beurteilung der Eignung der verschiedenen Verfahren

2.4.1 Zu erwartende Genauigkeiten

Für alle Modelle, die zum Zwecke der Funknetzplanung entwickelt wurden, gilt gemeinhin eine Vorhersagegenauigkeit von 6 dB als ausreichend [COS 99]. Darüber hinaus liefern diese Modelle in der Regel Vorhersagen über Mittelwerte innerhalb eines bestimmten Gebietes, da die feinräumige 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.

In der Literatur finden sich zahlreiche Vergleiche zwischen gemessenen und mit verschiedenen Modellen vorhergesagten Feldstärken.

	Mittlerer Fehler [dB]	Standardabweichung [dB]
Strahlenoptisch [KÜR 93]	5	9
Epstein-Peterson [KÜR 93]	11	9
Okumura-Hata [KÜR 93]	5	9
Integralgleichung [KÜR 93]	8	7

Tabelle 2.5 Vergleich Messung-Modell für ländlichen Bereich

	Mittlerer Fehler [dB]	Standardabweichung [dB]
Strahlenoptisch [KÜR 93]	2	4
Strahlenoptisch [WLL 97]	4	6
Allsebrook-Parsons [KÜR 93]	7	6
Okumura-Hata [KÜR 93]	19	4
COST-WI [ARC 98]	11	8

Tabelle 2.6 Vergleich Messung-Modell für städtischen Bereich

	Mittlerer Fehler [dB]	Standardabweichung [dB]
Strahlenoptisch [KÜR 93]	2	6
Allsebrook-Parsons [KÜR 93]	7	6
Okumura-Hata [KÜR 93]	17	4

Tabelle 2.7 Vergleich Messung-Modell für vorstädtischen Bereich

Bei der Feldstärkeberechnung in Gebäuden muss berücksichtigt werden, dass eine Vernachlässigung der Inneneinrichtung zu einer weiteren Verschlechterung von 3 dB führt [DCF 97].

Aus Tab. 2.5 bis 2.7 ist ersichtlich, dass die Genauigkeit von empirischen und semiempirischen Verfahren sehr begrenzt ist. Eine Erhöhung der Genauigkeit ist lediglich bedingt möglich. So können die Parameter der Modelle nur durch umfangreiche Messkampagnen angepasst werden. Aufgrund der ungenügenden Genauigkeit in Zusammenhang mit der Nichteignung bezüglich der Grenzwertüberprüfung (Mittelwerte über größere Raumbereiche statt detaillierter Ortsauflösung) sowie der eingeschränkten Vorhersagemöglichkeit im Nahbereich des Senders werden die empirischen und semiempirischen Modelle für vorliegende Aufgabenstellung als wenig tauglich eingeschätzt.

Dem gegenüber ist die Vorhersagegenauigkeit der analytischen Verfahren 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 Rechenzeiten nach sich. Die Voraussetzungen und Grenzen der analytischen Modelle sollen in den beiden nachfolgenden Kapiteln näher untersucht werden.

2.4.2 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 Beobachtungspunkte und damit den Rechenaufwand zu begrenzen, aber dabei fein genug bleiben, um eine genaue Modellierung sicherzustellen.

2.4.3 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 Mobilfunkbetreiber optimieren ihre Netze periodisch. Alle technischen Angaben können folglich nur für die gewisse Zeit als konstant betrachtet werden.
- Meteorologische Verhältnisse: Schnee, Eis oder Regen werden nicht berücksichtigt.
- Räumliche Feinstruktur: Für die Grenzwertbetrachtung sind lokale Feldstärken wichtig; Modelle liefern *bei vertretbarem Rechenaufwand* nur Mittel- bzw. Erwartungswerte.

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].

Diese Einschränkungen müssen bei der Interpretation der Ergebnisse mit großer Sorgfalt berücksichtigt werden.

2.5 Fazit

In Tabelle 2.8 wird die Eignung der vorgestellten Berechnungsverfahren gegenüber den in Kapitel 2.2 definierten Anforderungen zusammengefasst.

Einfache empirische oder semi-empirische Rechenmodelle liefern lediglich sehr globale Aussagen hinsichtlich der zu erwartenden Feldstärken. Sie sind zur Beschreibung des Umfeldes des Senders und aufgrund der Mittelwertangabe für die Immission insbesondere auch zur Grenzwertüberprüfung nicht geeignet. Für höhere Genauigkeiten sind verfeinerte analytische Modelle mit entsprechend höherem Rechenaufwand unumgänglich. Solche Modelle beschreiben auch die komplexen Verhältnisse bei mehreren Basisstationen sowie die verschiedenen Aspekte der Wellenausbreitung, einschließlich der Verhältnisse innerhalb von Gebäuden.

Innerhalb der analytischen Verfahren haben die strahlenoptischen Verfahren vor allem bezüglich des anwendbaren Entfernungsbereiches, des Anwendungsbereiches, der Bedienungsfreundlichkeit, der Eingabedatendetailliertheit und des Rechenaufwandes Vorteile gegenüber den feldtheoretischen Verfahren. Die Vorteile der feldtheoretischen Verfahren gegenüber den strahlenoptischen liegen hingegen in den Bereichen Genauigkeit und Auflösung. Aus diesem Vergleich lassen sich global gesehen leichte Vorteile zugunsten der strahlenoptischen Verfahren ableiten, wobei zu überprüfen ist, inwieweit Hybridverfahren die Vorteile beider analytischen Hauptverfahren kombinieren können.

Die Eignung eines bestimmten der hier vorgestellten und grundsätzlich bewerteten Verfahren für die Aufgabenstellung der Berechnung der Immissionssituation im Umfeld von Mobilfunk Basisstationen wird sich letztlich aus dem praktischen Vergleich verschiedener Berechnungsprogramme innerhalb der folgenden Projektschritte ableiten.

Kriterium	Empirische und semiempirische Modelle	Analytische Modelle		
		strahlenoptisch	feldtheoretisch	hybrid
Grenzwertüberprüfung	nein	möglich	möglich	möglich
Frequenzbereich	ok	ok	ok	ok
Entfernungsbereich	Nahbereich um BS nicht erfasst	ok	wenige Meter	ok
Anwendungsbereich	alle	alle	in Gebäuden	städtisch
Systematische Fehler	hoch	gering	sehr gering	gering
Bedienungsfreundlichkeit	einfach	aufwändig	sehr aufwändig	sehr aufwändig
Erford. Eingabedaten	gering	hoch	sehr hoch	sehr hoch
Erforderliche Rechenleistung / Speicherbedarf	gering	hoch	sehr hoch	sehr hoch
Genauigkeit	gering	hoch	sehr hoch	sehr hoch
Auflösung	gering	hoch	sehr hoch	sehr hoch
Berücksichtigung der Montageumgebung	nein	möglich	möglich	möglich

Tabelle 2.8 Vergleich der unterschiedlichen Berechnungsverfahren

3 Messverfahren im Mobilfunkbereich

3.1 Einleitung

3.1.1 Grundsätzliche Einteilung von Messaufgabenstellungen

Messaufgabenstellungen zur Beurteilung der Exposition durch Mobilfunk Sendeanlagen lassen sich prinzipiell in verschiedene Klassen einteilen [COS 00]:

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 festgelegten 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 der Mobilfunkexposition 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".

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. Hierbei werden eher Durchschnittswerte bzw. repräsentative Szenarien anstelle von worst case Situationen gewählt. Es erfolgt nicht generell eine Bestimmung aller Quellen.

Überlappungen zwischen diesen einzelnen Szenarien sind selbstverständlich möglich. Vorliegende Aufgabenstellung stellt eine Kombination dieser vier Kategorien dar: Das zu entwickelnde Messverfahren soll zur Überprüfung der Grenzwerte geeignet sein (Kategorie 1). Es darf sich aber nicht nur auf den Bereich des Sicherheitsabstandes beschränken, da es nicht generelles Ziel ist, diesen festzulegen oder zu überprüfen. Vielmehr sind Messungen im

Umfeld der Anlage (Sicherheitsabstand bis etwa 200 m) an beliebigen Orten Gegenstand der Untersuchungen (Kategorie 2 und 3). Primär sind nur Immissionen durch Mobilfunkanlagen zu erfassen; andere Quellen sind von untergeordnetem Interesse. Eine Motivation für die Messungen stellt die Risikokommunikation und -bewertung dar (Kategorie 1 und 4).

3.1.2 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 Mobilfunk Basisstationen in Innenräumen und im Freien zu stellen sind. Diese Anforderungen werden im Kapitel 3.2 definiert.

Basis für die nachfolgende Übersicht über existierende Mobilfunk Messverfahren bilden Normen, Empfehlungen oder Entwürfe, die ansatzweise im nationalen und internationalen Rahmen existieren. Kapitel 3.3.2 widmet sich mit diesbezüglich vorhandenen Regularien in Deutschland. Da hier jedoch entsprechende Normen und Verfahren eher unspezifisch sind und speziell den Mobilfunkbereich nicht ausreichend berücksichtigen, werden in Kapitel 3.3.3 einige internationale Arbeiten vorgestellt, die einen repräsentativen Querschnitt über vorhandene Verfahren darstellen.

Da viele der recherchierten Messverfahren in wesentlichen Punkten sehr ähnlich sind, werden in Kapitel 3.3 nur die Kernaussagen der jeweiligen nationalen und internationalen Ansätze in Kurzform herausgearbeitet. Kapitel 3.4 enthält dann eine detaillierte Darstellung und Bewertung der einzelnen Teilaspekte der Messverfahren (Messtechnik, Messdurchführung, Auswertung usw.). In Abschnitt 3.5 erfolgt die Beurteilung der Eignung der vorhandenen Verfahren im Hinblick auf die in 3.2 definierten Anforderungen.

3.2 Anforderungen an Messverfahren

An ein Messverfahren zur korrekten Ermittlung der von Mobilfunk Basisstationen ausgehenden Immissionen sind folgende Anforderungen zu stellen. Manche Anforderungen sind eng miteinander verknüpft, d.h. sie können nicht unabhängig voneinander erfüllt werden; andere sind gegenläufig.

1. **Hohe Empfindlichkeit:** Das Verfahren muss prinzipiell über eine solche Empfindlichkeit verfügen, dass Immissionen der Größe, wie sie typischerweise im Umfeld von Mobilfunk Basisstationen vorliegen, noch darstellbar sind. Typische Immissionswerte bezüglich der elektrischen Feldstärke können in einigen 10 Metern Abstand von der Basisstation je nach Lage schon unter 100 mV/m liegen [BOR 02], was besondere Anforderungen an die eingesetzte Messtechnik stellt. Insbesondere die Verwendung von Personenschutzdosimetern bzw. in der EMV-Messtechnik verwendeten Feldsonden zur Störfestigkeitsmessung wird hier nicht mehr ausreichend sein.
2. **Frequenzselektivität:** Das Messverfahren muss die von Mobilfunk Anlagen ausgehenden Immissionen von anderen hoch- und niederfrequenten Immissionen (z.B. von Rundfunk- oder TV Sendern ausgehende Immissionen) *trennen* können, da hier nicht die kumulative

Immission, sondern separat die der Mobilfunk Basisstationen ermittelt und untersucht werden soll.

3. **Einbeziehung aller relevanten Mobilfunkanlagen:** Das Verfahren muss in der Lage sein, die Strahlungen *von allen Mobilfunk Sendeanlagen* zu ermitteln, die am Messpunkt einen relevanten Beitrag liefern. Relevante Beiträge liefert oftmals nicht nur die Sendeanlage vor Ort, sondern auch weiter entfernte Anlagen. Eine Unterscheidung der Beiträge unterschiedlicher Anlagen wird nur durch eine Frequenzselektivität der Messung gegeben sein.
4. **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.
5. **Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung:** Das Verfahren muss es ermöglichen, vom gemessenen Momentanwert der Immission auf denjenigen Wert bei *maximaler Anlagenauslastung* extrapolieren zu können. Laut relevanter deutscher Grenzwerte, die in der 26. BImSchV [26. BImSchV] niedergelegt sind, sind die Immissionen "bei höchster betrieblicher Anlagenauslastung" zu betrachten.
6. **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 zum überwiegenden Teil innerhalb von Wohnungen und nicht nur im Freien befinden. 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 der durchführenden Messinstitution ist ebenso Voraussetzung wie eine möglichst geringe zeitliche Störung der Anwohner am Messort.
7. **Maximalwertsuche:** Der Erfahrung nach schwankt die Immission vor allem in Innenräumen kleinstskalig von Messort zu Messort beträchtlich [BOR 02]. Das Verfahren muss in der Lage sein, mittels einer besonderen Methodik der Messdurchführung 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.
8. **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.
9. **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.
10. **Dokumentation:** Die Dokumentation der Ergebnisse hat so zu erfolgen, dass eine Nachvollziehbarkeit der Messungen gewährleistet ist.

11. **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 mit Einschränkungen zu rechnen.

3.3 Überblick über die Normungssituation

3.3.1 Einleitung

Dieses Kapitel enthält eine Aufstellung von Normen, Normentwürfen, Empfehlungen und anderen relevanten Arbeiten auf dem Gebiet der Messung elektromagnetischer Immissionen von Mobilfunk Sendeanlagen. Dabei wird zuerst die Situation in Deutschland betrachtet. Es schließt sich eine Übersicht über die internationalen Aktivitäten auf diesem Gebiet an. Hierbei erfolgt kein vollständiger internationaler Überblick, sondern es werden nur diejenigen Länder betrachtet, deren Einbeziehung für eine Erfassung der relevanten Arbeiten auf diesem Gebiet als notwendig und sinnvoll erachtet wird.

Die Überprüfung der einschlägigen Arbeiten wird nach folgenden Kriterien durchgeführt:

- Existiert eine Messvorschrift speziell für die Erfassung von Mobilfunk Immissionen?
- Falls nein, existiert eine Vorschrift für die Erfassung von hochfrequenten Immissionen im allgemeinen und lässt sich diese Vorschrift in Teilen auch für die Erfassung von Mobilfunk Immissionen 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 Mobilfunk 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?
- Erfolgt nach der Messung des Augenblickswertes eine Extrapolation auf den Zustand bei maximaler Anlagenauslastung und wie erfolgt dies?
- Gibt es Aussagen bezüglich der Messunsicherheit?

Es wird darauf hingewiesen, dass im Kapitel 3.3 vorerst nur die Kernaussagen der relevanten nationalen und internationalen Arbeiten in einem Kurzüberblick vorgestellt werden sollen. Die detaillierte Darstellung der einzelnen Aspekte der unterschiedlichen Messverfahren erfolgt ausführlich im Kapitel 3.4.

3.3.2 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]. Diese Verordnung ist auf Mobilfunk Basisstationen voll anwendbar. Vom Arbeitskreis "Elektromagnetische Strahlung" des Länderausschusses für Immissionsschutz wurden Hinweise zur Durchführung dieser Verordnung erarbeitet [LAI 00]. Beide Quellen definieren kein konkretes Messverfahren zur Erfassung der Immissionen. Trotzdem finden sich in [26. BImSchV] und [LAI 00] 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 in beiden Quellen auf die Norm DIN VDE 0848 Teil 1 (aktuelle Fassung August 2000 [0848-1]) verwiesen.

BEMFV

Auch in der "Verordnung über das Nachweisverfahren zur Begrenzung elektromagnetischer Felder (BEMFV)" [BEMFV], die das Nachweisverfahren zur Gewährleistung des Personenschutzes für ortsfeste Sendeanlagen regelt, wird bezüglich der Messverfahren auf die DIN VDE 0848 Teil 1 verwiesen. Es 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] 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 Anwendungsbereich entsprechend nicht mobilfunkspezifisch, sondern sehr allgemein gehalten und berücksichtigt höchstens ansatzweise die besonderen Gegebenheiten der Immissionen durch Mobilfunk Basisstationen, wie z.B. die Inhomogenität der Felder vor allem in Innenräumen (Erfordernis einer speziellen Methodik der Messdurchführung) oder der korrekten Einbeziehung der mobilfunktypischen Leistungsregelung (Erfordernis der Extrapolation der gemessenen Augenblickswerte auf den Zustand maximaler Anlagenauslastung). So wird z.B. bei inhomogenen Feldern die Messung in drei verschiedenen Höhen verlangt. 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.

RegTP / BAPT Messvorschriften

Aufgrund der Unspezifiziertheit der DIN VDE 0848 Teil 1 hat die Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post (RegTP) bzw. das frühere Bundesamt für Post und Telekommunikation (BAPT) für ihre bundesweiten EMVU Messaktionen 1992, 1996/97 und 1999/2000 eigene Messvorschriften entwickelt, die quasi die Vorgaben der DIN VDE 0848 Teil 1 in konkrete und anwendbare Handlungsanweisungen übersetzen. Die dafür entwickelten Messvorschriften BAPT 212 MV 20-22 [WEI 00] sind mittlerweile nicht mehr aktuell; gegenwärtig befindet sich eine neue Messvorschrift RegTP MA EMF 03 [EMF 03] in der Abstimmungsphase. Die zu untersuchenden Frequenzbereiche erstrecken sich von 9 kHz bis teilweise 26,5 GHz und umfassen somit neben Mobilfunk Sendeanlagen auch andere Hochfrequenzsender.

In der BAPT 212 MV 20 wird zur Messung ein Spektrumanalysator favorisiert, d.h. die Messung erfolgt frequenzselektiv. Lediglich bei sehr hohen Eingangspegeln wird aus Gründen der Übersteuerungsgefahr des Analysators eine Fortsetzung der Messung mit einer nicht frequenzselektiven Breitbandsonde verlangt. Die Messungen erfolgen im Freien (bevorzugt: öffentliche Straßen und Plätze) und werden mittels dipolartiger Antennen durchgeführt, die auf einem Stahlkurbelmast montiert sind, der während der Messung höhenverstellt wird. Es wird in horizontaler und vertikaler Polarisierung gemessen, wobei die Antennen in der horizontalen Ebene um 360° gedreht wird. Die Drehung bzw. Höhenverstellung der Antenne hat eine Maximalwertsuche der Immission zum Ziel. Allerdings bleibt der Mast an sich während der Messung an einem festen Ort.

Während es in der MV 20 darum geht, die örtliche Feldverteilung frequenzselektiv zu messen und den Abstand zu den Grenzwerten zu ermitteln, soll die Anwendung der MV 21 lediglich den Nachweis erbringen, ob der Grenzwert erreicht oder wesentlich unterschritten ist. Die Messung erfolgt hier nicht frequenzselektiv, sondern mit breitbandigen Sonden. Der Messort wird in Teilbereiche unterteilt, die von 1,2 m bis 1,8 m Höhe abgetastet werden (Ausnahme: andere typische Aufenthaltsbereiche von Personen). Es werden ebenso Probleme eines Mindestabstands des Messgerätes zu leitenden Teilen, als auch Feldverzerrungen durch den Messenden angesprochen.

Auch in der MV 22 geht es primär um eine Abschätzung, ob der Grenzwert wesentlich unterschritten oder erreicht wird. Die MV 22 bezieht sich aber speziell auf Messungen in Wohnungen und anderen Räumen. Die Vorgehensweise ist entsprechend der MV 21 mit der Ausnahme, dass die Messantennen mittels einer Antennenhalterung in der Hand gehalten werden dürfen.

Die RegTP MA EMF 03 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. Die

festgelegten Maximierungsmöglichkeiten (Höhenscan, 360° Drehung) sind in der Tat jedoch nur für Messungen im Freien tauglich und werden der Problematik der Maximalwertsuche in Innenräumen nicht gerecht.

Insgesamt kann eingeschätzt werden, dass die Messanweisungen der RegTP / BAPT wesentlich detailliertere Angaben als die Ausführungen der DIN VDE 0848 Teil 1 beinhalten. Trotzdem sind sie, da primär für eine Untersuchung des gesamten relevanten Hochfrequenzbereiches konzipiert, zur Erfassung der Mobilfunkimmissionen nur teilweise geeignet, da vor allem die Maximalwertsuche in Innenräumen und die Extrapolation auf maximale Anlagenlastung nicht spezifiziert sind.

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 den Mobilfunkfrequenzbereich sind keine speziellen Messangaben enthalten.

Messinstitutionen

In Deutschland existieren zahlreiche Messinstitutionen, die im Auftrag von besorgten Bürgern, Bürgerinitiativen, Umweltbehörden, Netzbetreibern und Gerichten Immissionsmessungen in der Nähe von Mobilfunk Basisstationen durchführen. Aufgrund des Fehlens einer einheitlichen, normativen Messvorschrift werden durch die Messinstitutionen eigens entwickelte Verfahren verwendet. Beispielhaft sollen hier einschlägige Arbeiten der Fachhochschule Deggendorf [WUSCH 02] und der IMST GmbH [BOR 02a] genannt werden. Beide Institutionen lehnen sich in vielen Punkten an die Messempfehlung für Mobilfunk Basisstationen (GSM) des Schweizer Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landwirtschaft BUWAL und des Bundesamtes für Metrologie und Akkreditierung METAS an [BUWAL 02].

3.3.3 Internationale Ansätze

Frankreich

In Frankreich gibt es ein System für regelmäßige Überprüfungen dergestalt, dass die elektromagnetischen Immissionen konform zu den gesetzlichen Anforderungen sind. Die Nationale Frequenzbehörde Frankreichs ANFR hat ein sog. Messprotokoll erarbeitet, das auf den Grenzwerten der Europäischen Ratsempfehlung aufsetzt [99/519/EG]. Dieses "Protocole de

Mesure in Situ" [ANFR/DR-15] hat sich als Referenzmethode für diesbezügliche Messungen in Frankreich etabliert.

Der Geltungsbereich des Messprotokolls erstreckt sich auf ortsfeste Sendeanlagen unter spezieller Berücksichtigung des Mobilfunks, Rundfunks und unabhängiger Netze. Ziel ist der Vergleich der Immissionen mit den Grenzwerten der Europäischen Ratsempfehlung. Ab dem reaktiven Nahfeld, d.h. ab Entfernungen von ca. einer Wellenlänge von der Sendeanlage, ist die Messung von E *oder* H hinreichend.

Mögliche Messungen werden je nach Entfernung zur Quelle in drei unterschiedliche Gruppen eingeteilt:

1. In unmittelbarer Nähe der Quelle (z.B. zur Verifikation des Sicherheitsabstandes) sollen die Messungen mit einem Breitbandmessgerät mit isotroper Sonde erfolgen; mit einem Spektrumanalysator ist lediglich nachzukontrollieren, dass der Hauptbeitrag der gemessenen Immission tatsächlich von der Anlage vor Ort stammt. Der Pegel muss aber mindestens 50 % über der Empfindlichkeitsschwelle der Sonde liegen. Schnelle Sondenbewegungen im Feld sind zu vermeiden.
2. Wird die Messung in einem weiter von der Anlage entfernten Bereich durchgeführt und kann die Immission bezüglich ihrer Größe noch von der Breitbandsonde aufgelöst werden, dann hat mit der Breitbandsonde zuerst eine Suche des maximalen Immissionsortes zu erfolgen. An diesem Ort ist eine Feinmessung mit Spektrumanalysator bzw. Messempfänger (Effektivwertanzeige!) und Empfangsantenne durchzuführen. Hierbei sind alle Immissionen aufzunehmen, die weniger als 60 dB unter dem Grenzwert liegen. Dazu ist das Spektrum mit einer passenden Auflösungsbandbreite abzutasten. Die Antenne ist dabei in Senderrichtung auszurichten und zu drehen; der Spektrumanalysator ist in der Betriebsart "Maxhold" zu betreiben. Aus den Messwerten wird mit den Antennenfaktoren und der Kabeldämpfung die elektrische oder magnetische Feldstärke berechnet. Die Ermittlung des räumlichen Feldstärkevektors erfolgt entweder über die Messung mit einer dipolartigen Antenne in den drei orthogonalen Raumrichtungen und anschließender Bildung der Resultierenden, oder, sofern der Hauptanteil der Immission von *einer* Quelle stammt, unter der Verwendung von Richtantennen nach folgendem Verfahren: Die Antenne wird bezüglich Richtung und Polarisierung auf den Sender ausgerichtet. Danach ist ein 360°-Horizontalscan durchzuführen und anschließend in der Richtung des Maximum ein Vertikal-scan. Dieses Vorgehen wird an anderen Messpunkten wiederholt. Abschließend hat eine räumliche Mittelung der Messwerte über 9 Messpunkte zu erfolgen. Dabei sind allerdings nur diejenigen Messwerte zu berücksichtigen, die weniger als 40 dB vom Grenzwert entfernt sind. Sofern der Mittelwert dicht am Grenzwert ist, muss in der Auswertung nicht nur der Mittelwert, sondern auch alle 9 Einzelwerte angegeben werden. Die Mittelung soll vor allem die Messunsicherheit an Messorten, die nicht in der Hauptstrahlrichtung einer Sendeanlage bzw. innerhalb von Gebäuden liegen, minimieren.
3. Ist hingegen die vorhandene Immission kleiner als die Empfindlichkeitsschwelle der Breitbandsonde, hat die Auswahl der Messpunkte nach der vorhandenen Sendertopologie zu erfolgen, wobei die Erfahrung des Messpersonals einzubeziehen ist. Die Messungen werden mit Spektrumanalysator und Empfangsantenne vorgenommen.

Außerdem werden Angaben zur Messunsicherheit getätigt: Die Gesamtmessunsicherheit wird in gerätebedingte und messbedingte Messunsicherheiten unterteilt. Bei Messungen außerhalb der Hauptstrahlrichtung der Sendeantenne ist auch die Rayleigh-Unsicherheit (starke örtliche Amplitudenschwankungen) zu berücksichtigen. Deswegen kann hier ein Messwert stark vom Mittelwert abweichen.

Eine Extrapolation der gemessenen Augenblickswerte auf den Zustand bei maximaler Anlagenauslastung hat zu erfolgen. Sofern keine Angaben vom Netzbetreiber bezüglich der tatsächlich vorhandenen Kanalzahlen der Anlage vorliegen, sind in einer Tabelle typische Kanalzahlen für unterschiedliche Umgebungsklassen (in Abhängigkeit von der Einwohnerzahl) vorgegeben, die dann verwendet werden können. Aufgrund der fehlenden Frequenzinformation wird die Extrapolation bei Messung mit der Breitbandsonde als nur ungenügend realisierbar beschrieben.

Großbritannien

In Großbritannien ist für Fragen der Personensicherheit in elektromagnetischen Feldern das National Radiological Protection Board (NRPB) verantwortlich. NRPB hat in der Vergangenheit viele Expositionsmessungen durchgeführt und mit dem Report "Exposure to Radio Waves near Mobile Phone Base Stations" [NRPB-R321] eine Zusammenfassung von Messungen in der Nähe von Mobilfunk Basisstationen veröffentlicht. Messungen, die von verschiedenen anderen Institutionen durchgeführt werden, beziehen sich oftmals auf diesen Report und das darin beschriebene Messverfahren.

Hierin wird als Messgerät wegen der erhöhten Empfindlichkeit der Spektrumanalysator präferiert. Im zu untersuchenden Messvolumen erfolgt zwar eine Maximalwertsuche; hierzu ist aber keine spezielle Technik angegeben. Es wird lediglich beschrieben, dass die Messantenne vorsichtig im Messvolumen bewegt wird, wobei der Spektrumanalysator auf "Maxhold" eingestellt wird. Es erfolgt keine Hochrechnung auf maximale Anlagenauslastung, sondern durch die zahlreichen worst case Annahmen bei der Messung (z.B. Peak Detektor anstatt von RMS Detektor) wird der gemessene Momentanwert als ausreichend konservativ betrachtet. Im Dokument wird eine relativ hohe Messunsicherheit angegeben; dieses resultiert vorrangig aus der Berücksichtigung der verfahrensbedingten Messunsicherheiten (Kopplung der Antenne mit Messpersonal und Einrichtungsgegenständen) zusätzlich zu den Unsicherheiten der verwendeten Messgeräte.

Schweiz

In der Schweiz war man nach der Einführung von im Vergleich zum europäischen Maßstab verschärften Anlagengrenzwerten für die Immissionen durch Mobilfunk Basisstationen innerhalb der "Verordnung über den Schutz vor Nichtionisierende Strahlung (NISV)" [NISV] gezwungen, ein spezifisches Messverfahren festzulegen, das für die Überprüfung der Anlagengrenzwerte geeignet ist. Hierbei ist eine Messempfehlung entstanden, die im internationalen Maßstab zu den am weitentwickeltesten Arbeiten auf diesem Gebiet gehört.

Nach Inkraftsetzung der NISV wurde mit der "Messempfehlung für GSM-Basisstationen, Entwurf vom 20. März 2001" von BUWAL und METAS [BUWAL 01] ein Entwurf vorgelegt

und zur Diskussion gestellt. Diese ist streng genommen nur für GSM Basisstationen anzuwenden; für andere Dienste (UMTS, TETRA, WLL) sind Messempfehlungen in Vorbereitungen.

Vom Konzept her wird mit einem geeigneten Messgerät das zu untersuchende Raumvolumen abgetastet und die höchste Feldstärke ermittelt. Es erfolgt *keine* räumliche Mittelung der gemessenen Werte. Danach werden die Messwerte auf den "maßgebenden Betriebszustand", d.h. den Zustand bei maximaler Anlagenauslastung, extrapoliert und ergeben den Beurteilungswert. Der Beurteilungswert wird letztlich mit dem Anlagengrenzwert verglichen.

Bei der Messung werden frequenzselektive Spektrumanalysatoren bzw. Messempfänger bevorzugt. Eine Messung mit Breitbandmessgeräten mit isotropen Sonden ist zu Orientierungszwecken erlaubt: Wenn der bei der Breitbandmessung ermittelte und unter worst case Bedingungen extrapolierte (man geht davon aus, dass nur der Kontrollkanal BCCH aktiv war) Messwert unter dem Anlagengrenzwert liegt, gilt die Anlage als den Bestimmungen entsprechend; andernfalls ist eine Feinmessung mit frequenzselektiven Geräten durchzuführen. Die Messungen sind dann mit einem Peak Detektor und einer Auflösungsbandbreite von vorzugsweise 300 kHz durchzuführen.

Der Entwurf der Messempfehlung definierte bezüglich der örtlichen Maximumsuche bei frequenzselektiver Messung drei unterschiedliche Verfahren:

1. 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 wird das Spektrum mit der "Maxhold" Funktion des Messgerätes kontinuierlich erfasst. Bei dieser Methode resultiert ein "Maxhold" Spektrum, aus dem für jeden Kontrollkanal die zugehörige Feldstärke abgelesen und für die Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung verwendet werden kann.
2. Bei der *Drehmethode* wird die Messantenne auf einer kreisförmigen Bahn um einen Drehpunkt bewegt. Dabei soll der Mittelpunkt der Antenne einen Kreis von mindestens 1,0 m Durchmesser beschreiben. Diese Drehung wird mit vier verschiedenen Polarisierungen der Antenne (horizontal, vertikal, +45°, -45°) und auf drei Höhen (0,75 m, 1,25 m und 1,75 m) wiederholt. Während des ganzen Vorgangs wird das Spektrum mit der "Maxhold" Funktion des Messgerätes kontinuierlich erfasst. Die Spektren für die einzelnen Polarisierungen und Messhöhen können separat abgespeichert werden. Die Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung erfolgt, in dem für jeden Kontrollkanal BCCH der höchste gemessene Feldstärkewert eingesetzt wird. Die Werte der verschiedenen Polarisierungen werden im Gegensatz zur Punktrastermethode nicht zu einer Resultierenden verknüpft.
3. Bei der *Punktrastermethode* wird das Messvolumen mit der Messantenne in einem fixen Punktraster abgetastet. Es wird vorgeschlagen, auf drei Messhöhen (0,75 m, 1,25 m und 1,75 m) jeweils mindestens 20 Rasterpunkte zu messen. Es ist eine dipolartige Empfangsantenne zu verwenden und diese nacheinander in die drei orthogonalen Raumrichtungen zu orientieren. Die Messwerte werden für jeden Kontrollkanal BCCH geometrisch aufsummiert und zu einer Resultierenden verknüpft. Maßgebend für die Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung ist auch hier der maximale im Raster gemessene Wert für jeden Kontrollkanal BCCH.

Außerdem verlangt der Entwurf ein Vorhalten der ermittelten Messunsicherheit zum Messwert, d.h. der Grenzwert gilt erst dann als eingehalten, wenn Messwert inkl. Messunsicherheit kleiner als der Grenzwert ist.

In der Empfehlung wird weiterhin auf das Problem Frequency Hopping sowie auf mögliche Arten von Empfangsantennen eingegangen.

Die vier Schweizer Mobilfunk Netzbetreiber nahmen in dem Papier "Ermittlung der Immissionen und Überprüfung der NISV-Grenzwerte bei Mobilfunknetzen" [SICTA 01] u.a. Stellung zum Entwurf der Messempfehlung und präsentierten einen eigenen Vorschlag. Relevante Änderungsforderungen umfassten in erster Linie die Nutzung von Breitbandsonden, die Behandlung der Messunsicherheit und die Ermittlung des Messwertes im Messvolumen: Wohingegen der Entwurf [BUWAL 01] als Messwert den örtlich höchsten gemessenen Wert vorsah, wurde in [SICTA 01] eine Mittelung von Messwerten über ein räumlich ausgedehntes Messraster vorgestellt, das den Kopf-, Torso- und Beinbereich eines Menschen nachbildet. Die Mittelung wird dadurch begründet, dass 1.) so eine bessere Reproduzierbarkeit der Messungen erreicht werden könne und 2.) einige Personenschutznormen, wie z.B. die IEEE C95.1 [IEEE C95.1], die ICNIRP-Guidelines [ICNIRP 98] sowie die österreichische ÖNORM S1120 [S 1120] die (abgeleiteten) Grenzwerte als über den Körper gemittelte Werte definieren. Das würde dazu führen, dass die in [BUWAL 01] vorgeschlagene Schwenkmethode nicht mehr anwendbar wäre, da die einzelnen Messwerte separat in einem Punktraster ermittelt werden müssten. Die Aussagen zur Reproduzierbarkeit wurden in einem dem Vorschlag der vier Netzbetreiber beigelegten Gutachten der Swisscom messtechnisch dokumentiert. Bezüglich der Messunsicherheit wurde gefordert, diese nicht zusätzlich zum Grenzwert vorzuhalten, da dies einer faktischen Verschärfung der in der NISV vorgeschriebenen Grenzwerte gleichkäme. Weiterhin wurde die Verwendung von Breitbandsonden als ungeeignet dargestellt, da die worst case Extrapolation des gemessenen Momentanwertes auf den Beurteilungswert in der Regel unrealistisch hohe Beurteilungswerte ergäbe.

In nachfolgenden Diskussion zwischen BUWAL, METAS und den Netzbetreibern wurde eine letztendliche Messempfehlung [BUWAL 02] verfasst: Diese beharrt auf der Ermittlung des örtlichen Maximalwertes als Messwert (d.h. *keine* räumliche Mittelung), schließt sich aber bezüglich der Messunsicherheit dem Vorschlag der vier Netzbetreiber an. Bezüglich der Maximierungsmethode wird bei frequenzselektiven Messungen alleinig die Schwenkmethode zugelassen, und zwar entweder für jeden Kontrollkanal einzeln oder simultan in einem Messdurchgang. Ein Mindestabstand von 50 cm zu Mobiliar oder den Raumwänden ist einzuhalten. Wird die breitbandige Messung mit isotroper Sonde verwendet, so ist das Messvolumen genügend langsam zur Ermittlung des Feldstärke Maximums abzutasten.

Eine Kombination von Schwenkmethode und Punktrastermethode ist in der Untersuchung "Immissionen in Salzburg" [COR 02] enthalten: Hierbei wurden zur Überprüfung der "Salzburger Grenzwerte" in der Stadt Salzburg durch das Schweizerische Bundesamt für Kommunikation (BAKOM) im Auftrag der Eidgenössischen Kommunikationskommission (Com-Com) für verschiedene, durch Los ermittelte Anlagen zuerst die drei am meisten exponierten Orte in der Umgebung der Anlage mit einem strahlenoptischen Programm berechnet und dann an diesen Stellen eine Feinmessung durchgeführt. Die Messungen erfolgten in drei Durchgängen: Zuerst wurde mit einer Breitbandsonde der Raumbereich mit den größten Immissionen ermittelt. Danach wurde mit der Schwenkmethode unter Verwendung frequenzselektiven

Messequipments diejenigen beiden Punkt im Messvolumen bestimmt, an denen die Immission durch den stärksten Kontrollkanal der Anlage vor Ort (1 x GSM 900, 1 x GSM 1800) maximal war. In einem dritten Schritt wurde an diesen Punkten mit einer vom ÖFZ Seibersdorf entwickelten Messtechnik (kleine, breitbandige, dipolartige Feldsonden) punktgenau die Feldstärke in den drei Raumrichtungen ermittelt und zu einer Resultierenden zusammengefasst. Die Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung erfolgte analog zu [BUWAL 01]. Die Messunsicherheit wurde zum Messwert addiert.

Der gegenüber der BUWAL GSM-Messempfehlung [BUWAL 01, BUWAL 02] quasi verdoppelte zeitliche Aufwand wird damit begründet, dass die Vorteile der Messungen mit Feldsonden (unkompliziert und gutes Isotropieverhalten) mit den Vorteilen von Richtantennen (empfindlich, präzise und frequenzselektiv) gekoppelt werden konnten. Allerdings ist die Messzeit nicht unerheblich: Der Bericht spricht von einer Messzeit von 1 h bis 2 h pro Messort!

Spanien

In Spanien existieren mit dem "Orden CTE/23/2002" [CTE/23/2002] eine staatliche Regelung für die Erfassung der elektromagnetischen Immissionen durch Hochfrequenz Sendeanlagen. Ziel ist hier in erster Linie eine Zulassungsmessung für die Anlage, d.h. der Nachweis, dass in der Umgebung der Anlage, in der sich Personen aufhalten können, keine Immissionen auftreten können, die größer als die Grenzwerte sind. Der Anlagenbegriff ist nicht auf Mobilfunk Sendeanlagen beschränkt.

Die Messungen werden in zwei Phasen unterteilt: In Phase 1 wird im Sinne einer Überblicksmessung mit Hilfe eines Breitbandmessgerätes mit isotroper Sonde an allgemeinen Aufenthaltsbereichen in der Nähe der Sendestation gemessen. Die Messungen verlaufen punktweise in horizontalen Ebenen in 0 m bis 2 m Höhe. Ist der Ort mit dem Maximalwert gefunden, erfolgt dort eine Langzeitmessung über 6 Minuten (pro Sekunde ein Messwert) mit Montage der Sonde auf einem Stativ, d.h. ohne Beeinflussung durch den Messenden. Aus den Messwerten wird der zeitliche Mittelwert gebildet. Falls die Station nicht mit maximaler Auslastung betrieben wurde, hat eine Extrapolation zu erfolgen. Spezielle Ausführungsvorschriften hierzu fehlen jedoch. Sofern die extrapolierten Messwerte um mehr als 6 dB unter dem Grenzwert (oder unter der Empfindlichkeitsschwelle der Messgeräte) liegen, gilt die Station als den Bestimmungen entsprechend. Andernfalls haben Messungen nach Phase 2 oder 3 zu erfolgen.

In Phase 2 sind als Messgeräte frequenzselektive Spektrumanalysatoren oder Messempfänger mit Effektivwertanzeige sowie geeignete Empfangsantennen und Kabel mit bekannten Eigenschaften zu verwenden. Die Messungen erfolgen im Frequenzbereich 9 kHz bis 3 GHz möglichst im Fernfeld, wobei hierunter (bei Frequenzen unter 1 GHz) ein Abstand von mindestens drei Wellenlängen vom Sender zu verstehen ist. Der Messende muss für jede als signifikant erkannte spektrale Immissionskomponente den gefundenen Pegel als Funktion von Orientierung und Polarisation der Empfangsantenne maximieren. Genauere Angaben über die Durchführung der Maximierung sind nicht enthalten. Alle maximierten Spektralanteile werden mit den Antennenfaktoren und den Kabeldämpfungen in direkt mit den Grenzwerten vergleichbare Messwerte umgerechnet (E, H oder S) und, sofern sie weniger als 40 dB unter

dem Grenzwert sind, mit Summationsformeln zu einer resultierenden Gesamtimmission verknüpft und mit dem Grenzwert verglichen. Ist die Gesamtimmission an jedem Messpunkt unter dem Grenzwert, so gilt die Station als der Regelung entsprechend.

Phase 3 gilt für Quellen, deren Emissionen nicht im Frequenzbereich 9 kHz bis 3 GHz liegen, für Messungen im Nahfeld oder für Quellen, die wegen spezieller Emissionscharakteristika gesondert untersucht werden müssen. Die Ausführungen sind für vorliegende Aufgabenstellung nicht relevant.

Normungsbestrebungen im Europäischen Rahmen

Zusätzlich zu den einzelnen nationalen Normungsbestrebungen gibt es relevante Aktivitäten bezüglich Messverfahren elektromagnetischer Felder auf europäischer Ebene.

Personenschutzgrenzwerte 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.

Mit der prEN 50xxx "Basic standard on measurement and calculation procedures for human exposure to electric, magnetic and electromagnetic fields (0 Hz – 300 GHz)" [prEN 50xxx] soll eine Grundnorm entstehen, die in etwa vergleichbar mit der DIN VDE 0848 Teil 1 ist. Diese Vornorm 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 wurde, sind detaillierte Messungen durchzuführen. Das hierzu zu überspannende Messgitter sollte mindestens 4 Messpunkte für den Kopf-/Torsobereich bzw. 6 Messpunkte für den Ganzkörperbereich umfassen. Die Messung kann entweder mit isotropen Sonden oder mit Richtantennen erfolgen, die bezüglich Polarisation und Richtung maximal im Feld ausgerichtet werden müssen. Allgemein werden Breitbandmessgeräte und frequenzselektive Messgeräte beschrieben.

Speziell für die Messungen an Basisstationen zugeschnitten sind die Vornormen prEN 50383 und prEN YYY. Die prEN 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)" [prEN 50383] ist allerdings für Messungen der Immission vor Ort ungeeignet. Hier geht es vielmehr um die messtechnische Ermittlung einer Sicherheitszone (compliance boundary) durch Vermessung einer separaten Sendeantenne in einer künstlichen reflexionsarmen Umgebung (Absorberkammer).

Demgegenüber definiert die Vornorm prEN YYY "Basic standard for the calculation and measurement of electromagnetic fields related to human exposure from radio base stations and fixed terminal stations for wireless telecommunication systems (110 MHz - 40 GHz), when put into service" [prEN YYY] Mess- und Berechnungsverfahren *bei der Inbetrieb-*

nahme der Anlage. Hierbei wird insbesondere geprüft, ob die bei der [prEN 50383] unter Laborbedingungen ermittelte Sicherheitszone aufgrund von besonderen Gegebenheiten vor Ort (z.B. reflektierende Objekte in unmittelbarer Nähe der Sendeanlage, Immissionsbeiträge anderer Sendeanlagen) erweitert werden muss. Die Intention der vorgeschlagenen Messverfahren ist also primär die Überprüfung der Immissionen auf Grenzwertüberschreitung in unmittelbarer Nähe der Anlage. Dementsprechend sind auch die Dynamikanforderungen an die Messgeräte (0,5 V/m - 200 V/m) nicht für einen Einsatz an weiter entfernten, beliebigen Orten gefasst. Für den Fall, dass die Immissionen hauptsächlich von einer Quelle stammen, sind isotrope Breitbandsonden gestattet. In diesem Fall muss mit einem frequenzselektiven Gerät überprüft werden, ob Immissionen anderer Anlagen mindestens 30 dB unter der Immission der Hauptsendeanlage liegen. Bei Messungen mit frequenzselektiven Geräten sind definierte Angaben zu internen Geräteeinstellungen enthalten. Außerdem ist ein Mindestabstand des Messgerätes zu Objekten im Raum bzw. Personen vorgegeben. Es ist kein Verfahren zur Suche des Maximalwertes beschrieben, sondern es wird *an einem vorgegebenen Ort* gemessen. Dies lässt sich mit dem primären Einsatzgebiet in unmittelbarer Nähe der Anlage zur Überprüfung des Sicherheitsabstandes begründen. Erwähnenswert ist, dass, ähnlich wie in [ANFR/DR-15], mehrere Messpunkte aufzunehmen sind und die Feldstärke über ein vorgegebenes Gitterraster zu mitteln ist. Diese Mittelung ist jedoch nur zugelassen, sofern die Messwerte an allen Gitterpunkten unter dem Grenzwert liegen. Eine Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung ist explizit nur bei den Berechnungsverfahren erwähnt.

Schließlich existiert mit der Draft CEPT/ERC/Recommendation "Measuring non-ionising radiation" [CEPT 02] ein Normungsvorhaben, das die verschiedenen europäischen Messverfahren für elektromagnetische Immissionen im Frequenzbereich 9 kHz bis 300 GHz vereinheitlichen soll. Die Messempfehlung ist zwar nicht speziell auf Mobilfunk Basisstationen fixiert, enthält aber in einem Unterkapitel spezielle Anweisungen u.a. für Mobilfunk. Auch dieser Entwurf ist in wesentlichen Punkten sehr ähnlich zum französischen Messprotokoll [ANFR/DR-15]. So sind alleinige Messungen von E oder H schon bei Abständen von einer Wellenlänge vom Sender erlaubt. Messpunkte sind die am meistexponierten 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 über einer "Entscheidungsschwelle" (Schwelle x dB unter dem Grenzwert, in Abhängigkeit von der Messunsicherheit) liegt, wird die Messung an zwei umliegenden Punkten wiederholt und das Ergebnis 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 Polarisation 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, ...). Laut Einteilung fallen Messungen an Mobilfunk Basisstationen unter diesen Anwendungsfall. Für diesen Spezialfall sind die Kontrollkanäle BCCH auszumessen und die Immission auf maximale Anlagenauslastung zu extrapolieren. Am Spektrumanalysator sind der Peak Detektor und die "Maxhold" Einstellung zu verwenden. Eine Maximierungsroutine ist nicht beschrieben.

Außerdem sind Angaben zu Messunsicherheiten enthalten.

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, und nicht speziell für den Mobilfunkbereich zugeschnitten. 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.

3.3.4 Zusammenfassung

In einigen Ländern gibt es Ansätze bezüglich der Normierung von Messverfahren zur Erfassung der Immissionen durch hochfrequente Sendeanlagen. Diese sind unterschiedlich weit entwickelt: Oftmals umfassen die Normen lediglich den gesamten Frequenzbereich (mit Einschluss des Niederfrequenzbereiches) und definieren lediglich allgemeine Anforderungen, z.B. an Messgeräte oder prinzipielle Messdurchführung. Für den speziellen Einsatz der Erfassung von Mobilfunk Immissionen sind sie lediglich ansatzweise geeignet. Andere, auch eher allgemeine Normen definieren darüber hinaus in Extrakapiteln spezielle Bedingungen für die Anwendung auf Mobilfunk Basisstationen und sind somit bedingt für vorliegende

Aufgabenstellung geeignet. Am interessantesten sind Arbeiten, die alleinig die Erfassung von Mobilfunk Immissionen beschreiben. Hierbei steht jedoch oft die Zulassung der Anlage, d.h. die Ermittlung der Immission im unmittelbaren Nahbereich (Ermittlung bzw. Verifizierung des Sicherheitsabstandes) im Vordergrund. Bezüglich der Erfassung der Immission an beliebigen Orten geht die Messempfehlung der Schweiz inhaltlich am weitesten.

Unterschiede in den einzelnen Normen existieren insbesondere in den Bereichen Messgeräte, Ermittlung des Messortes, Messdurchführung, Maximierung der Empfangspegels, Auswertung (Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung, Mittelwertbildung) und Messunsicherheit.

Wohingegen im vorliegenden Kapitel vorrangig eine Normenübersicht verschiedener Länder mit den Kernaussagen der Normen im Vordergrund stand, soll im nächsten Kapitel eine ausführliche Erklärung bzw. Zusammenfassung der einzelnen Aspekte der Messverfahren vorgenommen werden.

3.4 Beschreibung der vorhandenen Messverfahren

3.4.1 Grundsätzliche Messverfahren

Bei der Messung hochfrequenter Immissionen wird grundsätzlich zwischen *breitbandigen* und *frequenzselektiven* Messverfahren unterschieden. Der Hauptunterschied besteht darin, dass *breitbandige* Verfahren einen Gesamtwert für die Immission innerhalb eines durch das Messgerät festgelegten Frequenzbereiches ermitteln, wobei nicht zugeordnet werden kann, wie sich die Immissionsanteile frequenzmäßig und damit auch emittentenbezogen aufteilen. 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.

Für breitbandige Messungen werden Handmessgeräte mit Breitbandsonden eingesetzt. Bei frequenzselektiven Messungen finden üblicherweise Spektrumanalysatoren oder Messempfänger sowie passende Empfangsantennen und HF-Kabel Verwendung. Die jeweiligen Messgeräte und Hilfsmittel werden in Kapitel 3.4.3 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 aber 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- und Fernsehsender) gleich groß oder höher als die Mobilfunk Immissionen sein können. Außerdem ist mit Breitbandsonden keine korrekte, sondern nur eine worst case Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung möglich.

Heutzutage verfügbare Breitbandmessgeräte sind bezüglich ihrer Empfindlichkeit sehr häufig lediglich zur direkten Überprüfung von Grenzwerten ausgelegt. Viele Geräte haben eine Anzeigeschwelle von etwa 1,0 V/m, d.h. Feldintensitäten von unter 1 V/m werden 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 nach 26. BImSchV als 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. Typische Immissionswerte bezüglich der elektrischen Feldstärke können in einigen 10 Metern Abstand von der Basisstation je nach Lage schon unter 0,1 V/m liegen [BOR 02].

Dem gegenüber sind Spektrumanalysatoren 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 8 Größenordnungen, in den Mobilfunkfrequenzbereichen auch bis 10 Größenordnungen unter den Grenzwerten der 26. BImSchV liegen [BOR 96]. In Zusammenhang mit ihrer Frequenzselektivität sind sie daher bevorzugt für die Detailmessungen einzusetzen.

Den Vorteilen der frequenzselektiven Verfahren (Frequenzselektivität, Empfindlichkeit) steht ein deutlicher Nachteil gegenüber: Frequenzselektive Messungen sind ungleich aufwändiger als breitbandige Messungen. Das betrifft sowohl die finanzielle Seite des Messequipments, die Messdurchführung sowie das know how der mit der Messung Beauftragten. Überblicksmessungen oder das Absuchen großer Areale auf Maximalwerte mit dem frequenzselektiven Verfahren stellt beispielsweise 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, frequenzselektive Geräte oder eine Kombination von beiden einzusetzen sind.

3.4.2 Auswahl der Messpunkte

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

- 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.
- 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 Mobilfunkanlage 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 Kapitel 3.4.1 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 frequenzselektiven 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. Schlafzimmer und Wohnzimmer.

3.4.3 Messgeräte und Hilfsmittel

3.4.3.1 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. Speicherkarten zum Abspeichern der aufgenommenen Spektren.

Bild 3.1 zeigt die benötigten Geräte.

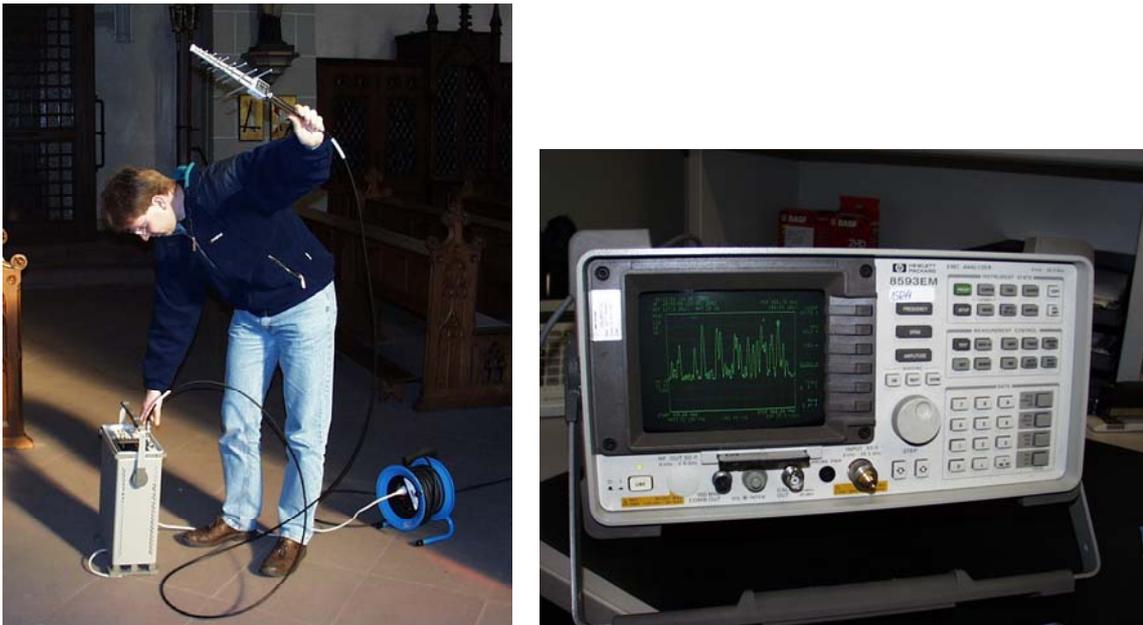


Bild 3.1 Durchführung einer frequenzselektiven Messung mit Spektrumanalysator und Empfangsantenne (links) und Detaildarstellung eines Ergebnisses auf dem Spektrumanalysator (rechts)

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

Technisch wird diese Aufspaltung im Spektrumanalysator so realisiert, dass im gesamten eingestellten Frequenzbereich ein Filter mit einer bestimmten Bandbreite (Auflösungsbandbreite, RBW) den Frequenzbereich durchläuft. Bei jeder Frequenz wird derjenige Beitrag, der durch das Filter umfasst wird, als Anzeigewert dargestellt. Gerade die Messungen 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 mindestens den Frequenzbereich von 9 kHz bis 2,9 GHz umfassen.

Auch das Hochfrequenzkabel und vor allem die Empfangsantennen müssen für den zu untersuchenden Frequenzbereich geeignet sein. Als Empfangsantennen für den durch Mobilfunk Basisstationsantennen abgedeckten Frequenzbereich (900 MHz bis 2,3 GHz) 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 Lage des Feldvektors im Raum aus aufeinanderfolgenden Messungen in den drei orthogonalen Raumkomponenten, wie z.B. für die Punktrastermethode [BUWAL 01, SICTA 02] gefordert, möglich.

3.4.3.2 *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 3.2 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 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 3.2 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.

3.4.3.3 Kalibrierung der Messgeräte

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

Kalibrierung bedeutet:

- bei Breitbandmessgeräten, Spektrumanalysatoren und Messempfängern: Zuordnung zwischen den ausgegebenen Werten des Messgerätes (z.B. 6,8) zu einer durch ein Bezugsnormaal 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.

3.4.3.4 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

$$r > \frac{2D^2}{\lambda_0} \quad (3.1)$$

(Fernfeld) einzuhalten, wobei D die maximale geometrische Ausdehnung der Antenne beschreibt und λ_0 die Freiraumwellenlänge ist. Andere Arbeiten halten bereits ab Entfernungen von einer Wellenlänge (strahlendes Nahfeld) von der Anlage die Erfassung lediglich einer der Feldkomponenten E oder H für hinreichend.

3.4.4 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 korrekte 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) und die Durchlaufzeit des Messfilters durch den eingestellten Frequenzbereich (sweep time).

Lediglich einige der untersuchten Arbeiten geben konkrete Hinweise auf die Einstellung dieser Parameter. So wird in [BUWAL 02] eine RBW von 200 kHz, bei nicht belegten Nachbarkanälen auch eine RBW von 300 kHz favorisiert. Andere Arbeiten sprechen davon, dass die Auflösungsbandbreite RBW mindestens so groß wie die Kanalbandbreite sein muss; ansonsten seien die einzelnen Messwerte bandbreitengerecht aufzusummieren, z.B. [ANFR/DR-15].

3.4.5 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.

Wohingegen die meisten der untersuchten Arbeiten auf das Problem einer Maximierung der Immission nur ansatzweise oder überhaupt nicht eingehen, sind vor allem in [BUWAL 01, BUWAL 02, COR 02] mit der Schwenkmethode, der Drehmethode und der Punktrastermethode bzw. einer Kombination aus Schwenk- und Punktrastermethode sehr detaillierte Vorschläge bezüglich einer praktischen Messdurchführung enthalten.

Prinzipiell sind die vorgestellten Verfahren sowohl für die Messung mit Breitbandsonden, als auch mit Spektrumanalysatoren geeignet. Ausführlich werden im folgenden die Methoden für die Messungen mit Spektrumanalysatoren diskutiert.

3.4.5.1 Frequenzselektives Messverfahren

Die Messung erfolgt im wesentlichen so, dass mit der Antenne ein zu untersuchendes Rauminvolumen abgetastet wird. Der Spektrumanalysator ist auf die Betriebsart "Maxhold" einzustellen. Hierbei werden die im Spektrum angezeigten Immissionen nur dann aktualisiert, wenn bei der Messung ein größerer Wert festgestellt wurde als bei den bislang abgespeicherten Daten. Bei allen Methoden ist ein gewisser Mindestabstand der Antenne zu Wänden, Boden, Decke und Mobiliar einzuhalten. Die Methoden sind weiter oben bereits ausführlich vorgestellt worden; hier wird lediglich auf Vor- und Nachteile der einzelnen Verfahren eingegangen:

Schwenkmethode

Hierbei ist zu beachten, dass sich die Immissionen der einzelnen Basisstationen (und der einzelnen Kanäle) im allgemeinen so überlagern, dass die Frequenzkanäle an *unterschiedlichen* Punkten im Rastervolumen ihre Maxima haben. Mit der Schwenkmethode erhält man also gewissermaßen ein worst case Spektrum, da bei der nachherigen Auswertung alle (örtlich

verschiedenen) Maxima der einzelnen Frequenzkanäle als an einem Punkt vorhanden betrachtet und aufaddiert werden. Die Ortsinformation der einzelnen Maxima geht hiermit verloren.

In [WUSCH 02] wird berichtet, dass ein Nachteil des Verfahrens darin bestünde, die Immission bei stark ausgeprägter elliptischer Polarisierung zu unterschätzen (max. 3 dB).

Das Verfahren ist einfach, unkompliziert und schnell durchführbar; die Messzeit pro Raum bewegt sich im Bereich einiger Minuten.

Drehmethode

Für diese Messungen ist zweckmäßigerweise ein Stativ zu verwenden.

Die Spektren der einzelnen Polarisierungen und Höhen können separat abgespeichert werden. Hierdurch ist eine Einzelauswertung möglich, die u.U. die Überschätzung der Immissionssituation bei der Schwenkmethode minimiert.

Vorteil dieses Verfahrens ist die potenzielle Automatisierbarkeit unter Verwendung eines Antennenpositionierers. Nachteilig in der Praxis ist jedoch, dass in der Regel ein solch geringes Messvolumen (bzw. die Abtastung einer Oberfläche) nicht zum Auffinden des Immissionsmaximums in einem Innenraum ausreicht. Der Vorgang ist vielmehr an mehreren Positionen im Raum zu wiederholen. Die Einhaltung von Mindestabständen zu Wänden bzw. zum Mobiliar kann dazu führen, dass entweder Mobiliar entfernt werden muss oder Raumbereiche ausgespart werden müssen und ggf. manuell nachgemessen werden müssen. Die Automatisierung ergibt darüber hinaus keine Zeitvorteile. Üblicherweise ist mit einer gewissen Erfahrung des Messpersonals das manuelle Auffinden des maximalen Immissionsortes mit der Schwenkmethode schneller und unkomplizierter.

Punktrastermethode

Diese Methode setzt Antennen mit dipolartiger Strahlungscharakteristik voraus. An jedem Raumpunkt wird die Messantenne nacheinander in drei orthogonale Raumrichtungen orientiert und daraus in der Auswertung die Raumresultierende gebildet. Durch die zeitliche Nacheinandermessung der Raumkomponenten werden zeitlich inhomogene Felder (z.B. durch Bewegung von Personen im Raum) nicht korrekt erfasst. Vorteilhaft ist hingegen, dass im Gegensatz zu den anderen beiden Methoden für jede zu messende Frequenz (Mobilfunkkanal) genau derjenige Gitterpunkt angegeben werden kann, an dem sich das zugehörige Immissionsmaximum ausbildet.

Dieses Verfahren wird z.B. in [COS 00] präferiert und durch den Einsatz von Präzisions-Breitbanddipolen mit genau bestimmbarem Antennenfaktor und Balunverlusten perfektioniert. Hierbei muss jedoch kritisch hinterfragt werden, ob nicht durch die Minimierung der Messunsicherheit durch eine hochgenaue Messung an einem festen Punkt die insgesamt Genauigkeit des Verfahrens überschätzt wird. Wie eingangs bemerkt, besteht der Sinn eines geeigneten Verfahrens zur Durchführung der Messung darin, ein vorhandenes Volumen geeignet und praktikabel abzutasten, um daraus die Maximalwerte der Immission zu bestimmen. Gerade die feine Abtastung eines großen Volumens gestaltet sich bei der Punktrastermethode aber sehr kompliziert, da pro Messpunkt die Antenne in drei orthogonale Richtungen

ausgerichtet werden muss und somit für eine mit der Schwenkmethode vergleichbare Abtastung eines Raumes ein sehr hoher und damit oftmals nicht mehr praktikabler Zeitaufwand entsteht. Wird hingegen das abzutastende Volumen reduziert oder die Maschenweite des Rasters erhöht, wird die Gefahr einer Unterbewertung der Immission durch Nichttreffen des lokalen Maximums höher. Nur wenn eine räumliche Mittelung der Immission oder eine Angabe derjenigen Orte gefordert ist, an denen sich die lokalen Maxima der einzelnen Frequenzen ausbilden, hat die Punktrastermethode gegenüber den anderen Methoden Vorteile.

Über Erfahrungen bezüglich Aufwand und Reproduzierbarkeit liegen aufgrund der Aktualität der drei Verfahren nur wenige Erfahrungen vor. Im allgemeinen wird z.B. in [WUSCH 02, BOR-02a] die Schwenkmethode als die am schnellsten durchführbare Methode bezeichnet. [SICTA 01] arbeitet die Punktrastermethode mit anschließender Mittelung als die am reproduzierbarste Methode heraus. Neben dem hohen Messaufwand ist hierbei jedoch zu berücksichtigen, inwieweit lt. geltender Normen solch eine Mittelung überhaupt zulässig ist.

3.4.5.2 Breitbandiges Messverfahren

Grundsätzlich ist auch bei der Messung mit einem breitbandigen Feldstärkemessgerät eine Maximalwertsuche möglich. Viele Messgeräte verfügen ebenfalls über eine "Maxhold" Funktion, mit der der größte Wert im Messvolumen gespeichert werden kann. Die Aktivierung dieser Funktion ist jedoch aus folgenden Gründen mit Vorsicht zu behandeln:

1. Breitbandsonden benötigen eine gewisse Zeit, um sich auf den Messwert an einem festen Ort einzupendeln,
2. Der Messwert ist erst dann abzulesen, wenn die Sonde fest an einem Messpunkt positioniert ist und sich auf den Immissionswert eingependelt hat. Während einer Bewegung des Gerätes im Feld werden oft physikalisch nicht tatsächlich vorhandene, überhöhte Werte angezeigt.

Vor allem wegen des zweiten Grundes ist eine kontinuierliche Messung während einer Bewegung des Messgerätes stark fehlerbehaftet. Die Punktrastermethode, d.h. ein diskretes Messen der Werte in einem festen Punktraster, ist hingegen möglich. Bei isotropen Sonden entfällt die Notwendigkeit der Positionierung des Messgerätes in alle drei Raumrichtungen, so dass hier ein Zeitvorteil gegenüber nicht isotropen Sonden entsteht.

Neben der Maximalwertsuche bieten moderne Breitbandmessgeräte auch die Möglichkeit der Abspeicherung der Messwerte an diskreten Messpunkten und einer nachfolgenden Mittelung.

3.4.5.3 Mittelungsmethoden

Ein wesentlicher Unterschied zwischen den einzelnen recherchierten Verfahren besteht darin, welcher der gemessenen Werte letztlich als Messwert in die Bewertung und den Vergleich mit den Grenzwerten eingeht. Hier bestehen prinzipiell drei Möglichkeiten:

1. Maßgebend ist der höchste im Messvolumen ermittelte Wert, z.B. [BUWAL 02],
2. Es hat eine örtliche Mittelung der Messwerte nach einem vorgegebenen Schema zu erfolgen, z.B. [SICTA 01],

3. Es ist vom Ergebnis der Messung abhängig, ob der Maximalwert oder der Mittelwert für die weitere Betrachtung herangezogen wird, z.B. [CEPT 02, prEN YYY].

Die Vorschläge 2 und 3 beinhalten eine Mittelung der gemessenen Werte über ein definiertes Gitterraster. Als Vorteile der Mittelung werden z.B. in [SICTA 01] aufgeführt, dass 1.) so eine bessere Reproduzierbarkeit der Messungen erreicht werden kann und 2.) einige Personenschutznormen, wie z.B. die IEEE C95.1 [IEEE C95.1], die ICNIRP-Guidelines [ICNIRP 98] sowie die Österreichische ÖNORM S1120 [S 1120] die (abgeleiteten) Grenzwerte als über den Körper gemittelte Werte definieren. Obwohl nicht explizit erwähnt, "mittelt" dieses Verfahren natürlich die aufgrund der starken örtlichen Amplitudenschwankungen real existierenden hohen Immissionsspitzen weg und ergibt somit ein "moderateres" Bild der Immissionssituation vor Ort. Dies ist sicherlich aus Betreibersicht positiv, muss aber in jedem Fall durch die jeweilige nationale Personenschutznorm gedeckt sein.

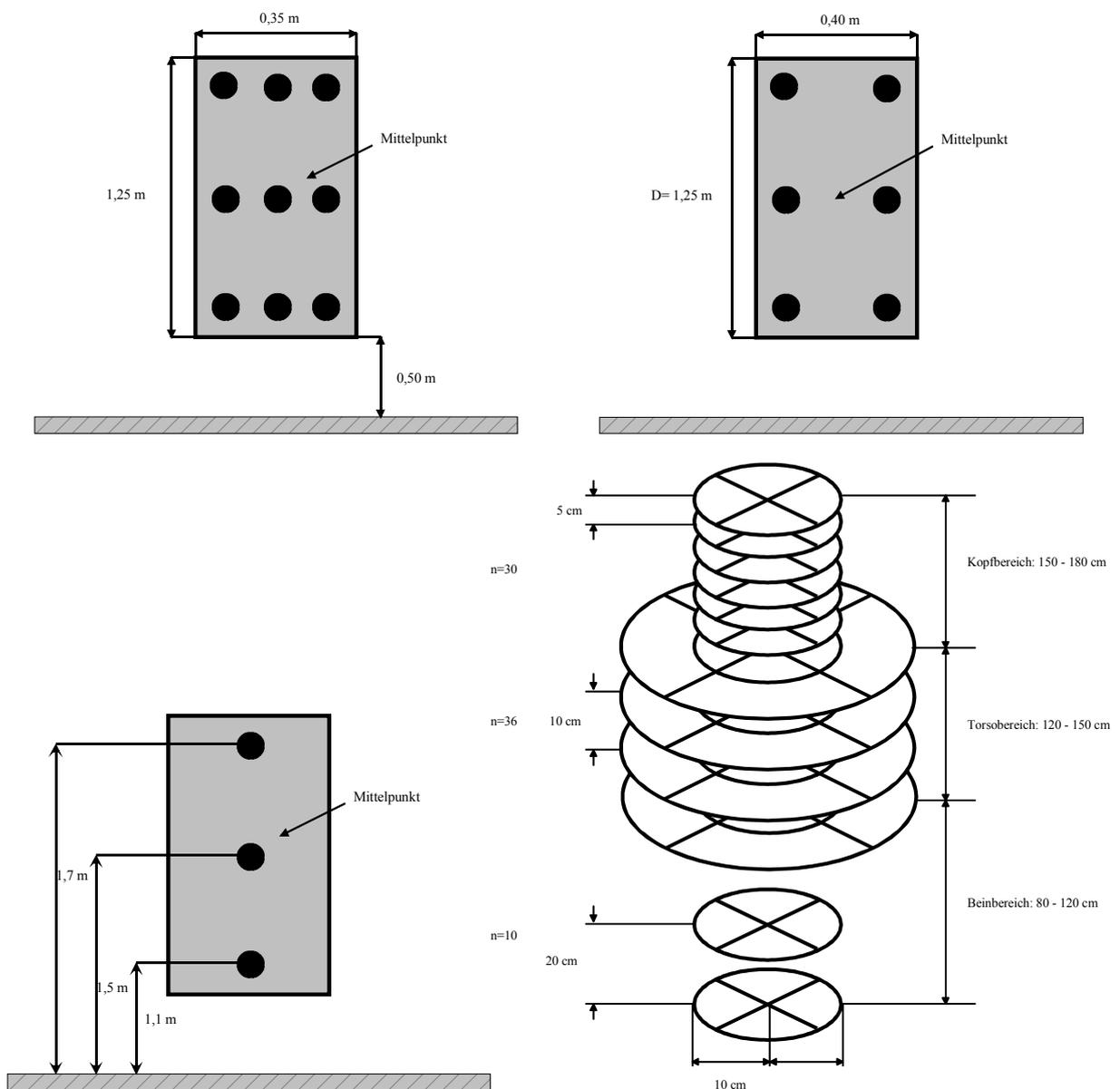


Bild 3.3 Verschiedene vorgeschlagene Messraster für eine Mittelung der Messwerte. links oben: [ANFR/DR-15]; rechts oben: [prEN YYY]; links unten: [CEPT 02]; rechts unten: [SICTA 01]

Bezüglich der Gitterraaster, über die eine Mittelung vorgenommen wird, bestehen Vorschläge nach Bild 3.3. Danach erscheint vor allem der Vorschlag aus [SICTA 01] mit 76 einzelnen Messpunkten bezüglich des damit verbundenen Messaufwandes als unrealistisch.

Die Einführung einer Mittelung hätte jedoch zur logischen Konsequenz, dass bezüglich der Messwertaufnahme nur die Punktrastermethode in Frage kommt, bei der in Ermangelung von isotropen Antennen für frequenzselektive Messungen an jedem einzelnen Gitterpunkt das Feld sequentiell in drei unterschiedlichen Orientierungen der Empfangsantenne aufgenommen und ausgewertet werden muss. Die Punktrastermethode ist von den drei in [BUWAL 01] vorgestellten Methoden die am meisten aufwändige.

Ob überhaupt eine Mittelung durchgeführt werden muss, hängt unabhängig von Aufwands- und Reproduzierbarkeitsaspekten in erster Linie davon ab, inwieweit die der Bewertung zugrunde liegende Personenschutznorm eine solche Mittelung gestattet oder die Ermittlung von *Maximalwerten* vorschreibt. In der Tat ist lt. [26. BImSchV] im Hochfrequenzbereich eine Mittelung oder eine kleinräumige Überschreitung der Grenzwerte (wie z.B. im Niederfrequenzbereich) nicht erwähnt. Da dieser Punkt Konsequenzen bei der Entwicklung eines geeigneten Messverfahrens hat, sollte er zeitnah mit dem Auftraggeber diskutiert werden.

3.4.6 Auswertung

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

- Wie werden aus den originär mit dem Spektrumanalysator gemessenen Spannungs- bzw. Leistungspegeln Feldstärke- oder Leistungsflussdichtewerte berechnet?
- Wie erfolgt die Extrapolation der gemessenen Augenblickswerte auf den Zustand bei maximaler Anlagenauslastung? Hierbei sind auch die Besonderheiten zu berücksichtigen, die sich aus der mobilfunktypischen Betriebsart Frequency Hopping ergeben.
- Ggf. Durchführung der Mittelung; dies ist bereits oben ausführlich behandelt worden.

3.4.6.1 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, 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.

3.4.6.2 Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung (Spektrumanalysator)

3.4.6.2.1 Vorgehen bei GSM Anlagen

Sofern lt. der entsprechenden Personenschutznorm, nicht (nur) die Aufnahme des Augenblickswertes der Immission, sondern auch der Zustand bei maximaler Anlagenauslastung gefordert wird, hat diesbezüglich eine zusätzliche Auswertung zu erfolgen. Da in der Regel nicht davon ausgegangen werden kann, dass vom Betreiber die Anlage nur für die Zeit der Messungen in den maximalen Betriebszustand gefahren werden kann, muss die Extrapolation auf andere Art und Weise erfolgen.

Die *GSM-Sendetechnik* hat einige markante Details, die man sich bei der Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung zunutze machen kann:

Eine Basisstation sendet in der Regel auf mehreren, fest zugeordneten Frequenzen. Jede Frequenz bildet einen physikalischen Kanal. Für jeden Sektor (bzw. jede Funkzelle) der Basisstation gibt es einen Kanal, der ständig

- konstant mit maximaler Leistung sendet und
- bei dem alle Zeitschlitze belegt sind, auch wenn kein Gespräch über diesen Kanal läuft.

Dieser sog. BCCH (Broadcast Control Channel, Sende-Kontrollkanal) hat u.a. verschiedene Steuerungsfunktionen hinsichtlich der augenblicklichen Position (Local Area Code), Netzbetreiber, Zugriffsparameter, Liste der benachbarten Zellen usw. Der BCCH bestimmt durch sein permanentes Vorhandensein die minimale in einer Funkzelle mögliche Immission.

Zusätzlich zum BCCH können ein oder mehrere sog. Nutz- oder Gesprächskanäle (TCH, Traffic Channel) hinzukommen, über die die Gespräche übertragen werden. Diese zeichnen sich dadurch aus, dass im Gegensatz zum BCCH

- nur dann gesendet wird, wenn Gespräche zu übertragen sind,
- in Gesprächspausen das Sendesignal ausgetastet wird (sofern DTX = Discontinuous Transmission aktiviert),
- nur in denjenigen Zeitschlitzen gesendet wird, in denen ein Gespräch läuft, und
- die Sendeleistung von Zeitschlitz zu Zeitschlitz unterschiedlich sein kann entsprechend der Verbindungsqualität zwischen Handy und Basisstation (intelligente Leistungsregelung).

Vor allem die TCH sind dafür verantwortlich, dass die Sendeleistung der Basisstation zeitlich nicht konstant ist, sondern vom Gesprächsaufkommen und der Verbindungsqualität abhängt.

Die Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung erfolgt derart, dass zunächst die Immission durch die BCCH Kanäle gemessen wird und diese Immissionen nachträglich mit Hilfe der Anzahl der maximal möglichen Kanäle pro Sektor hochgerechnet wird.

Für eine korrekte Bestimmung der maximal möglichen Immission einer Anlage ist die konstruktive Mitarbeit der Netzbetreiber notwendig. Nur wenn

- die Anzahl der Sektoren (Zellen) pro Basisstation,
- die maximale Anzahl der Kanäle pro Sektor (Zelle) und

- die Frequenzen der unterschiedlichen Kanäle (BCCH und TCH)

bekannt sind, kann eine Zuordnung der im Spektrum gemessenen Immissionen auf die unterschiedlichen Kanäle der Station(en) erfolgen. In [ANFR/DR-15] wird, sofern keine Angaben vom Netzbetreiber vorliegen, eine Abschätzung typischer Kanalzahlen von GSM Mobilfunkanlagen in Abhängigkeit von der Bevölkerungsdichte der Umgebung, in der die Anlage installiert wird, gegeben. Diese Abschätzung sollte jedoch nur in Ausnahmefällen verwendet werden, da damit die tatsächlich maximal mögliche Immission über- oder unterschätzt werden kann.

Einige Arbeiten weisen auch auf den Spezialfall des "Frequency Hopping" hin. Das "Frequenzsprungverfahren" bezeichnet eine Betriebsart, bei der die Basisstation die Sendefrequenz eines physikalischen Kanals von Zeitschlitz zu Zeitschlitz ändert. Mit dieser Technik werden Störungen minimiert. Hierbei können mehr Frequenzen verwendet werden, als physikalische Kanäle zur Verfügung stehen. Um die damit verbundene Gefahr einer Überbewertung der Immissionen zu reduzieren, muss in der Auswertung nicht die Maximalzahl der verwendeten Frequenzen, sondern die der maximal vorhandenen physikalischen Kanäle zugrunde gelegt werden. Auch hier sind die Daten über die Sendeanlage vom Netzbetreiber vonnöten.

3.4.6.2.2 Vorgehen bei UMTS Anlagen

Für das derzeit im Aufbau befindliche UMTS System ist eine Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung ebenso wichtig wie bei GSM, da auch hier das Sendesignal der Basisstation in seiner Amplitude stark schwankt.

Das bei GSM verwendete Verfahren ist auf UMTS jedoch nicht ohne weiteres übertragbar. Anders als bei GSM, wo die einzelnen Gesprächsteilnehmer über Zeitschlitze bzw. unterschiedliche Frequenzen separiert werden, handelt es sich bei UMTS um ein CDMA System. Hierbei erfolgt die Separierung der Teilnehmer durch unterschiedliche Codes (CDMA = Code Division Multiple Access). Die Beiträge aller Teilnehmer werden in einem Signalgemisch zusammen in einem gemeinsamen Kanal übertragen. Somit sind mit einem Spektrumanalysator, der nur den Frequenzbereich und in begrenztem Umfang auch den Zeitbereich von Signalen, nicht jedoch den Codebereich auflösen kann, die einzelnen Teilnehmer bzw. die einzelnen Kanäle nicht mehr separierbar.

Aufgrund der Tatsache, dass UMTS Netze noch nicht flächendeckend, sondern allenfalls im Probebetrieb gefahren werden, existieren noch keine EMVU Messerfahrungen. Insbesondere ist die Ermittlung der Immission bei maximaler Anlagenauslastung ein Problem, das bislang lediglich in zwei der recherchierten Arbeiten angesprochen wird. [BUWAL 02] empfiehlt, bis zur Festlegung eines geeigneten Verfahrens das Übergangsverfahren nach [SICTA 01] anzuwenden. Dieses sieht eine Ansteuerung der UMTS Station mit einem unmodulierten Trägersignal vor. Aus der gemessenen Immission kann dann relativ einfach die Extrapolation auf den Zustand bei maximal beantragter Leistung ermittelt werden. Zur späteren Messung an UMTS Anlagen unter realen Betriebsbedingungen wird in [SICTA 01] und [BOR 02a] vorgeschlagen, mit Spezialmessequipment (Code Domain Analysatoren, Basisstationstester, Messhandys) die Immission durch den Common Pilot Channel zu erfassen, der bei UMTS

ähnliche Funktionen wie der BCCH bei GSM übernimmt. Hiermit könnte dann wieder eine entsprechende Extrapolation erfolgen. Nähere Details sind allerdings erst nach Inbetriebnahme des UMTS Netzes und dem Sammeln erster Erfahrungen möglich.

3.4.6.2.3 Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung (Breitbandmessgerät)

Aufgrund der fehlenden Frequenzinformation ist mittels Breitbandmessgerät bei GSM Anlagen eine exakte Ermittlung der maximal möglichen Immission nicht möglich, zumindest nicht bei Anlagen, die neben dem BCCH auch über ein oder mehrere TCH verfügen. Trotzdem ist in gewissem Maße eine worst case Abschätzung möglich, die aber voraussetzt, dass am Messpunkt Immissionen vorliegen, die deutlich über der Anzeigeschwelle des Breitbandmessgerätes liegen. In diesem Fall kann in einem worst case Ansatz der Anzeigewert so interpretiert werden, als ob die gemessene Immission lediglich von den BCCH kommt und kein TCH aktiv war. Hierfür ist lediglich die Information notwendig, über wie viel Kanäle die Anlage pro Sektor verfügt. In der Realität wird mit diesem Verfahren die vorliegende Immissionsituation aber deutlich überschätzt, da in der Regel nicht ausgeschlossen werden kann, dass einzelne TCH aktiv waren sowie andere HF-Quellen zum gemessenen Wert einen relevanten Beitrag liefern [SICTA 01].

3.4.7 Dokumentation

Zur Dokumentation der Messungen ist ein Messbericht anzufertigen. Für dessen Inhalt und die Form werden in den recherchierten Arbeiten unterschiedliche Anforderungen gestellt. Oftmals sind Formblätter auszufüllen, die sich eng an das im entsprechenden Land geltende administrative Verfahren der Standortbescheinigung anlehnen, z.B. [BUWAL 02, CTE/23/2002, ANFR/DR-15]. Dessen ungeachtet sollte der Messbericht aber mindestens so aufbereitet sein, dass

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

Es sollten wenigstens folgende Angaben enthalten sein:

- Administrative Angaben,
- Gegenstand der Messung,
- Daten der untersuchten Mobilfunk Sendeanlage,
- Auswahl der Messpunkte,
- Verwendete Messgeräte,
- Messverfahren,
- Messergebnisse,

- Grenzwerte und Vergleich, 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 (Verrechnung zu Lasten der Betreiber [BUWAL 01, COR 02]) oder, sofern z.B. eine maximale Messunsicherheit nicht überschritten wird, diese nicht extra vorgehalten werden muss (typisches Verfahren in der EMV-Messtechnik, jetzt auch in [BUWAL 02] implementiert);
- nur die gerätebedingte, oder auch die verfahrensbedingte Messunsicherheit (prinzipielles Messverfahren, Einfluss des Messenden, Reproduzierbarkeit usw.) einbezogen wird.

3.5 Eignung der verschiedenen Messverfahren

In den Tabellen 3.1 und 3.2 wird die Eignung der vorgestellten Messverfahren gegenüber den in Kapitel 3.2 definierten Anforderungen zusammengefasst. Dabei erfolgt eine Untergliederung in die Punkte *Grundsätzliches Messverfahren* und *Messdurchführung* (Verfahren zur Maximalwertsuche).

Aus einer Übersicht vorhandener Verfahren wird ersichtlich, dass für vorliegende Aufgabenstellung eine Kombination von Breitband- und frequenzselektiven Messungen sinnvoll ist. Breitbandmessungen haben vor allem Vorteile hinsichtlich Messaufwand und Qualifizierung des Personals und sind deswegen vorrangig zu Überblickszwecken bzw. eingeschränkt auch für worst case Abschätzungen anwendbar. Der Hauptschwerpunkt der Messungen liegt allerdings bei frequenzselektiven Verfahren mit Spektrumanalysator bzw. Messempfänger. Diese Verfahren weisen Vorteile vor allem bezüglich Empfindlichkeit und Frequenzselektivität aus, so dass sie vorrangig für Fein- bzw. Detailmessungen eingesetzt werden.

Wichtig vor allem bei Messungen in Innenräumen ist eine geeignete Methodik zur Ermittlung des örtlichen Maximums, da die Immission dort örtlich sehr stark schwanken kann. Hierfür gibt es mit der Schwenkmethode, der Drehmethode und der Punktrastermethode verschiedene Ansätze, die bezüglich Aufwand, Genauigkeit und Reproduzierbarkeit noch näher zu untersuchen sind. Ebenso ist die Fragestellung einer Mittelung von punktweise aufgenommenen Immissionswerten über den menschlichen Körper repräsentierende Flächen oder Volumina noch zu diskutieren. Offen aufgrund fehlender Erfahrungen ist weiterhin die Behandlung von Messungen an UMTS Stationen unter Berücksichtigung einer exakten Extrapolation der gemessenen Momentanwerte auf maximale Anlagenauslastung.

Kriterium	Grundsätzliches Messverfahren	
	Breitbandig (Breitbandgerät mit isotroper Sonde)	Frequenzselektiv (Spektrumanalysator / Messempfänger mit Antenne)
Empfindlichkeit	gering (typisch ab 1 V/m, selten auch schon ab 0,2 V/m)	hoch (im Mobilfunk Frequenzbereich ca. 10 Größenordnungen unter den Grenzwerten bzgl. der Leistungsflussdichte, entspricht ca. 0,4 mV/m)
Frequenzselektivität	nicht vorhanden (es wird <i>ein</i> Wert angezeigt, der der Summe der Immissionen im spezifizierten Frequenzbereich der Sonde entspricht)	vorhanden (durch Wahl von Frequenzbereich und Auflösungsbandbreite RBW können die Immissionen durch einzelne Mobilfunkkanäle beliebig voneinander oder von anderen Immissionen separiert werden)
Einbeziehung aller relevanter Mobilfunkanlagen	im Rahmen der Anzeigeschwelle (Mindestempfindlichkeit) gegeben; Trennung der Anteile der Anlage vor Ort von anderen Anlagen aber nicht möglich	vollständig gegeben (Datenbereitstellung durch Netzbetreiber für Zuordnung Immission - Mobilfunkanlage notwendig)
Grenzwertüberprüfung	bedingt geeignet (Extrapolation auf max. Anlagenauslastung nur worst case möglich; kann zur deutlichen Überschätzung der tatsächlichen Immissionslage führen)	vollständig geeignet
Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung (GSM)	bedingt möglich (nur mit worst case Ansatz, der zu deutlicher Überschätzung der tatsächlichen Immissionslage führen kann)	vollständig möglich (Datenbereitstellung durch Netzbetreiber notwendig)

Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung (UMTS)	bedingt möglich (nur mit worst case Ansatz, der zu deutlicher Überschätzung der tatsächlichen Immissionslage führen kann)	z.Zt. nur bedingt möglich (worst case Ansatz), Testsender oder Spezialsoftware bzw. -hardware für exakte Extrapolation nötig
Praktikabilität: Aufwand	gering bis moderat (Preis der Messgeräte moderat, Messaufwand gering)	hoch bis sehr hoch (Preis der Messgeräte sehr hoch, Messaufwand hoch)
Praktikabilität: Messung nicht im Labor, sondern vor Ort	hoch (Messequipment für Innen- und Außeneinsatz geeignet, Umstellung von Mobiliar nicht zwingend erforderlich)	moderat (Messequipment für Innen- und Außeneinsatz geeignet, gewisse Einschränkungen durch Witterung beim Außeneinsatz, Umstellung von Mobiliar nicht zwingend erforderlich)
Genauigkeit	vergleichbar	
Qualifizierung des Messpersonals	gering (keine große Erfahrung des Messpersonals notwendig)	hoch (große Messerfahrung des Personals notwendig)
Eignung für Überblicksmessungen	hoch	gering (hoher Messaufwand)
Eignung für Feinmessungen	gering (fehlende Frequenzselektivität und Empfindlichkeit)	hoch
Isotrope Messung möglich?	ja (mit isotroper Sonde)	nur mit hohem Aufwand (sequentielle Messung in allen drei Raumrichtungen mit dipolartiger Antenne)

Tabelle 3.1 Vergleich der grundlegenden Messverfahren: Breitbandig gegenüber frequenzselektiv

Kriterium	Verfahren zur Maximalwertsuche			
	Schwenkmethode	Drehmethode	Punktrastermethode	Punktrastermethode mit anschließender Mittelung
Grenzwertüberprüfung	abhängig davon, ob in der entsprechenden Personenschutznorm als Beurteilungsgröße die Maximalwerte oder die örtlich gemittelten Werte zu verwenden sind. Falls Mittelwerte gefordert, ist nur Punktrastermethode mit anschließender Mittelung geeignet			
Praktikabilität: zeitlicher Aufwand	gering	moderat	hoch oder sehr hoch (in Abhängigkeit von der Anzahl der Rasterpunkte)	hoch oder sehr hoch (in Abhängigkeit von der Anzahl der Rasterpunkte)
Genauigkeit	hier liegen keine belastbaren Angaben vor			
Reproduzierbarkeit	hier liegen keine belastbaren Angaben vor			

Tabelle 3.2 Vergleich der unterschiedlichen Verfahren zur Ermittlung der maximalen Immission in einem vorgegebenen Volumen

4 Zusammenfassung

In vorliegendem Zwischenbericht wird im Sinne einer *Bestandsaufnahme* der derzeitige Stand der Technik auf dem Gebiet der theoretischen Verfahren (Berechnungsverfahren) und der praktischen Verfahren (Messverfahren) zur Bestimmung der Immission im Umfeld von Mobilfunk Basisstationen ermittelt.

Berechnungsverfahren für elektromagnetische Felder in der Umgebung von Sendeanlagen wurden primär im Hinblick auf die Planung von Funksystemen zur Ermittlung des Ausbreitungsverhaltens elektromagnetischer Wellen entwickelt. Deren Einsatzbereich reicht von der Planung der Flächenversorgung (vielfach als Coverage bezeichnet) über die Abschätzung der Frequenzselektivität des Funkkanals durch Mehrwegeausbreitung bis hin zur Analyse der Interferenzen im Netz. Die Umgebung, in der die Ausbreitungsmodelle eingesetzt werden sollen, variiert sehr stark. Da die relevanten Einflussfaktoren in ausgedehnten ländlichen Gebieten, in urbanen (städtischen) Bereichen und bei der Ausbreitung innerhalb von Gebäuden (Inhaus, Indoor) erheblich differieren, ist es bislang noch nicht gelungen, ein allumfassendes Modell zu entwickeln. Abhängig vom Frequenzbereich, der Ausbreitungs Umgebung (Land, Stadt, Inhaus) und dem Verwendungszweck (Rundfunk, Mobilfunk, Richtfunk etc.) existiert daher eine Vielzahl verschiedener Modelle. Grundsätzlich lassen sich die beiden Gruppen der empirischen/semiempirischen Verfahren und der analytischen Verfahren abgrenzen. Analytische Verfahren können in strahlenoptische, feldtheoretische und hybride Verfahren unterteilt werden. Eine Verwendung der Ausbreitungsmodelle zur Berechnung der elektromagnetischen Immissionslage wurde bisher noch nicht durchgeführt.

Die durchgeführte Literaturrecherche zeigt, dass einfache empirische oder semi-empirische Rechenmodelle lediglich sehr globale Aussagen hinsichtlich der zu erwartenden Feldstärken liefern. Sie sind zur Beschreibung des Umfeldes des Senders und aufgrund der Mittelwertangabe für die Immission insbesondere auch zur Grenzwertüberprüfung nicht geeignet. Für höhere Genauigkeiten sind verfeinerte analytische Modelle mit entsprechend höherem Rechenaufwand unumgänglich. Solche Modelle beschreiben auch die komplexen Verhältnisse bei mehreren Basisstationen sowie die verschiedenen Aspekte der Wellenausbreitung, einschließlich der Verhältnisse innerhalb von Gebäuden.

Innerhalb der analytischen Verfahren haben die strahlenoptischen Verfahren vor allem bezüglich des anwendbaren Entfernungsbereiches, des Anwendungsbereiches, der Bedienungsfreundlichkeit, der Eingabedatendetailliertheit und des Rechenaufwandes Vorteile gegenüber den feldtheoretischen Verfahren. Die Vorteile der feldtheoretischen Verfahren gegenüber den strahlenoptischen liegen hingegen in den Bereichen Genauigkeit und Auflösung. Aus diesem Vergleich lassen sich global gesehen leichte Vorteile zugunsten der strahlenoptischen Verfahren ableiten, wobei zu überprüfen ist, inwieweit Hybridverfahren die Vorteile beider analytischen Hauptverfahren kombinieren können.

Die Eignung eines bestimmten der hier vorgestellten und grundsätzlich bewerteten Verfahren für die Aufgabenstellung der Berechnung der Immissionssituation im Umfeld von Mobilfunk Basisstationen wird sich letztlich aus dem praktischen Vergleich verschiedener Berechnungsprogramme innerhalb der folgenden Projektschritte ableiten.

Bezüglich *Messverfahren* gibt in einigen Ländern Ansätze bezüglich der Normierung. Diese sind unterschiedlich weit entwickelt: Oftmals umfassen die Normen lediglich den gesamten Frequenzbereich (mit Einschluss des Niederfrequenzbereiches) und definieren lediglich allgemeine Anforderungen, z.B. an Messgeräte oder prinzipielle Messdurchführung. Für den speziellen Einsatz der Erfassung von Mobilfunk Immissionen sind sie lediglich ansatzweise geeignet. Andere, auch eher allgemeine Normen definieren darüber hinaus in Extrakapiteln spezielle Bedingungen für die Anwendung auf Mobilfunk Basisstationen und sind somit bedingt für vorliegende Aufgabenstellung geeignet. Am interessantesten sind Arbeiten, die alleinig die Erfassung von Mobilfunk Immissionen beschreiben. Hierbei steht jedoch oft die Zulassung der Anlage, d.h. die Ermittlung der Immission im unmittelbaren Nahbereich (Ermittlung bzw. Verifizierung des Sicherheitsabstandes) im Vordergrund. Bezüglich der Erfassung der Immission an beliebigen Orten geht die Messempfehlung der Schweiz inhaltlich am weitesten.

Aus einer Übersicht vorhandener Verfahren wird ersichtlich, dass für vorliegende Aufgabenstellung eine Kombination von Breitband- und frequenzselektiven Messungen sinnvoll ist. Breitbandmessungen haben vor allem Vorteile hinsichtlich Messaufwand und Qualifizierung des Personals und sind deswegen vorrangig zu Überblickszwecken bzw. eingeschränkt auch für worst case Abschätzungen anwendbar. Der Hauptschwerpunkt der Messungen liegt allerdings bei frequenzselektiven Verfahren mit Spektrumanalysator bzw. Messempfänger. Diese Verfahren weisen Vorteile vor allem bezüglich Empfindlichkeit und Frequenzselektivität aus, so dass sie vorrangig für Fein- bzw. Detailmessungen eingesetzt werden.

Wichtig vor allem bei Messungen in Innenräumen ist eine geeignete Methodik zur Ermittlung des örtlichen Maximums, da die Immission dort örtlich sehr stark schwanken kann. Hierfür gibt es mit der Schwenkmethode, der Drehmethode und der Punktrastermethode verschiedene Ansätze, die bezüglich Aufwand, Genauigkeit und Reproduzierbarkeit noch näher zu untersuchen sind. Ebenso ist die Fragestellung einer Mittelung von punktwise aufgenommenen Immissionswerten über den menschlichen Körper repräsentierende Flächen oder Volumina noch zu diskutieren. Offen aufgrund fehlender Erfahrungen ist weiterhin die Behandlung von Messungen an UMTS Stationen unter Berücksichtigung einer exakten Extrapolation der gemessenen Momentanwerte auf maximale Anlagenauslastung.

Literaturverzeichnis

- [0848-1] **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.
- [AHS 01] **M. Alaydrus, V. Hansen und J. Streckert**, *Field Analysis of Base Station Antennas in Complex Environments*, 4th European Personal Mobile Communications Conference, Conference CD-ROM, (2001).
- [ALE 82] **S.E. Alexander**, *Radio Propagation within Buildings at 900 MHz*, Electronic Letters, Vol. 18, Nr. 21, S. 913-914, (1992).
- [AMC 89] **H.W. Arnold, R.R. Murray und D.C. Cox**, *815 MHz Radio Attenuation Measured within Two Commercial Buildings*, IEEE Trans. on Antennas and Propagation, Vol. 37, Nr. 10, S.1335-1339, (1989).
- [ANFR/DR-15] **Protocole de mesure in situ**, *Visant à vérifier pour les stations émettrices fixes, le respect des limitations, en terme de niveaux de référence, de l'exposition du public aux champs électromagnétiques prévues par la recommandation du Conseil de l'Union Européenne du 12 juillet 1999 (1999/519/CE)*, Agence Nationale des Frequences, Republique Francaise, Edition 2001.
- [ARC 98] **B. Alves, C. Ribeiro, und L. Correira**, *A Comparison of Propagation Models for Urban Micro-cells in GSM*, COST 259 TD(98)069, (1998).
- [ASS 71] **M. Assis**, *A Simplified Solution to the Problem of Multiple Diffraction over Rounded Obstacles*, IEEE Trans. Ant. Prop., vol. 19, S. 292-295, (1971).
- [BAS 02] **A. Bitz, M. Alaydrus, J. Streckert und V. Hansen**, *Exposition von Personen im Nahfeld von Basisstationsantennen unter Berücksichtigung komplexer Montageumgebungen*, Kleinheubacher Berichte, Bd. 45, S. 349-353, (2002).
- [BCP 00] **P. Bernardi, M. Cavagnaro, S. Pisa und E. Piuzzi**, *Human Exposure to Radio Base-station Antennas in Urban Environment*, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 48, S. 1996-2002, (2000).
- [BEMFV] **BEMFV**, *Verordnung über das Nachweisverfahren zur Begrenzung elektromagnetischer Felder*, BGBl. Jg. 2002 Teil I Nr. 60, 27.08.2002.

- [BER 93] **J.-E. Berg**, *Building Penetration Loss at 1700 MHz along Line of Sight Street Microcells*, COST 231 TD(93)003, (1993).
- [BGV] **BGV B11 (VBG 25)**, *Unfallverhütungsvorschrift Elektromagnetische Felder*, Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektronik, 01.06.2001.
- [BGR] **BGR B11 (ZH1/257)**, *Elektromagnetische Felder*, Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektronik, Juni 2001.
- [BIS 88] **B. Bisceglia, G. Franceschetti et al.**, *Symbolic Code Approach to GTD Ray Tracing*, IEEE Trans. Ant. Prop., vol. 36, S. 1492-1495, (1988).
- [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).
- [BOR 02] **C. Bornkessel, M. Neikes und A. Schramm**, *Untersuchung der Immissionen durch Mobilfunk Basisstationen*, IMST-Report, Kamp-Lintfort, (2002).
- [BOR 02a] **C. Bornkessel, M. Neikes und A. Schramm**, *Messverfahren zur Ermittlung der Immissionen durch Mobilfunk Basisstationen*, IMST-Report, Kamp-Lintfort, (2002).
- [BUWAL 01] **Messempfehlung für GSM-Basisstationen, Entwurf vom 20. März 2001**, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) und Bundesamt für Metrologie und Akkreditierung (METAS), Bern, (2001).
- [BUWAL 02] **Mobilfunk-Basisstationen (GSM) – Messempfehlung**, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) und Bundesamt für Metrologie und Akkreditierung (METAS), Bern, (2002).
- [BUWAL 02a] **Mobilfunk- und WLL-Basisstationen – Vollzugsempfehlung zur NISV**, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landwirtschaft (BUWAL), Bern (2002).
- [CEPT 02] **Draft CEPT/ERC/Recommendation xxx**, *Measuring Non-ionising Radiation (9 kHz – 300 GHz)*, PT22/rad(01) 26 rev 2, Maisons Alfort, 2002.
- [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).
- [CMN 85] **D.C. Cox, R.R. Murray und A.W. Norris**, *Antenna Height Dependence of 800 MHz Attenuation Measured in Houses*, IEEE Trans. on Vehicular Technology, Vol. 34, Nr. 2, S. 108-115, (1985).

- [COR 02] **Coray, Krähenbühl, Riederer, Stoll, Neubauer und Szentkuti**, *Immissionen in Salzburg*, Studie im Auftrag der Eidgenössischen Kommunikationskommission (ComCom), (2002).
- [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).
- [COS 00] **COST 244bis**, *Mobile Telecommunication Base Stations – Exposure to Electromagnetic Fields*. Report of a Short Term Mission within COST 244bis, (2000).
- [CTE/23/2002] **ORDEN CTE/23/2002**, *de 11 de enero, por la que se establecen condiciones para la presentacion de determinados estudios y certificaciones por operadores des servicios de radiocomunicaciones*. Ministerio de ciencia y tecnologia, Spanien, 11.01.2002.
- [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).
- [DEL 93] **J.J. Delgado**, *Indoor Penetration Results*, COST 231 TD(93)018, (1993).
- [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).
- [DOT 00] **M. Döttling**, *Strahlenoptisches Wellenausbreitungsmodell und Systemstudien für den Satellitenmobilfunk*, Dissertation, Universität Karlsruhe, Band 26 (2000).
- [EMF 03] **Reg TP MA EMF 03**, *PMD-Messanweisung für bundesweite EMVU-Messreihen der vorhandenen Umgebungsfeldstärken*, RegTP, Bonn, (2002).
- [EPS 53] **J. Epstein, D.W. Peterson**, *An Experimental Study of Wave Propagation at 850 MHz*, Proc. IRE, vol. 41, S. 595-611, (1953).
- [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.

- [GAH 93] **R. Gahleitner**, *Wave Propagation Into Urban Buildings at 900 and 1800 MHz*, COST 231 TD(93)092, (1993).
- [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).
- [IMP 02] *Implementation Report on the Council Recommendation Limiting the Public Exposure to Electromagnetic Fields (0 Hz to 300 GHz)*, Report der EU-Kommission, (2002).
- [ITU 370] **ITU-Rec.-370-7**, *Propagation in Non-Ionized Media: VHF and UHF Propagation Curves for the Frequency Range from 30 MHz to 1000 MHz*, Geneva, (1995).
- [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 Micro-cells*, Proc. 9th 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).
- [KEN 90] **J.M. Keenan, A.J. Motley** *Radio Coverage in Buildings*, British Telecom Technology Journal, Vol. 8, Nr. 1, S. 19-24, (1990).
- [KOI 97] **P. Koivisto** *Effects of Nearby Walls on Antenna Radiation Patterns: Comparison of Measurements and FDTD Calculations*, COST 259 TD(97)058, (1997).

- [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).
- [KÜR 93] **T. Kürner**, *Charakterisierung digitaler Funksysteme mit einem breitbandigen Wellenausbreitungsmodell*, Dissertation, Universität Karlsruhe, ISSN 0942-2935, Band 3, (1993).
- [LAF 90] **J.-F. Lafortune, M. Lecours**, *Measurement and Modeling of Propagation Losses in a Building at 900 MHz*, IEEE Trans. on Vehicular Technology, Vol. 39, Nr. 2, S. 101-108, (1990).
- [LAI 00] **Länderausschuss für Immissionsschutz**, *Hinweise zur Durchführung der Verordnung über elektromagnetische Felder (26. Bundes-Immissionsschutzverordnung)*, LAI-Schriftenreihe, Bd. 22, (2000).
- [LAU 94] **A. Lauer**, *FDTD simulations of Indoor Propagation*, Proc. 44th Veh. Technol. Conf., S. 883-886, (1994).
- [LAU 95] **A. Lauer, A. Bahr, J. Pamp, J. Kunisch, I. Wolff**, *Multi-Mode FDTD Simulation of Indoor Propagation Including Antenna Properties*, VTC '95 Digest, IEEE Vehicular Technology Conference, (1995)
- [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).
- [LEB 89] **M. Leberherz, W. Wiesbeck, H.J. Blasberg und W. Krank**, *Berechnung der Rundfunkversorgung mit Hilfe eines digitalen Geländemodells*, Rundfunktechnische Mitteilungen RTM, vol. 33, S. 284-291, (1989).
- [LEB 91] **M. Leberherz**, *Wellenausbreitungsmodelle zur Versorgungsplanung im VHF/UHF-Bereich unter Berücksichtigung der Mehrwegeausbreitung*, Dissertation, Universität Karlsruhe, Nomos Verlagsgesellschaft, Baden-Baden, (1991).
- [LEB 92] **M. Leberherz, W. Wiesbeck und W. Krank**, *A Versatile Wave Propagation Model for the VHF/UHF Range Considering Three Dimensional Terrain*, IEEE Trans. Ant. Prop., vol. 40, S. 1121-1131, (1992).
- [LEV 92] **M.F. Levy**, *Diffraction Studies in Urban Environment with Wide-Angle Parabolic Equation Method*, Electronics Letters, vol. 28, S. 1491-1492, (1992).
- [LLL 94] **T. Lo, J. Litva und H. Leung**, *A New Approach for Estimating Indoor Radio Propagation Characteristics*, IEEE Trans. Ant. Prop., Vol. 42, Nr. 10, S. 1369-1376, (1994).
- [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).

- [LUE 84] **R.J. Luebbers**, *Finite Conductivity Uniform GTD Versus Knife Edge Diffraction in Prediction of Propagation Path Loss*, IEEE Trans. Ant. Prop., vol. 32, S. 70-76, (1984).
- [LUE 84a] **R.J. Luebbers**, *Propagation Prediction for Hilly Terrain Using GTD Wedge Diffraction*, IEEE Trans. Ant. Prop. vol. 32, S. 951-955, (1984).
- [LUE 88] **R.J. Luebbers**, *Comparison of Lossy Wedge Diffraction Coefficients with Application to Mixed Path Propagation Loss Prediction*, IEEE Trans. Ant. Prop., vol. 36, S. 1031-1034, (1988).
- [LUE 89] **R.J. Luebbers**, *A Heuristic UTD Slope Diffraction Coefficient for Rough Lossy Wedges*, IEEE Trans. Ant. Prop., vol. 37, S. 206-211, (1989).
- [MAT 95] **C. Mattiello**, *Electromagnetic Field Studies in Urban Environments with a Higher-Order Parabolic Equation*, Proc. Int. Conf. Ant. Prop. ICAP, S. 355-358, (1995).
- [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).
- [MIL 49] **G. Millington**, *Ground-Wave Propagation over an Inhomogeneous Smooth Earth*, Proc. IEE vol. 96, S. 53-64, (1949).
- [MIL 62] **G. Millington, R. Hewitt und F.S. Immirzi**, *Double Knife-Edge Diffraction in Field-Strength Predictions*, Proc. IEE Monograph 507E, S. 419-429, (1962).
- [NISV] **NISV**, *Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung*, Schweizerischer Bundesrat, 23. Dezember 1999.
- [NRPB-R321] **Mann, Cooper, Allen, Blackwell und Lowe**, *Exposure to Radio Waves near Mobile Phone Base Stations*, NRPB-Report 321, (2000).
- [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).
- [ORT 99] **G. Ortgies**, *Applicability of Semi-empirical Propagation Models for Path Loss Prediction in Urban Microcells*, COST 259 TD(99)007, (1999).
- [prEN 50383] **prEN 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)*, Final Draft, CENELEC, Brüssel, November 2001.
- [prEN 50xxx] **prEN 50xxx**, *Basic Standard on Measurement and Calculation Procedures for Human Exposure to Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (0 Hz - 300 GHz)*. Normentwurf CENELEC TC 106X WG3, April 2002.

- [prEN XYY] **prEN XYY (PR=15350)**, *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 General Public Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields (110 MHz - 40 GHz), When Put into Service*, Draft product standard, Ed. 3.6, CENELEC TC 106X WG1 (MBS), September 2002.
- [prEN YYY] **prEN YYY (PR=15349)**, *Basic Standard for the Calculation and Measurement of Electromagnetic Fields Related to Human Exposure from Radio Base Stations and Fixed Terminal Stations for Wireless Telecommunication Systems (110 MHz - 40 GHz), When Put into Service*, Draft basic standard, Ed. 3.6, CENELEC TC 106X WG1 (MBS), September 2002.
- [RAP 96] **T.S. Rappaport**, *Wireless Communications*, IEEE Press, Prentice Hall PTR, New Jersey, (1996).
- [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).
- [RUD 86] **A.W. Rudge, et. al.**, *The Handbook of Antenna Design*, Peter Peregrinus Ltd., (1986).
- [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).
- [S 1120] **ÖNORM S 1120**, *Mikrowellen- und Hochfrequenzfelder, Zulässige Expositionswerte zum Schutz von Personen im Frequenzbereich 30 kHz bis 3000 GHz, Messungen*, Vornorm, Österreich, 01. Juli 1992.
- [SCHÜ 01] **T. M. Schüller**, *Stellungnahme auf den gemeinsamen Fragenkatalog zur öffentlichen Anhörung "Mobilfunk"*, Deutscher Bundestag, Ausschuss für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin, 02.07.2001.
- [SEI 91] **S. Seidel, T. Rappaport**, *Path Loss Prediction in Multifloored Buildings at 914 MHz*, Electronic Letters, Vol. 27, Nr. 15, S. 1384-1387, (1991).
- [SHA 89] **P.A. Sharples, M.J. Mehler**, *Cascaded Cylinder Model for Predicting Terrain Diffraction Loss at Microwave Frequencies*, IEE Proceedings-H, vol. 136, S. 331-337, (1989).
- [SHA 93] **P.A. Sharples, M.J. Mehler**, *Propagation Modelling in Microcellular Environments*, Proc. 8th Int. Conf. on Antennas and Propagation, S. 68-71, (1993).

- [SICTA 01] **SICTA**, *Ermittlung der Immissionen und Überprüfung der NISV-Grenzwerte bei Mobilfunknetzen*, Vorschlag der 4 Mobilfunkbetreiber zum BUWAL-Entwurf vom 20. März 2001, Schweiz, Bern, (2001).
- [SOB 97] **T. Schöberl**, *Polarimetrische Modellierung der elektromagnetischen Wellenausbreitung in pikozellularen Funknetzen*, Dissertation RWTH Aachen, Shaker Verlag Aachen, (1997).
- [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).
- [TAN 96] **S.Y. Tan, H.S. Tan**, *A Microcellular Communications Propagation Model Based on the Uniform Theory of Diffraction and Multiple Image Theory*, IEEE Trans. Ant. Prop., vol. 44, S. 1317-1326, (1996).
- [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 93] **G.A.J. Van Dooren, C.J. Haslett und M.F. Levy**, *Diffraction by a Rectangular Building: Comparison of Three Field-Strength Prediction Techniques*, Electronics Letters, vol. 29, S. 1334-1335, (1993).
- [VAN 93a] **G.A.J. Van Dooren, M.H.A.J. Herben**, *Field Strength Prediction Behind Lossy Dielectric Obstacles by Using the UTD*, Electronics Letters, vol. 29, S. 1016-1018, (1993).
- [VAN 93b] **G.A.J. Van Dooren, M.H.A.J. Herben**, *Polarization-Dependent Site-Shielding Factor of a Block-Shaped Obstacle*, Electronics Letters, vol. 29, S. 15-16, (1993).
- [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).
- [VOG 82] **L.E. Vogler**, *An Attenuation Function for Multiple Knife-Edge Diffraction*, Radio Science, vol. 17, S. 1541-1546, (1982).
- [WAG 94] **J.-F. Wagen, K. Rizk**, *Ray Tracing Based Prediction of Impulse Responses in Urban Microcells*, Proc. IEEE 44th Veh. Technol. Conf., S. 210-214, (1994).
- [WAL 88] **J. Walfisch, H. Bertoni**, *A Theoretical Model of UHF Propagation in Urban Environments*, IEEE Trans. Ant. Prop., vol. 36, S. 1788-1796, (1988).
- [WEI 00] **P. Weiß, B. Gutheil, D. Gust und P. Leiß**, *EMVU-Messtechnik*, Vieweg-Verlag, Braunschweig/Wiesbaden, (2000).
- [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).

- [WUSCH 02] **M. Wuschek**, *Feldstärkemessungen in der Umgebung von GSM-Mobilfunkbasisstationen*, EMV 2002 10. Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit, VDE-Verlag Berlin, Offenbach, S. 683-692, (2002).
- [YEK 91] **P. Yekani, C. McGillem**, *A Statistical Model for the Factory Radio Channel*, IEEE Trans. Communications, Vol. 39, Nr. 10, S. 1445-1453, (1991).

Abkürzungsverzeichnis

BAKOM	Bundesamt für Kommunikation (Schweiz)
BAPT	Bundesamt für Post und Telekommunikation
BImSchV	Bundes-Immissionsschutzverordnung
BCCH	Broadcast Control Channel (engl.) → Sende-Kontrollkanal
BEM	Boundary Element Method (engl.) → Randintegralmethode
BS	Basisstation
BUWAL	Bundesamt für Umwelt, Wald und Landwirtschaft (Schweiz)
CENELEC	Comité Européen de Normalisation Electrotechnique (frz.) → Europäisches Komitee für elektrotechnische Normung
CDMA	Code Division Multiple Access (engl.) → Codemultiplex
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
DTX	Discontinuous Transmission (engl.) → Sprachtaustattung in Sprechpausen
EIRP	Equivalent Isotropically Radiated Power (engl.) → Äquivalente isotrope Strahlungsleistung
FDM	Finite Differenzen Methode
FDTD	Finite Difference Time Domain (eng.) → Finite Differenzen im Zeitbereich
FEM	Finite Elemente Methode
GO	Geometrical Optics (eng.) → Geometrische Optik
GSM	Global System for Mobile Communications (eng.) → Globales System für Mobilkommunikation
GTD	Geometrical Theory of Diffraction (eng.) → Geometrische Beugungstheorie
IEM	Integral Equations Method (eng.) → Integralgleichungsmethode
ITU	International Telecommunications Union (eng.) → Internationale Fernmeldeunion
LOS	Line of Sight (eng.) → Sichtverbindung
MEC	Method of Equivalent Currents (eng.) → Methode der äquivalenten Ströme

METAS	Bundesamt für Metrologie und Akkreditierung (Schweiz)
MoM	Method of Moments (eng.) → Momentenmethode
MS	Mobilstation
NLOS	Non Line of Sight (eng.) → keine Sichtverbindung
PO	Physical Optics (eng.) → Physikalische Optik
PTD	Physical Theory of Diffraction (eng.) → Physikalische Beugungstheorie
RBW	Resolution bandwidth (engl.) → Auflösungsbandbreite
RegTP	Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post
Span	Frequenzbereich bei frequenzselektiven Messgeräten = Endfrequenz – Anfangsfrequenz
TCH	Traffic Channel (engl.) → Gesprächs- bzw. Nutzkanal
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System (eng) → 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
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

**Entwicklung von Mess- und
Berechnungsverfahren zur Ermittlung
der Exposition der Bevölkerung durch
elektromagnetische Felder in der
Umgebung von Mobilfunk Basisstationen**

**Zwischenbericht
„Analyse der Immissionsverteilung“**

Kurzfassung

Vorliegender Zwischenbericht bezieht sich auf das Arbeitspaket 2 des Forschungsvorhabens „Entwicklung von Mess- und Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Exposition der Bevölkerung durch elektromagnetische Felder in der Umgebung von Mobilfunk Basisstationen“ des Bundesamtes für Strahlenschutz. Im Sinne einer *Analyse* wird exemplarisch die Immissionsverteilung an einer Vielzahl von unterschiedlichen, für die verschiedenen Mobilfunknetze typischen Basisstationen untersucht, um daraus *typische* Feldverteilungen abzuleiten. Insbesondere wird dabei unterschieden, wie sich die Immission *zeitlich* sowie *großräumig* und *kleinskalig örtlich* verteilt. Die aus den Untersuchungen abgeleiteten Erkenntnisse liefern wichtige Anhaltspunkte hinsichtlich der im dritten Arbeitspaket zu entwickelnden Mess- und Berechnungsverfahren zur Ermittlung der maximalen realen Exposition durch Mobilfunk Basisstationen, die relevant bezüglich einer Grenzwertkontrolle ist.

Bezüglich der *großräumigen örtlichen Verteilung* der Immissionen wurden eigene Messungen durchgeführt sowie Ergebnisse anderer auf diesem Gebiet tätiger Institutionen in die Untersuchungen einbezogen, sofern sie bestimmte Qualitätsanforderungen bezüglich Messdurchführung und Messauswertung erfüllen. Damit wird eine bestmögliche Vergleichbarkeit der Messergebnisse gesichert. Für die eigenen Messungen wurden die untersuchten Standorte nicht wahllos ausgesucht, sondern danach, eine möglichst breite Vielfalt unterschiedlicher Basisstationstypen und Expositionsszenarien zu erfassen.

Als Ergebnis wurde festgestellt, dass die Immissionen an unterschiedlichen Messpunkten im direkten Umfeld von Mobilfunk-Basisstationen einer großen Streubreite unterliegen. Der niedrigste in verschiedenen Messreihen ermittelte Immissionswert betrug $0,00000004 \text{ W/m}^2$, der höchste $0,28 \text{ W/m}^2$. Nicht nur die Messreihen verschiedener Institutionen untereinander, sondern auch diverse Messreihen, die die Verfasser mit ein und demselben Messverfahren durchgeführt haben, differieren bezüglich der gefundenen Maximal- und Mittelwerte der Immission sehr stark. Dies ist primär auf die unterschiedlichen Intentionen von Messungen zurückzuführen: Messungen an typischen, im Umfeld von Basisstationen auftretenden Szenarien mit besonderer Berücksichtigung von sogenannten „sensiblen Orten“ ergeben meist geringere Immissionsmesswerte als Messreihen, bei denen die spezielle Suche nach Extremwerten für die Immission im Vordergrund steht.

Auch innerhalb ein und derselben Messreihe ist die Schwankungsbreite der Immissionsmessergebnisse sehr hoch. Dies ist Veranlassung, eingehend die Einflussfaktoren zu studieren, die die Immission im Umfeld von Basisstationen bestimmen.

Folgende Einflussfaktoren, getrennt nach anlagenbezogenen und immissionsortbezogenen Faktoren, spielen eine entscheidende Rolle:

Einflussfaktoren seitens der Mobilfunkanlage:

- insgesamt Sendeleistung der Anlage (Anzahl der Netzbetreiber, Anzahl der Kanäle, Sendeleistung pro Kanal, Verkehrsaufkommen),
- Höhe der Sendeanlage über Grund,
- verwendete Antennentypen,

- Downtilt der Antennen,
- horizontale Ausrichtung der Antennen.

Einflussfaktoren seitens des Immissionsortes:

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

Eine eingehende Untersuchung dieser Faktoren zeigt, dass ihr Zusammenwirken sehr komplex ist. Eine isolierte Betrachtung einzelner Einflussfaktoren führt in der Regel zu nicht generell gültigen Verpauschalisierungen.

So spielt zum Beispiel der Faktor Entfernung (d.h. radialer oder lateraler Abstand) von der Basisstation im hier untersuchten Entfernungsbereich vom Sicherheitsabstand bis ca. 200 m nicht die entscheidende Rolle, da ein Durchlaufen der Nebenzipfel der Antenne zu einer örtlich stark schwankenden, aber nicht gleichmäßig abnehmenden Immission führt. Auch die insgesamt Sendeleistung eines Standortes, z.B. repräsentiert durch die Anzahl der Netzbetreiber bei Mehrfachnutzung und durch die Anzahl der Kanäle pro Betreiber, spielt sicherlich eine Rolle, jedoch nicht die dominierende. Nach Auswertung der vorliegenden Messergebnisse hat sich ergeben, dass die *höhenmäßige Ausrichtung* des Immissionsortes zur Anlage, d.h. seine Ausrichtung zu Hauptstrahlrichtung, die *entscheidende* Rolle spielt: Die Immission eines entfernteren Ortes in Hauptstrahlrichtung einer mit wenigen Sendekanälen ausgerüsteten Ein-Betreiber-Anlage ist in der Regel wesentlich höher als die Immission an einem höher gelegenen, nicht direkt in Hauptstrahlrichtung liegenden Ort eines mehrfachgenutzten Standortes z.B. im Innenstadtzentrum.

Auch andere „klassische“ Regeln für die Immission im Umfeld der Anlagen lassen sich nicht verpauschalisieren; sie gelten zwar oft, aber nicht immer:

- Die Immissionen im Gebäude, auf dem eine Anlage steht, sind zwar oft, aber nicht stets kleiner als an umliegenden Messpunkten. Vor allem die im obersten Geschoss liegenden Messpunkte können wesentliche Immissionen durch umliegende Stationen erfahren; außerdem kann in Abhängigkeit von Sendeleistung und Antennenbauform auch die Dachanlage relevante Beiträge liefern.
- An Außenmesspunkten, auch mit direkter Sicht zur Anlage, ist die Immission oft, aber nicht pauschal höher als an Messpunkten innerhalb von Gebäuden, vor allem dann, wenn die Gebäude „günstiger“ zur Mobilfunkanlage ausgerichtet sind.
- Die Immission im selben sowie in einem der Anlage gegenüberstehenden Gebäude nimmt oft, aber nicht immer mit abnehmender Geschosshöhe ab. Reflexionen an umliegenden Gebäuden sowie Nebenzipfel der Sendeantennen können hier von der klassischen Vorstellung abweichende Verläufe hervorrufen.
- Die gesamte hochfrequente Immission in mobilfunkanlagen nahen Orten wird nicht pauschal von Rundfunk- oder Fernsehsendern dominiert, auch wenn diese üblicherweise eine sehr viel größere Sendeleistung aufweisen. Gerade im innerstädtischen Bereich wird

die Gesamtimmission im direkten Umfeld von Mobilfunkanlagen von diesen dominiert; in ländlichen Bereichen ist das Verhältnis stellenweise umgekehrt.

So lässt sich auch kein signifikanter Unterschied der maximalen Immission an Innen- und Außenmesspunkten bzw. Messpunkten im städtischen und ländlichen Bereich finden. Für die Suche nach Extremalwerten in Bezug auf die Überprüfung von Grenzwerten steht in erster Linie die Suche nach (allgemein zugänglichen) Orten, die sich höhenmäßig sowie auch horizontal in Hauptstrahlrichtung zur Sendeantenne befinden, im Vordergrund. Bei dieser Suche ist auch der Downtilt der Antenne zu berücksichtigen, der vor allem im innerstädtischen Bereich signifikant größer sein kann.

Auch innerhalb eines räumlich eng begrenzten Volumens existieren in der Regel Immissionsverteilungen, die *kleinskalig schwanken*. Dieser als „Fast Fading“ bezeichnete Effekt tritt dann auf, wenn die Funkwellen von der Basisstation zum Empfängerort aufgrund von Reflexionen über mehrere Ausbreitungspfade gelangen und die einzelnen Teilwellen dabei interferieren. In Abhängigkeit vom Ort treten dabei unterschiedliche Gangunterschiede der Teilwellen auf, so dass die daraus resultierende konstruktive oder destruktive Überlagerung zu örtlich kleinskaligen Schwankungen im Zentimeterbereich führen kann.

Die Häufigkeit der Schwankungen ist besonders groß in derjenigen Richtung, in der ein Hindernis (z.B. eine Wand oder der Boden) senkrecht von der Funkwelle getroffen wird. Die Schwankungsamplitude kann dabei mehr als 20 dB (Faktor 100 bezüglich der Leistungsflussdichte) betragen.

Numerisch wurden einige Basisszenarien untersucht, um ein Verständnis über die Größenordnung und die dem Fading zugrunde liegenden Wirkungsmechanismen zu erlangen. In der Realität führt vor allem das Vorhandensein von multiplen Reflexionsstellen, z.B. im innerstädtischen Bereich ohne direkte Sicht zur Sendeantenne (d.h. ohne dominanten Ausbreitungspfad) zu deutlichen Verkomplizierungen der Interferenzbilder. Allerdings ist hier auch zu beachten, dass bei Anlagen mit mehreren Mobilfunksystemen (GSM 900, GSM 1800, UMTS) eine Abschwächung der Schwankungsamplitude zu erwarten ist, da sich die Interferenzbilder der einzelnen Frequenzen überlagern und somit Extremalwerte, z.B. tiefe Einbrüche, abgemildert werden können. Eine messtechnische Überprüfung anhand eines Scanner-systems bestätigt die rechen-technisch abgeleiteten Ergebnisse bezüglich Schwankungsintensität und Schwankungshäufigkeit.

Eine veränderte Position von Mobiliar in Innenräumen sowie eine Anwesenheit von Personen führt zu einem deutlich veränderten Feldbild nicht nur in unmittelbarer Umgebung dieser „Störstellen“.

Als praktische Konsequenz der kleinskaligen räumlichen Schwankung lässt sich ableiten, dass mit einer punktwisen Ermittlung die Immission sehr stark unterschätzt werden kann. Ist die Ermittlung von *Extremalwerten* (in der Regel das Maximum) der Immission an einem Ort das Ziel, dann ist eine geeignete Messmethodik anzuwenden, die einen größeren Raumbereich abtastet und aus dem Interferenzbild das Maximum protokolliert. Hierbei ist zu beachten, dass Interferenzen nicht nur in Innenräumen auftreten.

Die Ermittlung einer „über den Körper gemittelten Immission“ hingegen führt zu einer deutlichen Verkomplizierung der Messung. Unabhängig von Praktikabilitätsbetrachtungen ist es den hieran arbeitenden Forschergruppen bislang noch nicht gelungen, eine geeignete „Mittelungsgeometrie“ zu finden, die die tatsächliche körpermittelte Immission adäquat und mit kleinstmöglichem Fehler beschreibt. Es hat sich vielmehr herausgestellt, dass unterschiedliche Mittelungsgeometrien einen größeren Einfluss auf das Ergebnis haben als unterschiedliche Expositionsszenarien. Außerdem steht zu vermuten, dass unter Umständen für jedes Expositionsszenario eine separate Mittelungsgeometrie die besten Ergebnisse erbringen wird, was eine subjektive Komponente in die Messungen bringt und der Normierungsidee zuwider läuft. Unabhängig davon, dass sich diesbezügliche Untersuchungen noch im Anfangsstadium befinden, und der Fragestellung, ob solch eine Volumenmittelung überhaupt durch die jeweilige nationale Personenschutznorm gedeckt wird, muss deswegen an dieser Stelle kritisch überprüft werden, ob die *Maximalwertermittlung* nicht ohnehin der einfachere und sichere Weg einer mess- und berechnungstechnischen Expositionsermittlung ist.

Die Mobilfunkimmissionen an einem festen Messpunkt unterliegen neben den örtlichen Schwankungen auch *großskaligen und kleinskaligen zeitlichen* Schwankungen. Die Ursachen hierfür können in anlagenbezogene und ausbreitungswegbezogene Ursachen untergliedert werden.

Anlagenbezogene zeitliche Immissionsschwankungen treten vorrangig bei Anlagen mit mehreren Sendekanälen pro Sektor auf. Ursache hierfür ist die Leistungsregelung, die dafür sorgt, dass ab dem zweiten Kanal

- nur dann gesendet wird, wenn Gespräche zu übertragen sind,
- in Gesprächspausen das Sendesignal ausgetastet wird (sofern DTX = Discontinuous Transmission aktiviert),
- nur in denjenigen Zeitschlitz gesendet wird, in denen ein Gespräch läuft, und
- die Sendeleistung von Zeitschlitz zu Zeitschlitz unterschiedlich sein kann entsprechend der Verbindungsqualität zwischen Handy und Basisstation (intelligente Leistungsregelung).

Dies führt zu einer großskaligen Schwankung im Tagesverlauf, d.h. in Zeiten niedriger Auslastung (nachts) ist die Immission vergleichsweise niedrig und auf die Immission der BCCH Kanäle beschränkt, wohingegen vor allem am Nachmittag Auslastungsspitzen auftreten. Auch im Wochenverlauf sind großskalige Schwankungen zu beobachten; am Samstag und Sonntag (und Feiertagen) sind die nachmittäglichen Spitzenwerte kleiner als an Arbeitstagen.

Über dieser großskaligen Schwankung liegt aber noch eine kleinskalige Variation, die durch die augenblickliche Netzauslastung, die verbindungsqualitätsabhängige Leistungsregelung und durch DTX bestimmt wird.

Dies führt dazu, dass vor allem in der Nähe von mehrkanaligen Anlagen eine *Augenblicksmessung* die „worst case“ Immissionssituation bei maximal möglicher Anlagenauslastung nur unzureichend beschreibt bzw. unterbewertet. Als Konsequenz hierfür sind während der

Messung und in der Auswertung Techniken einzusetzen, die es ermöglichen, die gemessenen Augenblickswerte auf die maximal mögliche Anlagenauslastung zu extrapolieren. Dies ist bei GSM unter Verwendung von frequenzselektiven Messgeräten und mit der Mitarbeit der Netzbetreiber möglich; bei UMTS existieren erste vielversprechende Ansätze.

Bei einkanaligen Anlagen hingegen ist die Immission allein durch den nach Erfahrung der Verfasser sehr konstanten BCCH bestimmt. Ausnahmen bilden lediglich Anlagenveränderungen durch die Netzbetreiber im Rahmen von Netzoptimierungen; diese können aber im Rahmen der Messung vom Betreiber erfragt und entsprechend berücksichtigt werden.

Anlagenseitig können auch zukünftig eingesetzte dynamische Veränderungen des Downtiltwinkels sowie der Einsatz von adaptiven Antennen zu einer zeitlich stark wechselnden Immissionssituation führen. Es existieren zur Zeit noch keine Erfassungsmethoden, die die dadurch verursachten Immissionsschwankungen geeignet berücksichtigen. Hierzu ist in den nächsten Jahren Forschungsbedarf absehbar.

Ausbreitungswegbezogene zeitliche Immissionsschwankungen werden von sich verändernden Eigenschaften des Ausbreitungsweges verursacht. Hier sind vor allem dann große Schwankungen zu erwarten, wenn die Energie von der Basisstation zum Immissionsort nicht nur über einen dominierenden Pfad, sondern über mehrere gleichberechtigte Ausbreitungspfade gelangt. Verändern sich Reflexions- oder Transmissionsstellen zeitlich (sich bewegende Personen oder Gegenstände, auch Witterungseinflüsse wie windbewegte Bäume oder Wechsel der Reflexionseigenschaften einer Straße bei Regen), dann verändern sich die Intensitäten und Phasenlagen der einzelnen Teilwellen. Es handelt sich hierbei prinzipiell um eine zeitliche Veränderung des schon bei den kleinskaligen örtlichen Schwankungen untersuchten Interferenzbildes (Fast Fading). Deswegen ist hier zur exakten Berücksichtigung dieser Effekte im Sinne einer Extremalwertsuche das dort empfohlene Verfahren, d.h. die volumenbezogene Maximalwertsuche, unter Verwendung einer zeitlichen Maxhold Funktion des Messwertaufnahmegerätes, einzusetzen.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	3
1 Einleitung.....	10
1.1 Zielsetzung des Forschungsvorhabens.....	10
1.2 Hintergrund des Forschungsvorhabens	10
1.3 Einordnung des vorliegenden Zwischenberichtes	11
2 Großskalige räumliche Verteilung der Immission	12
2.1 Ergebnisse von Messreihen.....	13
2.1.0 Grundlegende Anforderungen an die berücksichtigten Messreihen	13
2.1.1 Messreihe IMST 1.....	14
2.1.2 Messreihe IMST 2.....	18
2.1.3 Messreihe IMST 3.....	20
2.1.4 Messreihe Nürnberg.....	21
2.1.5 Messreihe TÜV	23
2.1.6 Messreihe Baden-Württemberg.....	25
2.1.7 Auswertung der Messreihen.....	27
2.2 Einflussfaktoren für die Größe der Immission.....	28
2.2.1 Abstand zur Mobilfunkanlage.....	28
2.2.2 Höhenunterschied zur Mobilfunkanlage.....	34
2.2.3 Sendeleistung der Mobilfunkanlage	41
2.2.4 Downtilt der Sendeantenne	46
2.2.5 Typ der Sendeantenne	48
2.2.6 Horizontale Ausrichtung.....	50
2.2.7 Dämpfung durch Gebäude und andere Sichthindernisse.....	51
2.2.7.1 Verteilung der Immissionen über der Geschosshöhe	52
2.2.7.2 Innen- und Außenmesspunkte, Leuchtturmeffekt	54
2.2.7.3 Dämpfung durch Sichthindernisse.....	57
2.2.8 Beiträge von benachbarten Mobilfunkanlagen.....	60
2.2.9 Sonstiges.....	61
2.2.9.1 Vergleich der Immissionen in städtischen und außerstädtischen Bereichen.....	62
2.2.9.2 Vergleich der Immissionen durch Mobilfunkanlagen zu anderen HF Immissionen.....	65
2.3 Zusammenfassung	67
3 Kleinskalige räumliche Verteilung der Immission	69

3.1	Typische kleinskalige Feldverteilungen.....	69
3.2	Erfassung einer über den Körper „gemittelten“ Immission	79
3.3	Zusammenfassung	82
4	Zeitliche Verteilung der Immission.....	84
4.1	Zeitliche Schwankungen seitens der Basisstation.....	84
4.1.1	<i>Einkanalige Basisstationen.....</i>	84
4.1.2	<i>Mehrkanalige Basisstationen.....</i>	87
4.2	Zeitliche Schwankungen seitens des Ausbreitungsweges.....	90
4.3	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	93
4.4	Diskussion der Erfassung einer „aktuell vorliegenden“ Immission	95
	Literaturverzeichnis.....	97
	Abkürzungsverzeichnis.....	100
	Verzeichnis häufig verwendeter Symbole.....	101
	Anhang	A1

1 Einleitung

1.1 Zielsetzung des Forschungsvorhabens

Der vorliegende Zwischenbericht ist Bestandteil des Forschungsvorhabens „Entwicklung von Mess- und Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Exposition der Bevölkerung durch elektromagnetische Felder in der Umgebung von Funksendeanlagen“ des Bundesamtes für Strahlenschutz.

Der flächendeckende Ausbau der Mobiltelefonnetze, der Aufbau der modernen breitbandigen Multimedianeetze (UMTS) sowie der Aufbau des terrestrischen digitalen Rundfunks führen zu einer Erhöhung der Feldexposition der Bevölkerung insgesamt. Nicht zuletzt hervorgerufen durch die neue UMTS Technologie und den damit verbundenen Bedarf an etwa 40.000 neuen Basisstationen allein in Deutschland [SCHÜ 01] stehen derzeit vor allem die *Mobilfunk Basisstationen* der GSM und UMTS Netze im Zentrum der öffentlichen Diskussion. Deswegen werden andere HF Emittenten, wie z.B. Rundfunk- oder Fernsehsender, von einer weiteren Betrachtung in dieser Studie ausgeklammert. Weiterhin unberücksichtigt bleiben die Immissionen durch die Mobilfunk Endgeräte, d.h. die Handys für GSM oder UMTS.

Für den Strahlenschutz ist es dabei dringlicher denn je, *verlässliche* Daten über die tatsächlich vorliegende elektromagnetische Immission im Umfeld der Mobilfunk Basisstationen zu erhalten. Hierzu sind neben modellmäßigen Berechnungen vor allem Messungen erforderlich. Ziel des Vorhabens ist es deshalb, Mess- und Berechnungsverfahren zu entwickeln, die geeignet sind, die Exposition von Personen im Umfeld von Mobilfunk Basisstationen zu ermitteln.

1.2 Hintergrund des Forschungsvorhabens

Die tatsächlich vorliegende Exposition der Bevölkerung im Umfeld von Mobilfunk Sendeanlagen ist oftmals nicht bekannt. Die im Rahmen der immissionsschutzrechtlichen Prüfung zugrunde gelegte Standortbescheinigung macht hierzu keine Aussagen, sondern bestätigt anhand einer konservativen Abschätzung (worst case Ansatz) lediglich die Einhaltung der gesetzlichen Grenzwerte.

Bezüglich einer *Berechnung* der vorliegenden Immissionen 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 Grund sind Berechnungen in der Praxis meist ungenau. Es müssen je nach Anwendungsfall Vereinfachungen gemacht werden, die den tatsächlichen Immissionswert überschätzen (z.B. zur Sicherstellung der Einhaltung der Grenzwerte im Rahmen der Standortbescheinigung) oder unterschätzen (z.B. zur Sicherstellung der Mindestfeldstärke in einem bestimmten Bereich im Rahmen der Funknetzplanung).

Die Hochfrequenzmesstechnik ist prinzipiell ebenfalls gut entwickelt. Es stehen für den gesamten Frequenzbereich grundlegende Messverfahren zur Verfügung. Diese sind jedoch oftmals nur sehr allgemein einsetzbar und nicht für ein spezielles Anwendungsgebiet, wie

etwa für die Bestimmung von Immissionen durch Mobilfunk Basisstationen in Innenräumen, angepasst. Oftmals sind die Verfahren auch primär für Laboranwendungen (z.B. EMV- oder Antennenmesstechnik in künstlichen, reflexionsarmen Umgebungen) oder Anwendungen unter definierten Randbedingungen entwickelt und validiert worden. Speziell für den Mobilfunkbereich besteht großer Klärungsbedarf. Problematisch sind hier zum Beispiel die erheblichen zeitlichen und örtlichen Schwankungen der Feldverteilung, die ein geeignetes Messverfahren und eine spezielle Methodik hinsichtlich der Messdurchführung erfordern. Verlässliche, gut definierte und genormte Verfahren zur Erfassung der tatsächlichen Immissionen, denen die Bevölkerung durch Mobilfunk Basisstationen ausgesetzt ist, existieren derzeit im nationalen und internationalen Rahmen nur ansatzweise.

Unter dem Begriff *Umfeld der Mobilfunk Basisstation* soll in diesem Forschungsvorhaben der Bereich außerhalb des durch die Standortbescheinigung festgelegten Sicherheitsabstandes (in der Regel einige Meter in Hauptstrahlrichtung der Antenne, in andere Richtungen weniger) bis zu einer Entfernung von etwa 200 m von der Mobilfunk Basisstation entfernt verstanden werden. Der Bereich innerhalb des Sicherheitsabstandes wird ausgeklammert, da dieser bereits durch die Standortbescheinigung als jener Bereich klassifiziert worden ist, in dem mit einer Überschreitung der gesetzlichen Grenzwerte zu rechnen ist. In diesem Bereich ist ein Zutritt von Personen beschränkt bzw. ein Aufenthalt der Allgemeinheit nicht zulässig. Eine Überprüfung der Immissionen in diesem Bereich ist deswegen irrelevant. Der somit für das *Umfeld* gewählte Entfernungsbereich umfasst diejenigen Gebiete, in denen der Erfahrung nach das Interesse der Bevölkerung an der vorliegenden Immissionsituation am größten ist.

1.3 Einordnung des vorliegenden Zwischenberichtes

Der vorliegende Zwischenbericht bezieht sich auf das Arbeitspaket 2 des Forschungsvorhabens. Im Sinne einer *Analyse* wird exemplarisch die Immissionsverteilung an einer Vielzahl von unterschiedlichen, für die verschiedenen Mobilfunknetze typischen Basisstationen untersucht. Hierbei werden sowohl Basisstationen des GSM Mobilfunknetzes, als auch des im Aufbau befindlichen UMTS Netzes berücksichtigt. Der Schwerpunkt wird hierbei auf eine messtechnische Untersuchung gelegt. Ergänzt werden die Messungen durch exemplarische Berechnungen.

Die Analyse umfasst eine Charakterisierung der ortsbezogenen, d.h. an einem festen Ort vorliegenden Immission nach

- räumlichen Aspekten, d.h. bei verschiedenen Abständen, Orientierungen und Höhen zur Basisstation, sowie nach
- zeitlichen Aspekten, d.h. an einem festen Messpunkt über einen längeren Zeitraum von z.B. 24 Stunden.

Bei der Analyse der *räumlichen* Verteilung wird weiterhin unterschieden nach der

- *großskaligen* Verteilung, d.h. den Immissionswerten, die in einem größeren Volumen, wie z.B. einem Zimmer oder einem Spielplatz bei typischen Basisstationsszenarien für unterschiedliche Abstände, Höhenunterschiede, Anlagentypen, Umgebungsklassen im Umfeld der Anlagen vorliegen, sowie der

- *kleinskaligen* Verteilung, d.h. der detaillierten Immissionsverteilung innerhalb eines eng begrenzten Volumens. Hier soll in einem *kleinen* Raster (typischerweise einige Zentimeter) das Schwankungsverhalten in unterschiedlichen Umgebungen (z.B. im Innenraum, im Freien) untersucht werden. Diese Ergebnisse geben hinsichtlich eines geeigneten Messverfahrens Hinweise zur Notwendigkeit bzw. Technik einer Extremalwertsuche innerhalb des Messvolumens, die zur Grenzwertkontrolle benötigt werden.

Primär bei der großskaligen Verteilung erfolgt eine eingehende Analyse der Einflussfaktoren, die die Immission an einem festen Ort bestimmen. Insbesondere wird überprüft, ob sich Unterschiede der typischen Feldverteilungen

- zwischen innerstädtischen und außerstädtischen Gebieten, sowie
- zwischen Messpunkten im Freien und innerhalb von Gebäuden

finden und begründen lassen. Die aus den Untersuchungen abgeleiteten Erkenntnisse bezüglich der groß- und kleinskaligen räumlichen sowie der zeitlichen Verteilung liefern wichtige Anhaltspunkte hinsichtlich der Bestimmung der maximalen realen Exposition, die relevant bezüglich einer Grenzwertkontrolle ist.

Es wird darauf hingewiesen, dass als Messgrößen ausschließlich Feldstärken (elektrische Feldstärke E oder magnetische Feldstärke H) bzw. Leistungsflussdichten (S) zum Einsatz kommen. Hierbei handelt es sich um Ersatzwerte, da der Basiswert im Hochfrequenzbereich, die spezifische Absorptionsrate (SAR), messtechnisch nur sehr schwer erfassbar ist. Bei einem Vergleich der ersatzweise verwendeten Feldstärken oder Leistungsflussdichten mit den Grenzwerten ist zu berücksichtigen, dass in der Umrechnung des Basisgrenzwertes in die abgeleiteten Feldstärke- bzw. Leistungsflussdichtegrenzwerte bereits diverse Sicherheitsfaktoren enthalten sind.

2 Großskalige räumliche Verteilung der Immission

In diesem Abschnitt werden anhand unterschiedlicher Messreihen typische Messergebnisse für die Immission in der Umgebung von verschiedenen, für die existierenden Mobilfunknetze typischen Basisstationen vorgestellt. Ergänzt werden die Messwerte durch exemplarische Berechnungen.

Die Werte werden für eine Vielzahl von unterschiedlichen Immissionsszenarien präsentiert. Dabei erfolgt eine Variation der folgenden Parameter:

- Abstand des Immissionsortes zur Basisstation,
- Höhenunterschied zwischen Immissionsort und Basisstation,
- Basisstationstyp (Kanalzahl, Einfach- oder Mehrfachnutzung, Antennentyp, Downtilt, ...),
- Sichtbedingungen zwischen Immissionsort und Basisstation (freie Sicht oder Sichthindernisse),
- Umgebungsklasse (Großstadtzentrum, Stadt, Kleinstadt/Land),
- Lage des Messpunktes innerhalb von Gebäuden oder im Freien.

Bezüglich der Entfernung erfolgt eine Beschränkung auf das unmittelbare Umfeld der Station, d.h. ab Sicherheitsabstand bis etwa 200 m von der Station.

Die Messwerte geben Aufschluss über typisch auftretende Immissionswerte und dienen als Datenbasis für die anschließende Untersuchung der die Immission an einem festen Ort bestimmenden Einflussfaktoren.

2.1 Ergebnisse von Messreihen

2.1.0 Grundlegende Anforderungen an die berücksichtigten Messreihen

In den folgenden Abschnitten werden eigene Messungen sowie öffentlich verfügbare Messungen anderer auf diesem Gebiet tätiger Institutionen präsentiert. Laut Aufgabenbeschreibung für vorliegendes Forschungsprojekt waren insbesondere Erfahrungen und Ergebnisse der Monitoringprojekte einzelner Bundesländer sowie der RegTP einzubeziehen.

Vor allem in den eigenen Messreihen wurden die untersuchten Standorte nicht wahllos ausgesucht, sondern danach, eine möglichst breite Vielfalt unterschiedlicher Basisstationstypen und Expositionsszenarien zu erfassen.

Aufgrund der Tatsache, dass für Immissionsmessungen im Umfeld von Mobilfunkstationen noch kein allgemein verbindlicher Standard besteht, werden diese Messungen teilweise nach stark unterschiedlichen Mess- und Auswertemethoden durchgeführt. Damit die Messwerte wenigstens ansatzweise vergleichbar sind und in den nachfolgenden Untersuchungen Berücksichtigung finden können, müssen die Messungen wenigstens den folgenden prinzipiellen Anforderungen genügen:

1. Die Messungen müssen *frequenzselektiv* durchgeführt worden sein. Eine Separierung der von Mobilfunkstationen hervorgerufenen Immissionen von anderen Immissionen ist unabdingbar (zum Verfahren siehe Abschnitt 3.4.1 des Zwischenberichtes „Literaturstudie zu bestehenden Mess- und Berechnungsverfahren“ zu diesem Forschungsprojekt).
2. Es muss eine bestimmte Technik der *Maximalwertfindung* im Messvolumen angewendet worden sein. Messungen an nur einem oder wenigen Punkten innerhalb des Messvolumens erfüllen diese Anforderung nicht und werden deswegen ausgeklammert. Ebenso werden vorerst Messungen, die eine *Mittelung* der Messwerte über mehrere Messpunkte vornehmen, nicht berücksichtigt. Unter der Maximalwertfindung wird auch verstanden, dass die Immission polarisationsrichtig erfasst worden ist (z.B. durch isotrope Messung).
3. Die bei der Messung gewonnenen Momentanwerte müssen auf den Zustand bei maximaler Anlagenauslastung extrapoliert worden sein. Hierbei ist auch das Frequency Hopping zu berücksichtigen (siehe Abschnitt 3.4.6.2 des Zwischenberichtes „Literaturstudie zu bestehenden Mess- und Berechnungsverfahren“ zu diesem Forschungsprojekt).
4. Die Messpunkte sollen sich in unmittelbarer Nähe der Basisstation befinden.
5. Es sind Angaben über die Messunsicherheit der Messungen zu machen und insbesondere darüber, ob die Messunsicherheiten auf die Messergebnisse aufgeschlagen worden sind. In die Messunsicherheit gehen solche Größen wie Kalibrierungenauigkeiten der eingesetzten Messgeräte (Spektrumanalysator, Kabel, Antenne) und Unsicherheiten bezüglich Fehlanpassungen, aber auch Unsicherheiten bei der „Probennahme“ (d.h. begrenzte Reproduzierbarkeit bei Maximumsuche und Messanordnung) ein.

6. Die Messungen sind von erfahrenem Personal mit kalibrierten Messgeräten durchgeführt worden.

Die Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post (RegTP) hat in den Jahren 1992, 1996/1997 und 1999/2000 verschiedene Messreihen zur Erfassung der hochfrequenten Immission durchgeführt, die im Internet veröffentlicht sind. Diese können jedoch in die vorliegenden Untersuchungen nicht einbezogen werden, da aus den veröffentlichten Summenwerten (9 kHz bis 1 GHz bzw. 9 kHz bis 2,9 GHz) nicht der Anteil der Mobilfunkimmissionen separiert werden kann. Da, wie noch weiter unten gezeigt wird, das Verhältnis von Mobilfunkimmissionen zu anderen hochfrequenten Immissionen je nach Messpunktlage unterschiedlich sein kann, ist ein Zurückgreifen auf die RegTP Ergebnisse bei den hier durchgeführten Untersuchungen nicht sinnvoll. Außerdem sind bei den Messreihen der RegTP die Messpunkte nicht bewusst in der Nähe von Mobilfunk Basisstationen und insbesondere auch nicht innerhalb von Wohnungen ausgewählt worden.

2.1.1 Messreihe IMST 1

Die in der Messreihe *IMST 1* vorgestellten Daten beruhen auf eigenen Messungen. Die Messpunkte befanden sich mehrheitlich in direkter Nähe zu Basisstationen (BS). Innen- und Außenmesspunkte sind enthalten. Oftmals wurde innerhalb eines exponiert gelegenen Gebäudes diejenige Wohnung bzw. derjenige Raum gesucht, an dem die Immissionen maximal waren. Insofern stellen die Werte keine „durchschnittliche“ Immission dar, sondern schon einen „worst case“ Fall. Die Messunsicherheit betrug ca. 3 dB. Sie wurde *nicht* auf die Messergebnisse aufgeschlagen.

Messreihe	IMST 1
Lage der Messpunkte	in direkter Umgebung der BS, oftmals speziell Orte mit höchster Immission gewählt
Maximumsuche?	Ja, Schwenkmethode
Messunsicherheit (MU)	3 dB
Extrapolation auf max. Anlagenauslastung?	ja
MU auf Ergebnisse aufgeschlagen?	nein
Anzahl der Messpunkte	88
Maximaler Wert	0,14 W/m ²
Minimaler Wert	0,000014 W/m ²
Schwankungsbreite	Faktor 10.000 (Leistungsflussdichte)
Mittelwert	0,0065 W/m ²
Mittelwert ohne max/min Wert	0,0050 W/m ²

Tabelle 2.1.1 Administrative Daten und statistische Auswertung der Messreihe *IMST 1*

In Bild 2.1.1a sind die Ergebnisse der Messreihe *IMST 1* dargestellt. Die Intensität der Immission wird als elektrische Leistungsflussdichte S (linke Achse) bzw. elektrische Feldstärke E (rechte Achse) angegeben. Beide Größen sind synonym und lassen sich über den Freiraumwellenwiderstand ineinander umrechnen. Es ist zu beachten, dass die y-Achse (Intensität der Immission) eine logarithmische Teilung aufweist. Ein Kästchen entspricht hier 10 dB, d.h. einem Faktor 10 bezüglich der Leistungsflussdichte bzw. einem Faktor 3,2 bezüglich der elektrischen Feldstärke.

Auf der x-Achse sind die Messpunkte eingezeichnet. Die dafür benutzte Kennzeichnung beinhaltet ein Kürzel für den geografischen Messort sowie eine numerische Angabe für Messort und Messpunkt. So bezeichnet „AC1.1“ beispielsweise den 1. Messpunkt eines 1. Messortes in Aachen. Eine Aufschlüsselung der Messpunkte befindet sich im Anhang.

Pro Messpunkt sind zwei Balken eingezeichnet: Der grüne Balken bezeichnet die Immission durch die Hauptsendeanlage, d.h. der in unmittelbarer Nähe installierten Anlage, in deren Umfeld gemessen wurde. Der schwarze Balken fügt auch die Immissionen durch umliegende Mobilfunkanlagen hinzu, kennzeichnet also solchermaßen die Gesamtmission durch Mobilfunk.

Weiterhin sind in Bild 2.1.1a Grenzwertlinien eingezeichnet. Im oberen Bildteil sind als durchgezogene Linie die für Deutschland gesetzlich festgelegten Grenzwerte der 26. Bundes-Immissionsschutzverordnung (26. BImSchV) [26. BImSchV] eingetragen. Als Orientierung sind zusätzlich die sogenannten Schweizer Anlagengrenzwerte (AGW) für Orte mit empfindlicher Nutzung [NISV] gestrichelt aufgeführt.

Alle Messergebnisse liegen unterhalb der Grenzwerte der 26. BImSchV. Die Schweizer AGW werden an einigen wenigen Messpunkten fast erreicht und an einem Messpunkt überschritten. Dieser Messpunkt lag auf einem Hochhausdach in nur wenigen Metern Entfernung zu den auf dem Dach installierten Mobilfunkantennen. Es handelte sich um einen von mehreren Netzbetreibern gemeinsam benutzten Standort (Mehrfachnutzung). Der Höhenunterschied des Messpunktes zu den Antennen war minimal. Mit steigender Höhe (gemessen wurde hier etwa auf Kopfhöhe) nahmen die Immissionen noch zu.

Obwohl eine Angabe von statistischen Daten wie Maximal-, Minimal- und durchschnittlicher Wert aufgrund der stark subjektiven Messpunktwahl und der nicht vergleichbaren Messpunkte (vergleiche die anderen Messreihen) diskussionswürdig ist, sind diese Daten trotzdem in Tabelle 2.1.1 aufgeführt. Die Daten beziehen sich auf die insgesamt durch Mobilfunk erzeugten Immissionen (Mobilfunk gesamt).

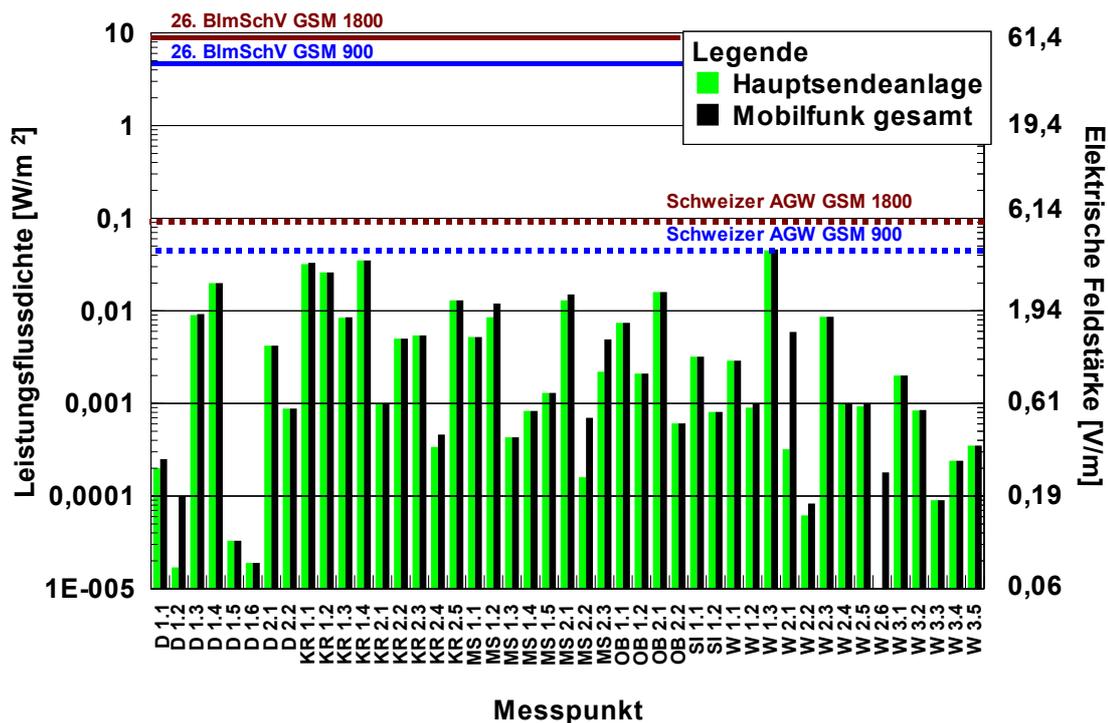
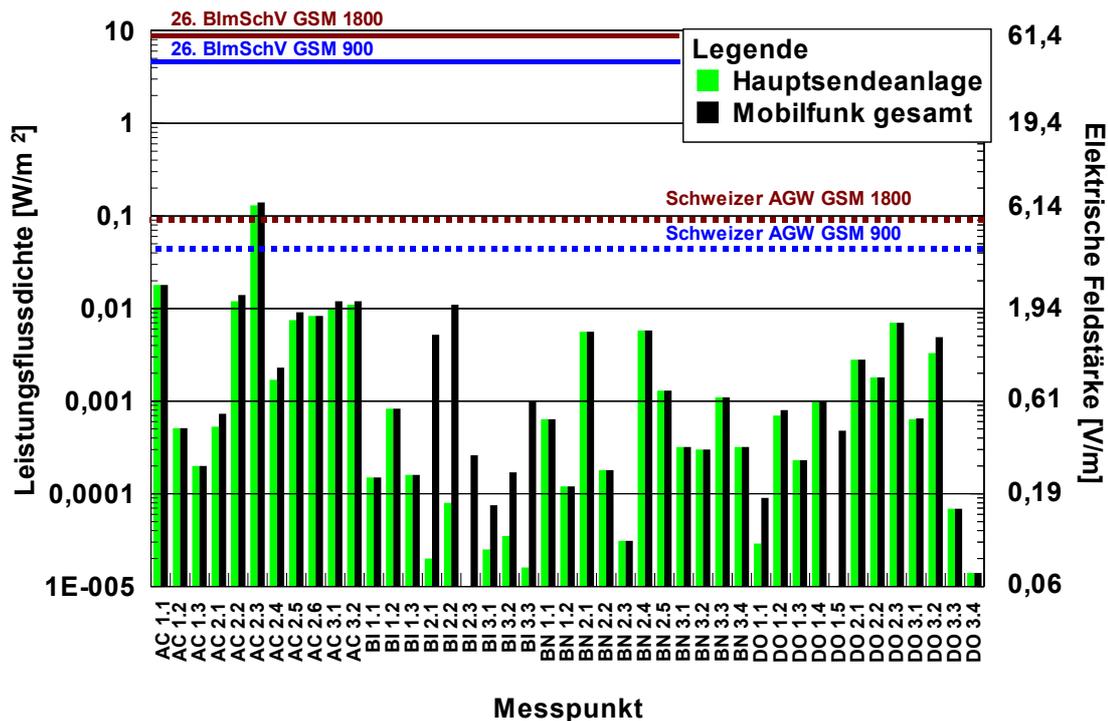


Bild 2.1.1a Messergebnisse der Messreihe IMST 1

In der Darstellung der Ergebnissen der Messreihe IMST 1 sowie der nachfolgenden Messreihen steht die absolute *Größe* und die *Verteilung* der Immissionen im Vordergrund. Die Grenzwerte sind hier nur zur Orientierung eingezeichnet. Wie aus Bild 2.1.1a ersichtlich, existieren für GSM 900 und GSM 1800 unterschiedliche Grenzwerte. Aus Bild 2.1.1a kann man nicht den genauen Abstand des Messwertes zu den Grenzwerten ablesen, da nicht ersichtlich sind, wie sich die Gesamtimmisionen aus den Immissionen bei GSM 900 und GSM 1800 zusammensetzt. Hierfür ist mit Bild 2.1.1b eine Ergebnisdarstellung gewählt, die diese Unterscheidung exemplarisch trifft. Hierin sind alljene Messpunkte aufgenommen, bei denen als Hauptsendeanlage sowohl GSM 900, als auch GSM 1800 Systeme vertreten waren. Berücksichtigt sind nur die Immissionsanteile der Hauptsendeanlagen. Aus einer solchen exemplarischen Darstellung kann das anteilmäßige Verhältnis von GSM 900 und GSM 1800 zur Gesamtimmision an einem Messpunkt beurteilt werden.

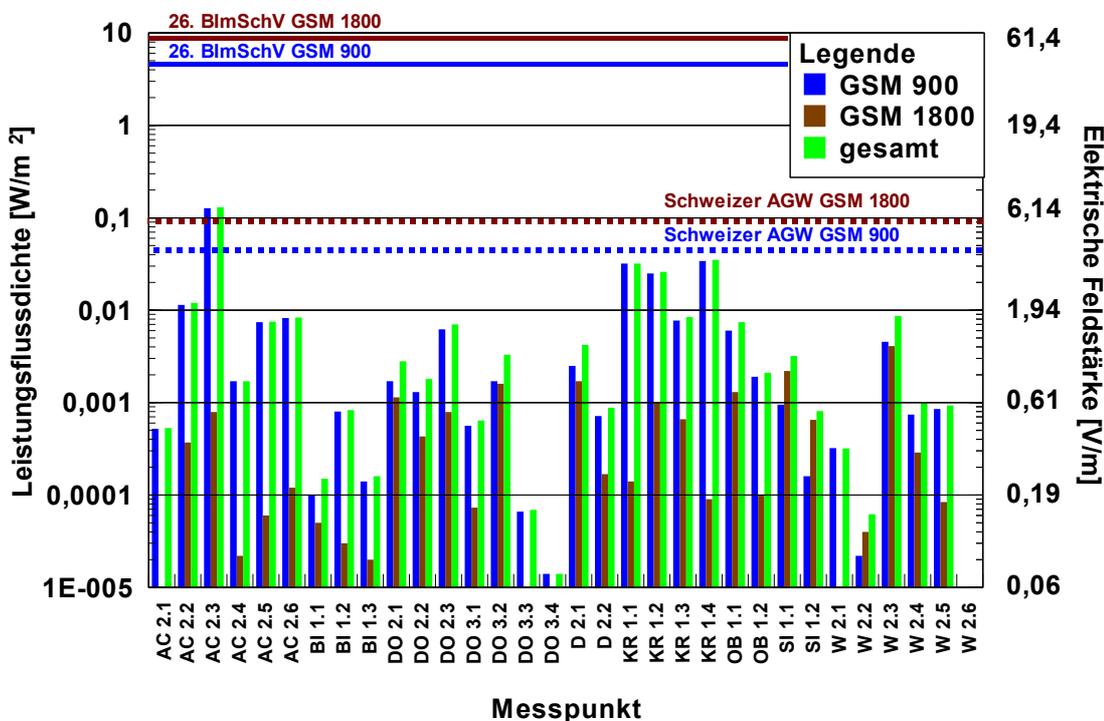


Bild 2.1.1b Messergebnisse der Messreihe *IMST 1* für diejenigen Messpunkte, bei denen als Hauptsendeanlage GSM 900 und GSM 1800 vertreten war, aufgegliedert nach den Anteilen der Systeme (nur Hauptsendeanlage)

2.1.2 Messreihe IMST 2

Auch die in der Messreihe *IMST 2* vorgestellten Daten beruhen auf eigenen Messungen. Die Messpunkte befanden sich mehrheitlich in direkter Nähe zu Basisstationen (BS). Innen- und Außenmesspunkte sind in den Messungen enthalten. Bei den Messungen wurden die Messpunkte oftmals hinsichtlich einer zu erwartenden vergleichsweise hohen Immission ausgewählt. Allerdings waren auch einige Messpunkte an sogenannten „sensiblen Orten“ vorgegeben, wo erfahrungsgemäß die Immission nicht maximal ist.

Die Messunsicherheit betrug ca. 3 dB. Sie wurde *nicht* auf die Messergebnisse aufgeschlagen.

Messreihe	IMST 2
Lage der Messpunkte	repräsentative Orte in direkter Umgebung der BS, oftmals besonders hoch exponierte Punkte, aber teilweise auch „sensible Orte“
Maximumsuche?	Ja, Schwenkmethode
Messunsicherheit (MU)	3 dB
Extrapolation auf max. Anlagenauslastung?	ja
MU auf Ergebnisse aufgeschlagen?	nein
Anzahl der Messpunkte	52
Maximaler Wert	0,04 W/m ²
Minimaler Wert	0,0000016 W/m ²
Schwankungsbreite	Faktor 25.000 (Leistungsflussdichte)
Mittelwert	0,0052 W/m ²
Mittelwert ohne max/min Wert	0,0046 W/m ²

Tabelle 2.1.2 Administrative Daten und statistische Auswertung der Messreihe *IMST 2*

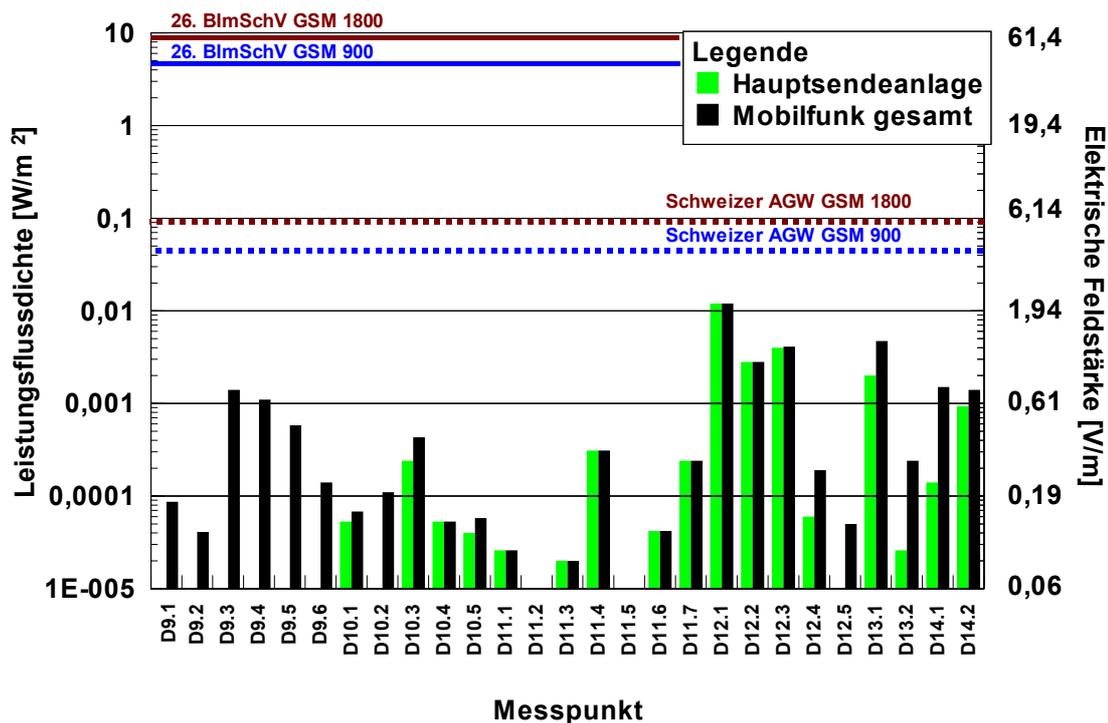
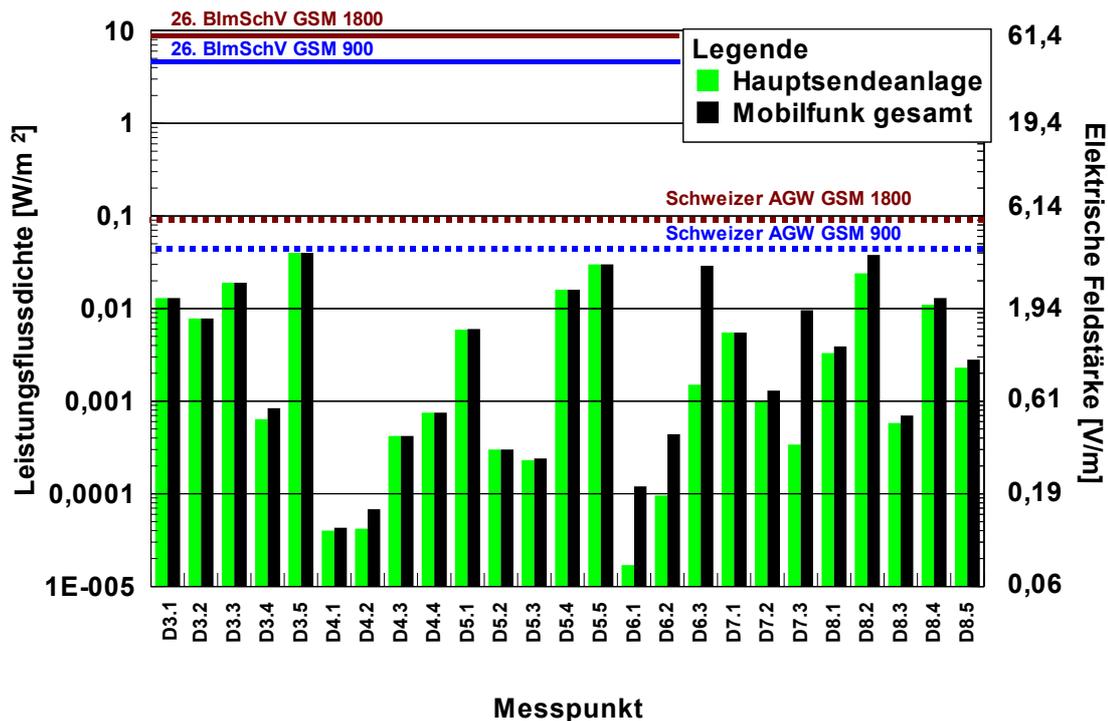


Bild 2.1.2 Messergebnisse der Messreihe IMST 2

2.1.3 Messreihe IMST 3

Auch die in der Messreihe *IMST 3* vorgestellten Daten beruhen auf eigenen Messungen. Die Messpunkte befanden sich mehrheitlich in direkter Nähe zu Basisstationen (BS). Innen- und Außenmesspunkte sind in den Messungen enthalten. Die Messpunkte wurden mehrheitlich *nicht* nach dem Gesichtspunkt maximal zu erwartender Immissionen ausgewählt (Ausnahme V14.1). Vielmehr standen hier Anfragen besorgter Bürger im Vordergrund, die in direkter Nähe zu einer Basisstation wohnen und an ihrer persönlichen Immissionsituation interessiert waren. Insofern ist die Messreihe *IMST 3* repräsentativ für die Immissionsverteilung im Umfeld der Basisstationen *ohne* spezielle Suche nach Orten mit maximaler Immission.

Die Messunsicherheit betrug ca. 3 dB. Sie wurde *nicht* auf die Messergebnisse aufgeschlagen.

In Bild 2.1.3 sind die gemessenen Immissionen dargestellt. Bei den Messungen wurden alle relevanten Immissionen auch umliegender Mobilfunkanlagen erfasst, wohingegen der Anteil der Hauptsendeanlage nicht getrennt ausgewiesen wurde. Somit sind die Immissionen hier (und auch in den nachfolgenden Messreihen) als *schwarze* Balken gekennzeichnet.

Messreihe	IMST 3
Lage der Messpunkte	repräsentative Orte in direkter Umgebung der BS ohne Suche maximal exponierter Orte
Maximumsuche?	Ja, Schwenkmethode
Messunsicherheit (MU)	3 dB
Extrapolation auf max. Anlagenauslastung?	teilweise (bei etwa 50 %)
MU auf Ergebnisse aufgeschlagen?	nein
Anzahl der Messpunkte	44
Maximaler Wert	0,05 W/m ²
Minimaler Wert	0,00000073 W/m ²
Schwankungsbreite	Faktor 68.000 (Leistungsflussdichte)
Mittelwert	0,0014 W/m ²
Mittelwert ohne max/min Wert	0,00031 W/m ²

Tabelle 2.1.3 Administrative Daten und statistische Auswertung der Messreihe *IMST 3*

Bei den Messergebnissen der Messreihe *IMST 3* wird deutlich, dass (nach Ausklammerung von V14.1) die mittlere Immission deutlich geringer ist als bei den Messreihen *IMST 1 und 2*. Dies ist primär auf die Wahl der Messpunkte zurückzuführen, da hier nicht vorrangig die am stärksten exponierten Orte in unmittelbarer Nähe der Basisstationen ausgewählt wurden. Trotzdem befanden sich auch bei der Messreihe *IMST 3* alle Orte in unmittelbarer Nähe der Basisstation (bis ca. 200 m).

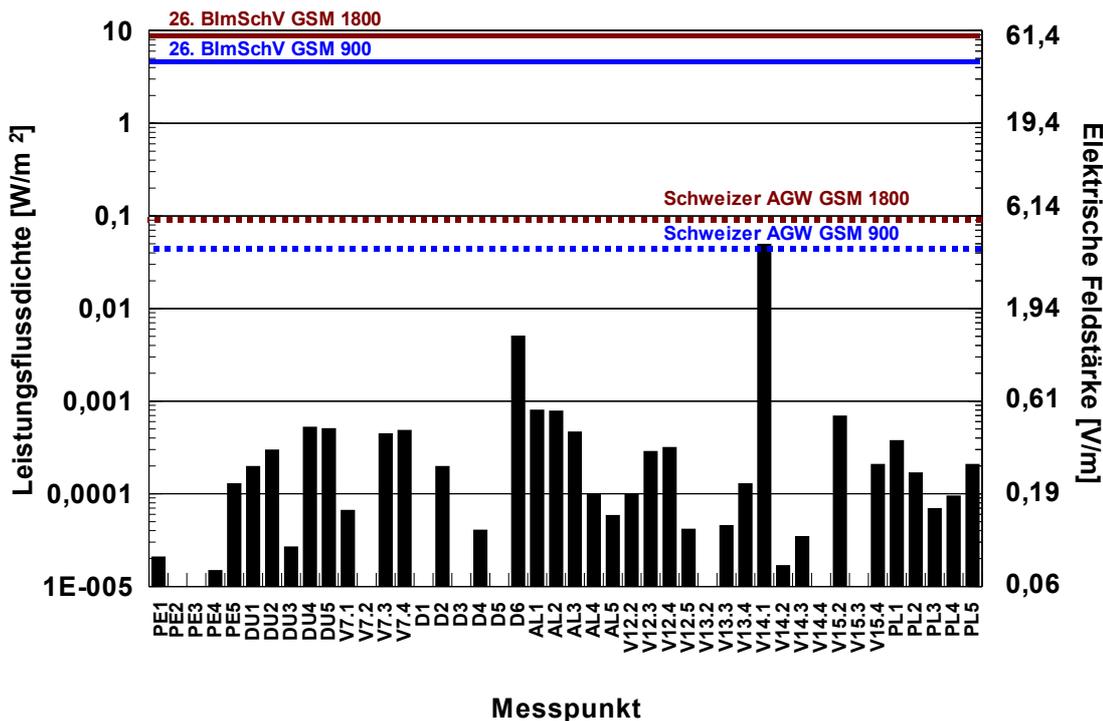


Bild 2.1.3 Messergebnisse der Messreihe IMST 3

Obwohl nur etwa 50 % der Messpunkte auf maximale Anlagenauslastung extrapoliert wurde, sind die Messergebnisse trotzdem mit denen der anderen Messreihen vergleichbar. Dort, wo nicht extrapoliert wurde, erfolgte eine zeitliche Maximierung (Maxhold) innerhalb eines mehrminütigen Betrachtungszeitraums sowie eine Summation aller Einzelimmissionen. Wie unter 2.1.6 ausführlich erläutert, kann dies zu einer Überschätzung führen, die sich teilweise mit der nicht durchgeführten Hochrechnung kompensiert. Bild 4.3.1 zeigt, dass die Unterschiede beider Verfahren oftmals gering ausfallen.

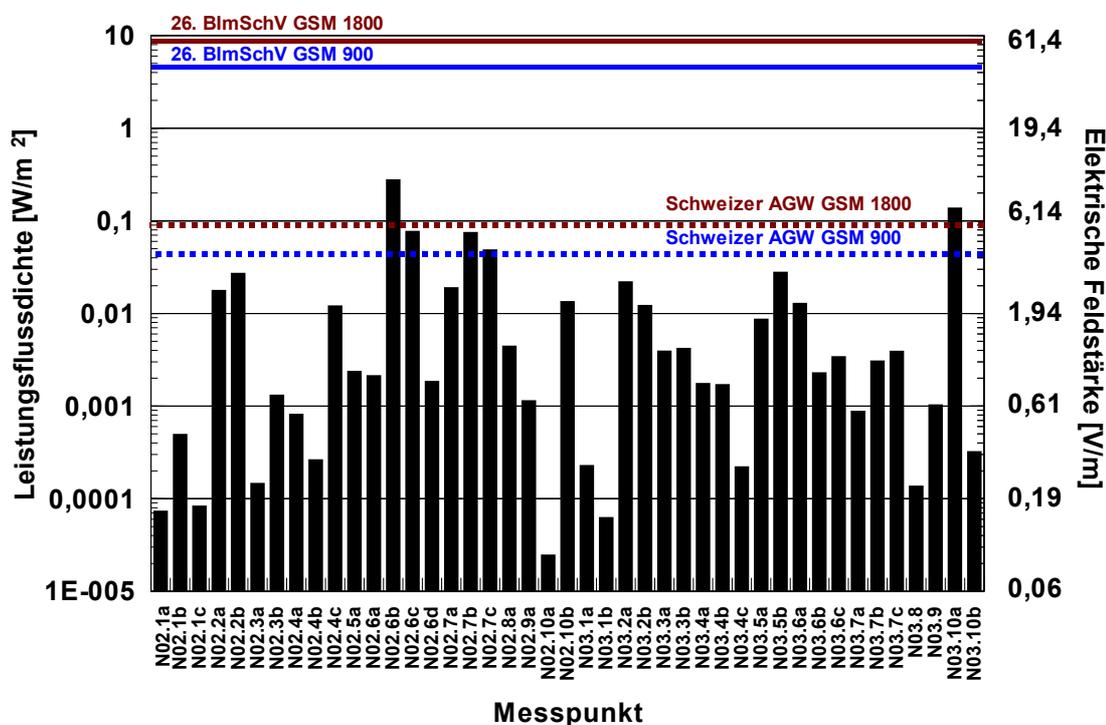
2.1.4 Messreihe Nürnberg

Die Messreihe *Nürnberg* beruht auf Messungen des EM-Institutes Regensburg, Prof. Wuschek. Hier wurden in den Jahren 2002 und 2003 verschiedene Messungen in der Umgebung von Mobilfunk Sendeanlagen im Stadtgebiet von Nürnberg durchgeführt und dokumentiert [WUSCH 02, WUSCH 03_1]. Bei der Festlegung der Messpunkte wurde versucht, vorrangig extreme Immissionssituationen zu untersuchen, andererseits aber auch Konstellationen zu berücksichtigen, die in Städten häufig anzutreffen sind bzw. die in der öffentlichen Diskussion immer wieder besonders kritisch diskutiert werden. Die Messpunkte befanden sich sowohl innerhalb von Gebäuden, als auch im Freien. Als Besonderheit ist hier zu nennen, dass der Verfasser dieser Messreihe die Standorte in einzelne Kategorien, z.B. nach Lage im Umfeld von sensiblen Orten, nach Mehrfachnutzungen oder nach geringen Höhenunterschieden usw. untergliedert hat. Die Messunsicherheit bei den Messungen wurde mit 3 dB angegeben. In den referenzierten Untersuchungen wurde die Messunsicherheit auf die Ergebnisse aufgeschlagen. Um die Daten mit den anderen Messreihen dieses Kapitels vergleichbar zu machen, sind die weiter unten dargestellten Daten wieder um die Messunsicherheit verringert worden, d.h. es sind die reinen Messdaten angegeben.

Messreihe	Nürnberg
Lage der Messpunkte	vorrangig extrem exponierte Orte in direkter Umgebung der BS, auch typische Szenarien
Maximumsuche?	Ja, Schwenkmethode
Messunsicherheit (MU)	3 dB
Extrapolation auf max. Anlagenauslastung?	ja
MU auf Ergebnisse aufgeschlagen?	ursprünglich ja, hier aber wieder abgerechnet
Anzahl der Messpunkte	43
Maximaler Wert	0,28 W/m ²
Minimaler Wert	0,000025 W/m ²
Schwankungsbreite	Faktor 11.200 (Leistungsflussdichte)
Mittelwert	0,020 W/m ²
Mittelwert ohne max/min Wert	0,014 W/m ²

Tabelle 2.1.4 Administrative Daten und statistische Auswertung der Messreihe *Nürnberg*

Bei dieser Messreihe fällt auf, dass die Werte im Vergleich zu den anderen Messreihen fast durchweg höher sind. Da die Messverfahren weitgehend identisch sind, ist eine mögliche Ursache in der Wahl der Messpunkt zu vermuten.

Bild 2.1.4 Messergebnisse der Messreihe *Nürnberg*

2.1.5 Messreihe TÜV

Die Messreihe *TÜV* beruht auf Messungen der Firma EMV Services GmbH, einem Tochterunternehmen des TÜV Nord. Die Messungen wurden im Jahr 2003 durchgeführt. Die IMST GmbH war bei der Konzipierung und Auswertung der Messungen beteiligt.

Die Auswahl der Messpunkte erfolgte einerseits unter dem Aspekt, möglichst viele unterschiedliche Szenarien in direkter Nähe der Basisstation einzubeziehen, wobei teilweise auch Punkte mit einer zu erwartenden besonders hohen Immission ausgewählt wurden. Andererseits wurden auch zahlreiche Messungen an sogenannten sensiblen Orten durchgeführt, die meist nicht zu den vergleichsweise stark exponierten Orten gehören. Insofern stellt die Messpunktauswahl hier ein breites Spektrum unterschiedlicher Szenarien und nicht eine primäre Auswahl von maximal exponierten Orten dar.

Die Messpunkte befanden sich sowohl innerhalb von Wohnungen, als auch im Freien. Die Messunsicherheit wurde nicht auf die Messergebnisse aufgeschlagen. Die Messdaten sind unter [TÜV 03_1 bis TÜV 03_4] dokumentiert.

Messreihe	TÜV
Lage der Messpunkte	repräsentative Orte in direkter Umgebung der BS, typische Szenarien
Maximumsuche?	Ja, Schwenkmethode
Messunsicherheit (MU)	2 dB
Extrapolation auf max. Anlagenauslastung?	ja
MU auf Ergebnisse aufgeschlagen?	nein
Anzahl der Messpunkte	113
Maximaler Wert	0,0072 W/m ²
Minimaler Wert	0,00000004 W/m ²
Schwankungsbreite	Faktor 180.000 (Leistungsflussdichte)
Mittelwert	0,00049 W/m ²
Mittelwert ohne max/min Wert	0,00043 W/m ²

Tabelle 2.1.5 Administrative Daten und statistische Auswertung der Messreihe *TÜV*

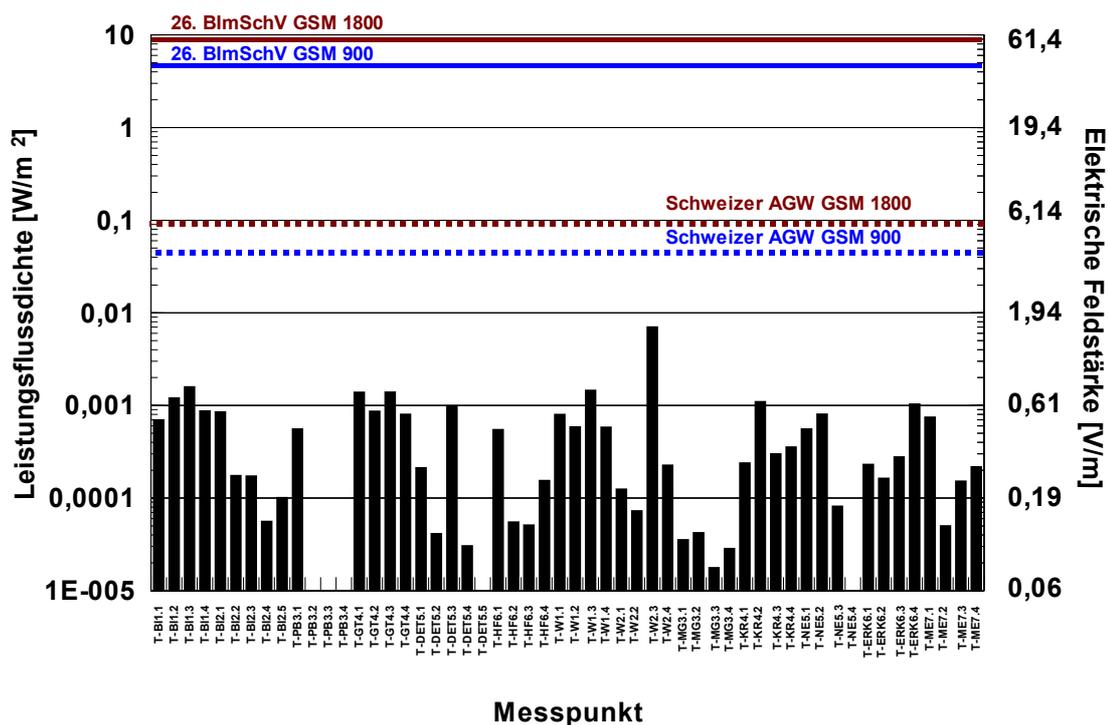
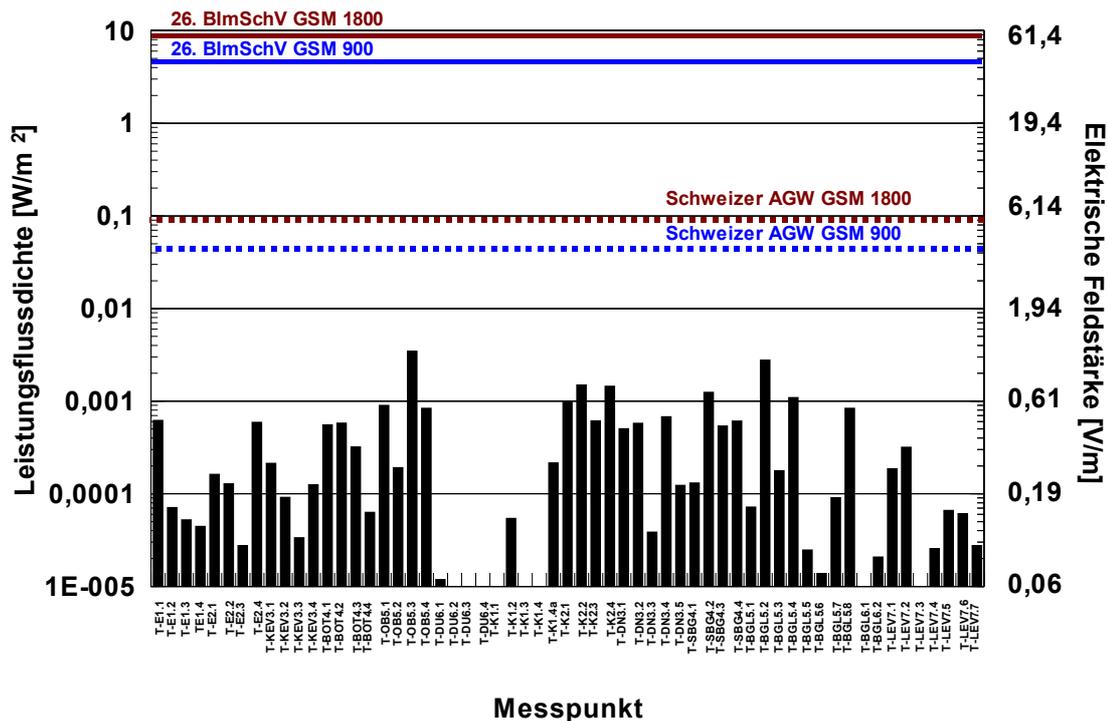


Bild 2.1.5 Messergebnisse der Messreihe TUV

Die Messwerte sind vergleichbar mit denen der Messreihe IMST 3. Offensichtlich liegt dies an der Wahl vergleichbarer Messpunkte, d.h. ohne primäre Auswahl von extrem exponierten Punkten.

2.1.6 Messreihe Baden-Württemberg

Im Oktober 2001 wurde im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg eine umfangreiche Messkampagne gestartet, deren Zweck es war, genauere Informationen über die Immissionssituation durch hochfrequente elektromagnetische Felder zu erhalten. An diesem Projekt beteiligt waren die Firma botronic GmbH Stuttgart sowie die Fachhochschulen Aschaffenburg und Deggendorf. Bei der Auswahl der Messpunkte wurde ein *flächenorientierter* Ansatz gewählt. Die Messpunkte befinden sich auf einem regelmäßigen Raster von 2 km x 2 km, wobei auch große, dicht besiedelte Regionen Baden-Württembergs abgedeckt wurden. Insgesamt wurden Messungen an 895 Messpunkten in den vier Regionen Heidelberg/Mannheim, Freiburg, Oberschwaben und Großraum Stuttgart durchgeführt.

Bei der Auswertung der Messungen wurde der Anteil der Mobilfunkimmissionen zur Gesamtimmission gesondert ausgewiesen und zu den Immissionen anderer HF-Quellen in Beziehung gesetzt. Zu den vorgenannten Messreihen unterscheidet sich diese Messreihe durch ihren katasterartigen Ansatz, d.h. hier wurden die Messpunkte nicht speziell hinsichtlich ihrer Nähe zu Mobilfunkstationen ausgewählt. Es ist eher zufällig, ob ein Messpunkt gerade in unmittelbarer Nähe zu einer Basisstation liegt oder eher weiter von ihr entfernt. Allerdings ist gerade im (inner-) städtischen Bereich die Chance relativ groß, auch Standorte in unmittelbarer Nähe einer Station zu erfassen. Wegen des katasterartigen Ansatzes bildet die Messreihe einen sehr guten Überblick über die *flächengemittelte* Immission unter besonderer Berücksichtigung des Mobilfunks.

Es erfolgte aufgrund der Vielzahl der Messpunkte keine Hochrechnung auf maximale Anlagenauslastung; allerdings wird diese Unterbewertung teilweise wieder durch die Überschätzung wegen nicht exakt herausgerechnetem Frequency Hopping kompensiert. Frequency Hopping ist eine Frequenzsprung-Technik, die derzeit verbreitet von T-Mobile und Vodafone eingesetzt wird und zur Interferenzminimierung dient. Beim sogenannten Synthesizer Frequency Hopping (SFH) sind mehr Frequenzen in der Luft, als physikalische Kanäle vorhanden sind. Erfolgt die Messaufnahme, wie im vorliegenden Fall, mit einem Spektrumanalysator im Maxhold-Betrieb, wird jede gefundene Frequenz im Spektrum als Einzelimmission gewertet, obwohl sie u.U. vom selben physikalischen Kanal stammt. Insofern ist hier die Möglichkeit einer Überbewertung der Immissionen gegeben, die aber, wie oben erwähnt, teilweise mit der Unterbewertung durch die nicht erfolgte Hochrechnung auf maximale Anlagenauslastung kompensiert wird [BOCH 03-1].

Auf alle Messergebnisse wurde eine Messunsicherheit von 3 dB aufgeschlagen; diese wird aber in unten stehender Tabelle wieder herausgerechnet.

Im folgenden wird stellvertretend eine Grafik bezüglich der Mobilfunkimmissionen aus dem Großraum Stuttgart vorgestellt [BOCH 03-1, BOCH 03-2, BOCH 03-3]. Die Immission ist als Prozentsatz vom *Feldstärkegrenzwert* dargestellt. In der Grafik ist die Messunsicherheit auf die Messergebnisse aufgeschlagen.

Messreihe	Baden-Württemberg
Lage der Messpunkte	katasterartig auf Raster 2 km x 2 km
Maximumsuche?	Ja, vergleichbar mit Drehmethode, allerdings auf einer Höhe
Messunsicherheit (MU)	3 dB
Extrapolation auf max. Anlagenauslastung?	nein
MU auf Ergebnisse aufgeschlagen?	ursprünglich ja; hier wieder herausgerechnet
Anzahl der Messpunkte	895
Maximaler Wert	ca. 5,5 % vom Feldstärkegrenzwert, entspricht nach MU-Abzug ca. 0,01 W/m ²
Minimaler Wert	keine Angabe
Schwankungsbreite	keine Angabe
Mittelwert	0,35 % vom Feldstärkegrenzwert, entspricht nach MU-Abzug ca. 0,00004 W/m ²
Mittelwert ohne max/min Wert	keine Angabe

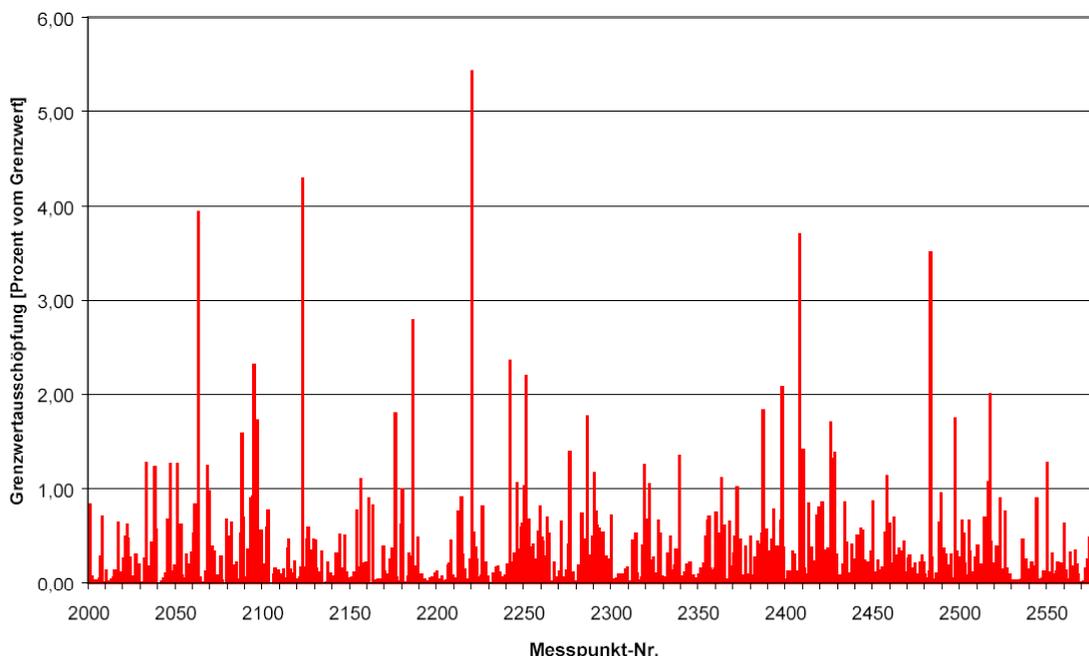
Tabelle 2.1.6 Administrative Daten und statistische Auswertung der Messreihe *Baden-Württemberg*

Bild 2.1.6 Messreihe Baden-Württemberg, Summenimmission durch Mobilfunk an allen Messpunkten im Untersuchungsgebiet Stuttgart, bezogen auf Feldstärkegrenzwert, aus [BOCH 03-3]

2.1.7 Auswertung der Messreihen

Für die messtechnische Erfassung von Immissionen in direkter Umgebung von Mobilfunk-sendeanlagen existieren mittlerweile einige Messreihen. Bei den hier durchgeführten Untersuchungen wurden daraus solche Messreihen ausgewählt, die mit einer vergleichbaren und nach Meinung der Verfasser qualitativ hochwertigen Messtechnik durchgeführt wurden. Das betrifft sowohl die Art des eingesetzten Messequipments, als auch die Technik der Extrem-werterfassung und der Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung.

Obwohl die vorgestellten Messreihen bezüglich der Mess- und Auswertemethodik sehr ähnlich sind, gibt es zwischen den Messreihen erhebliche Unterschiede. Es kann prinzipiell nicht ausgeschlossen werden, dass einige Messdetails zum Teil zu den Abweichungen beitragen. Ein weitaus bedeutsamerer Grund für die Unterschiede wird jedoch in der Wahl der Messpunkte gesehen, die der jeweiligen Messreihe zugrunde liegen. Denn interessanterweise sind z.B. die Reihen *IMST 1 und 2* mit der Reihe *Nürnberg* vergleichbar, wohingegen die Messreihe *IMST 3* eher mit der Reihe *TÜV* vergleichbar ist. Dabei sind aber die Reihen *IMST 1-3* alle von derselben Institution nach derselben Technik durchgeführt worden, so dass in der Tat die Messpunktwahl die Hauptursache der weit streuenden Ergebnisse darstellt.

Unabhängig davon sind aber auch bei den Messungen *innerhalb* einer Messreihe beträchtliche Schwankungen zwischen dem höchsten und dem tiefsten Wert festgestellt worden, und dies, obwohl sich alle Messpunkte in unmittelbarer Nähe (Sicherheitsabstand bis ca. 200 m) von der Basisstation entfernt befinden. Die Schwankungsbreite innerhalb einer Messreihe kann teilweise den Faktor 100.000 bezüglich der elektrischen Leistungsflussdichte erreichen. Die Gründe für diese starken Unterschiede trotz vergleichbarem Entfernungsbereich werden im Kapitel 2.2 näher untersucht.

Insgesamt liefern die im vorliegenden Kapitel angegebenen Werte einen guten Überblick über die Bandbreite der im relevanten Abstandsbereich von Basisstationen auftretenden typischen und extremalen Immissionswerte.

Der kleinste in den vorgestellten Messreihen festgestellte Immissionswert beträgt $0,00000004 \text{ W/m}^2$ entsprechend $0,004 \text{ V/m}$, der größte Wert ist $0,28 \text{ W/m}^2$ entsprechend $10,3 \text{ V/m}$. Die Grenzwerte der deutschen 26. BImSchV werden grundsätzlich mit teilweise erheblichen Faktoren unterschritten; die zur Orientierung angesetzten Schweizer Anlagengrenzwerte können durchaus an einigen wenigen Stellen erreicht oder sogar überschritten werden.

Aufgrund der offensichtlich starken Abhängigkeit der Ergebnisse von der Wahl der Messpunkte zwischen und innerhalb der unterschiedlichen Messreihen wird es nicht für sinnvoll erachtet, einen Mittelwert und weitere statistische Werte über alle Messreihen zu ermitteln.

In den Messreihen *IMST 1*, *Nürnberg* und *TÜV* wurden stellenweise auch Immissionen von UMTS Stationen erfasst. Diese wurden mit einem Faktor auf maximale Anlagenauslastung extrapoliert, der sich aus dem Verhältnis zwischen Maximalleistung der UMTS Anlage und Leistung der permanent vorhandenen Signalisierungskanäle ergibt. Die Immissionen wiesen ähnliche Größenordnungen und Schwankungsbreiten auf wie die Immissionen durch GSM Basisstationen. Da sie somit nicht auffällig waren, werden sie in den nachfolgenden Untersuchungen der Einflussfaktoren nicht gesondert behandelt. Darüber hinaus soll eine detaillierte Betrachtung der Immissionen von UMTS Anlagen unter besonderer Berücksichtigung von geeigneten Messverfahren in einem gesonderten BfS Forschungsvorhaben erfolgen.

2.2 Einflussfaktoren für die Größe der Immission

Für die Größe der ortsbezogenen Immission, d.h. der an einem festen Ort vorliegenden Immission, gibt es bestimmte Einflussfaktoren, die entweder nur von der Sendeanlage oder nur vom Empfängerort oder von beiden bestimmt werden. Es sind dies vor allem

Einflussfaktoren seitens der Mobilfunkanlage:

- insgesamt Sendeleistung der Anlage (Anzahl der Netzbetreiber, Anzahl der Kanäle, Sendeleistung pro Kanal),
- Höhe der Sendeanlage über Grund,
- verwendete Antennentypen,
- Downtilt der Antennen (d.h. Abwärtsneigung),
- horizontale Ausrichtung der Antennen.

Einflussfaktoren seitens des Immissionsortes:

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

Im folgenden werden diese Einflussfaktoren detailliert untersucht. Dabei wird so vorgegangen, dass zuerst die *prinzipielle* Auswirkung des Einflussfaktors erklärt wird. Anhand eines einfachen Wellenausbreitungsmodells wird anschließend eine Simulation der ortsbezogenen Immission in Abhängigkeit vom Einflussfaktor durchgeführt. Nachfolgend wird versucht, die darin gefundenen Zusammenhänge anhand von Messergebnissen zu verifizieren. Abschließend erfolgt eine Eingruppierung des Einflussfaktors bezüglich seiner Bedeutung für die Größe der ortsbezogenen Immission.

2.2.1 Abstand zur Mobilfunkanlage

In vielen Bereichen des Immissionsschutzes ist es ein Grundprinzip, eine Minimierung der Immission in erster Linie durch Vergrößerung des Abstands zur Sendequelle zu erreichen. Die Minimierung erfolgt aufgrund der Tatsache, dass die Immissionen bei wachsendem Abstand von der Quelle überproportional nach einem bestimmten Abstandsgesetz abnehmen. Aus der Elektrotechnik ist beispielsweise bekannt, dass die elektrische Leistungsflussdichte im Umfeld eines isotropen Senders mit $1/r^2$ abnimmt, wobei r den (radialen) Abstand von der Quelle bezeichnet.

Diese Eigenschaft sollte sich, sofern allgemein gültig, auch im Umfeld von Mobilfunk Basisstationen wiederfinden lassen.

Hierzu wurden die Ergebnisse der Messreihen *IMST 1 und 2* genauer analysiert: Jeder Messwert wurde als Funktion seines (radialen) Abstands von der Basisstation in ein Diagramm eingetragen. Andere Messreihen wurden hier vorerst nicht berücksichtigt, um die Aussagekraft des Diagramms nicht durch die bereits oben festgestellte starke Abhängigkeit von der Messpunktauswahl zu verfälschen. Außerdem wurde in die Analyse nur der Anteil der Hauptsendeanlage einbezogen. Damit wird der Anteil umliegender Basisstationen, der in Einzelfällen gleich oder sogar größer als derjenige der Hauptbasisstation sein kann, isoliert. An den Messpunkten, die sich im selben Gebäude der Anlage befinden, wurde der Abstand geschätzt.

Bild 2.2.1 zeigt das Ergebnis.

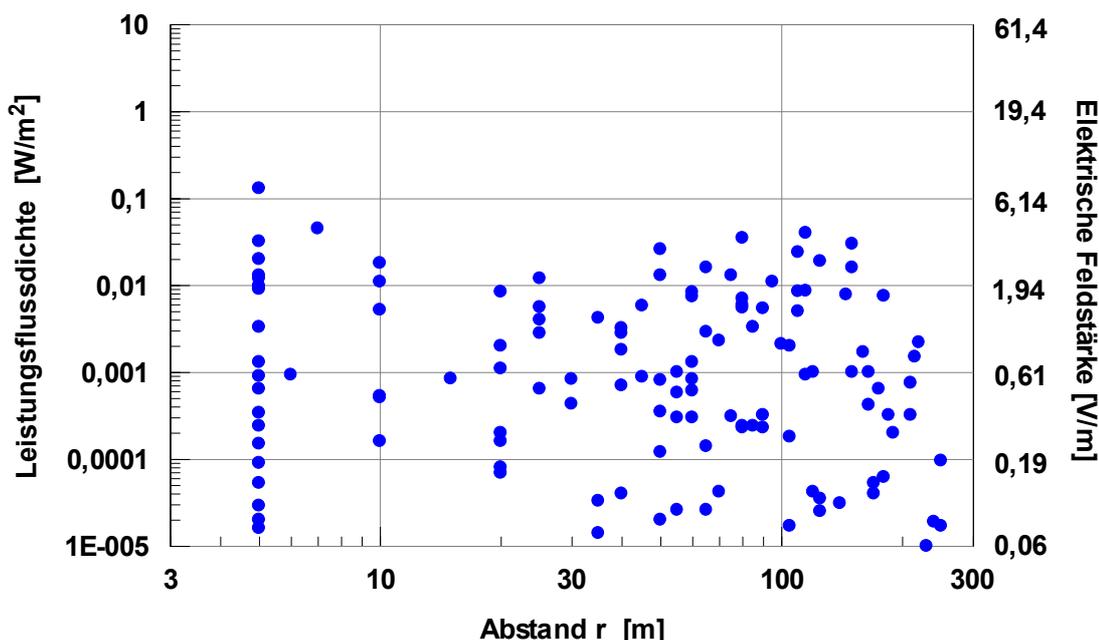


Bild 2.2.1 Verteilung der Messpunkte der Reihen *IMST 1 und 2* als Funktion des radialen Abstands

Aus Bild 2.2.1 ist erkennbar, dass es offensichtlich nicht gerechtfertigt ist, im für vorliegende Untersuchungen relevanten Entfernungsbereich bis 200 m um die Basisstation den Abstand als maßgebliches Kriterium für eine Einschätzung der Immissionssituation zu verwenden. Bei allen untersuchten Abständen ist nahezu die gleiche Streubreite von Immissionswerten zu finden.

Diese hier dargestellte, wichtige Erkenntnis begründet sich aus der besonderen Abstrahlcharakteristik der Mobilfunkantennen. Diese strahlen ihre Energie nicht isotrop, d.h. nicht gleichmäßig in alle Raumrichtungen ab. Es handelt sich vielmehr um Richtantennen, die

- vertikal (Elevation) in einen sehr schmalen Bereich und
- horizontal (Azimut) in einen etwa z.B. 120° breiten Sektor abstrahlen.

Zur besseren Veranschaulichung ist in Bild 2.2.2 die Abstrahlung von einer Basisstation mit einem Sektor dargestellt. Üblicherweise werden heutzutage Basisstationen mit drei Sektoren ausgestattet, die um 120° versetzt angeordnet sind. Die Immissionsanteile überlagern sich dann entsprechend.

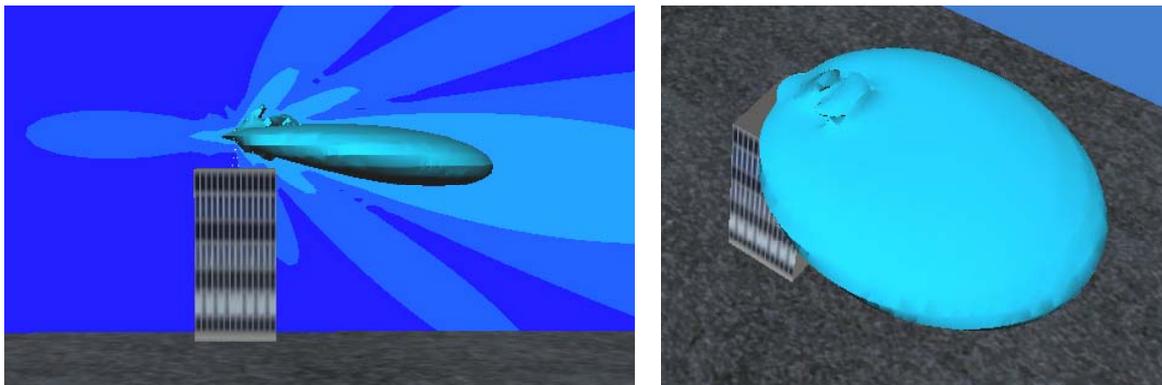


Bild 2.2.2 Grafische Darstellung der Abstrahlung einer Basisstation mit einer Sektorantenne. Ansicht von der Seite (Elevation, links) und von oben (Azimut, rechts)

Wie in Bild 2.2.2 zu sehen ist, existieren neben der hier schräg nach rechts unten gerichteten sogenannten Hauptstrahlung noch zahlreiche Nebenstrahlungen (Nebenzipfel). Die Intensität der Nebenzipfel ist klein relativ zur Hauptstrahlung. So hat typischerweise der stärkste Nebenzipfel weniger als 10 % der Strahlungsleistung der Hauptstrahlrichtung. Trotzdem können die Nebenzipfel, wie die nächsten Abschnitte noch zeigen werden, signifikant zur Immission beitragen. Aufgrund dieser „unregelmäßigen“ Strahlungscharakteristik sind Punkte, die sich im gleichen radialen Abstand von der Basisstation befinden, je nach ihrer Ausrichtung bezüglich der Haupt- oder Nebenstrahlrichtungen unterschiedlich großen Immissionen ausgesetzt.

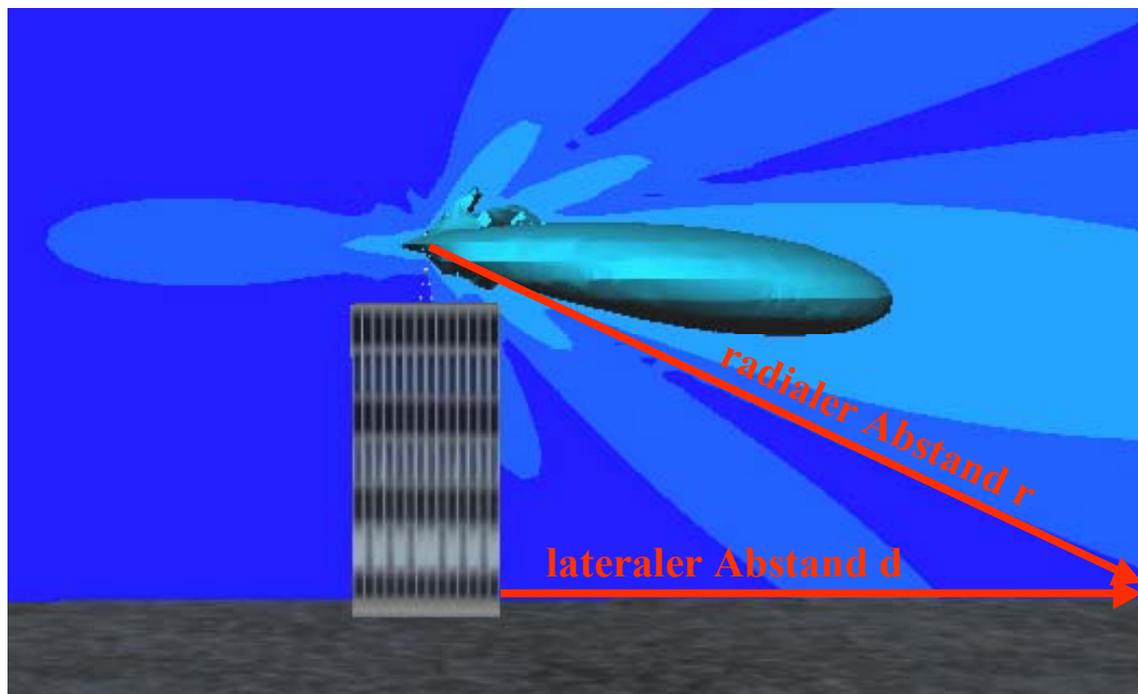


Bild 2.2.3 Durchlaufen der Nebenzipfel beim Entfernen von der Basisstation

In Bild 2.2.3 ist die Seitenansicht noch einmal vergrößert dargestellt. Auch ein Betrachter, der sich diesmal *auf gleicher Höhe*, d.h. lateral von der Basisstation entfernt, wird keine gleichmäßige Abnahme der Immission erfahren. Er wird vielmehr die Bereiche der Nebenzipfel und

der dazwischenliegenden Bereiche schwacher Immission (Einzüge) durchlaufen, so dass die Immission in Abhängigkeit vom lateralen Abstand sehr stark schwanken wird. Erst ab der Entfernung, wo der Betrachter in den Bereich der schräg nach unten gerichteten Hauptstrahlrichtung gelangt, ist bei einer weiteren Vergrößerung des Abstands mit einer gleichmäßigen Abnahme der Immission zu rechnen.

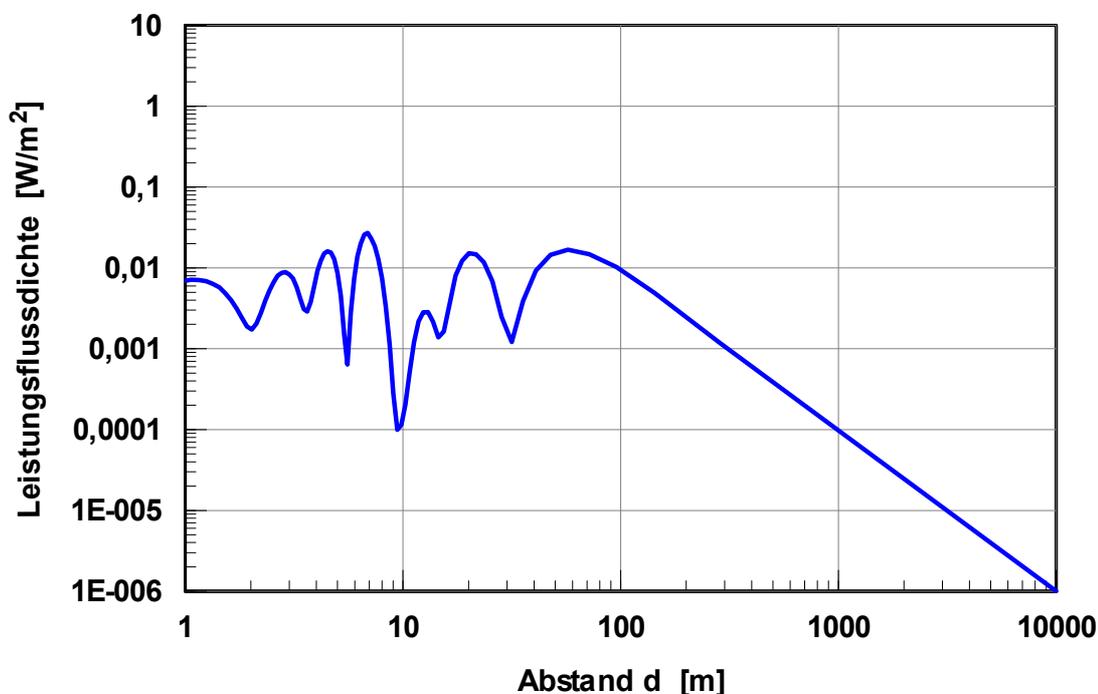


Bild 2.2.4 Verlauf der Leistungsfussdichte in Abhängigkeit vom lateralen Abstand, Parametersatz 1

Diese prinzipiellen Überlegungen sind in Bild 2.2.4 numerisch simuliert: Mit einem einfachen Freiraum-Wellenausbreitungsmodell, das u.a. von der RegTP zur Erstellung der Standortbescheinigung verwendet wird, wurde die Immission im Umfeld einer für den GSM 1800 Frequenzbereich verbreitet eingesetzten Mobilfunkantenne berechnet. Aus Gründen der Vereinfachung sind die Berechnungen nur in Sektormitte durchgeführt, wo die Immission am stärksten ist. Die Parameter des Senders sind in Tabelle 2.2.1 aufgeführt.

Parametersatz 1	
Sendeleistung P_S	20 W
Höhendifferenz Sender-Empfänger $\Delta h = h_S - h_E$	5 m
Antenne	K 735147
elektrischer Downtilt	2°
mechanischer Downtilt	0°
Wellenausbreitungsmodell	Freiraum

Tabelle 2.2.1 Beschreibung der Parameter für Parametersatz 1

Die aus Bild 2.2.3 abgeleitete prinzipielle Entfernungsabhängigkeit ist in Bild 2.2.4 bestätigt: Bis zum Auftreffpunkt der Hauptstrahlrichtung auf dem Boden, der je nach Antenne, Down-tilt und Höhe des Antennenstandortes zwischen etwa 30 m und mehreren Hundert Metern Entfernung von der Basisstation liegen kann, schwankt die Immission stark in Abhängigkeit des lateralen Abstandes. Erst danach fällt die Immission gemäß dem hier angenommenen Freiraumwellenausbreitungsmodell gleichmäßig mit der Entfernung ab.

Interessant ist hier die Tatsache, dass bei der hier verwendeten Antenne die ortsbezogenen Immissionen im Bereich der Nebenzipfel der Antenne *höher* als im Hauptstrahl sind. Diese Feststellung weist bereits darauf hin, dass die alleinige Beschreibung der Abstrahlung von Mobilfunkantennen mit dem Hauptstrahlmodell (Leuchtturmcharakteristik) zur Beurteilung der tatsächlich vorliegenden Situation vor allem in unmittelbarer Nähe der Antenne nicht ausreichend ist. Vielmehr sind hier in die Betrachtung auch die Nebenabstrahlungen der Antenne einzubeziehen, die, obschon amplitudenmäßig schwächer als der Hauptstrahl, wegen kleineren Abständen zum Immissionsort ähnlich große oder sogar größere Immissionen verursachen können als der Hauptstrahl.

Die Verteilung der Immission wird auch durch andere Effekte, wie z.B. Reflexionen an nebenstehenden Gebäuden oder Dämpfung bzw. Beugungen an Hindernissen im Ausbreitungsweg, grundlegend beeinflusst. Dennoch ist der stark schwankende Charakter der ortsbezogenen Immission in unmittelbarer Nähe der Basisstation immer in irgendeiner Weise wiederzufinden.

Im folgenden wird untersucht, ob sich diese theoretischen Überlegungen messtechnisch reproduzieren lassen. So zeigt Bild 2.2.5 eine Messung im Umfeld einer freistehenden, auf einem etwa 36 m hohen Mast installierten Mobilfunkanlage. Der rote Pfeil kennzeichnet die Richtung, in der sich der Betrachter von der Basisstation entfernt. Die Messungen wurden in Schritten von 10 m durchgeführt. Nullpunkt war der Mast.

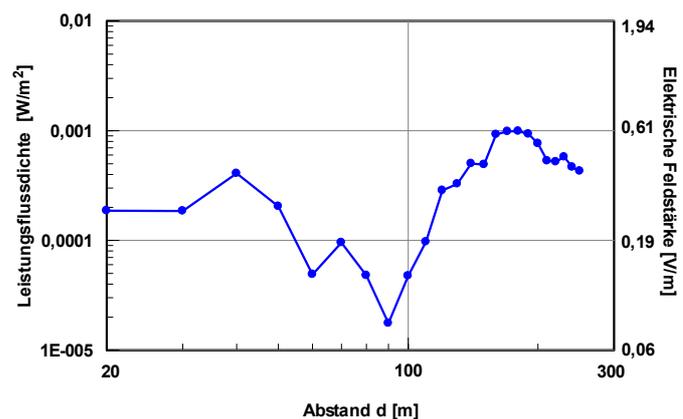


Bild 2.2.5 Ergebnisse der Messung an einem freistehenden Mast

Die Messungen wurden mit einem frequenzselektiven Spektrumanalysator vorgenommen; es wurde nur die Immission derjenigen Sektorantenne aufgenommen, die für den zu untersuchenden Weg interessant war. Außerdem wurde nur die Immission des ersten Kanals (BCCH), der ohne Leistungsregelung arbeitet, berücksichtigt.

Der prinzipielle Verlauf der Leistungsflussdichte über der Entfernung, wie ihn z.B. Bild 2.2.4 theoretisch vorgibt, findet sich in der Realität wieder. Auf dem Weg ist bis zu einem Bereich von etwa 100 m sehr gut der Einfluss der Nebenzipfel, der zu einem unruhigen Verlauf der Immission führt, zu sehen. Danach beginnt die Hauptstrahlrichtung; ab ca. 170 m nimmt die Immission gleichmäßig ab.

Als zweites Beispiel wurden in einem Vorgängerprojekt [KUN 01], wenn auch unter anderer Zielsetzung, ähnliche Untersuchungen in *innerstädtischem* Gelände durchgeführt, wobei hier die Immissionen über einen größeren Abstand von der Quelle aufgenommen wurden. Eine mobilfunkähnliche Antenne wurde dabei auf ein Gebäude von etwa 12 m Höhe montiert. Die Antenne hatte eine sehr breite Öffnung in der Elevation (27°). Dies kann als übliche Mobilfunkantenne mit einem sehr starken Downtilt aufgefasst werden; hierdurch wäre ein weiteres Vorrücken des Hauptstrahlrichtungsbereiches hin zu kleineren Abständen zu erwarten.

Bild 2.2.6 links zeigt einen Blick von der Sendeantenne entlang der gemessenen Route. Entlang der Route war die Antenne jeweils sichtbar.

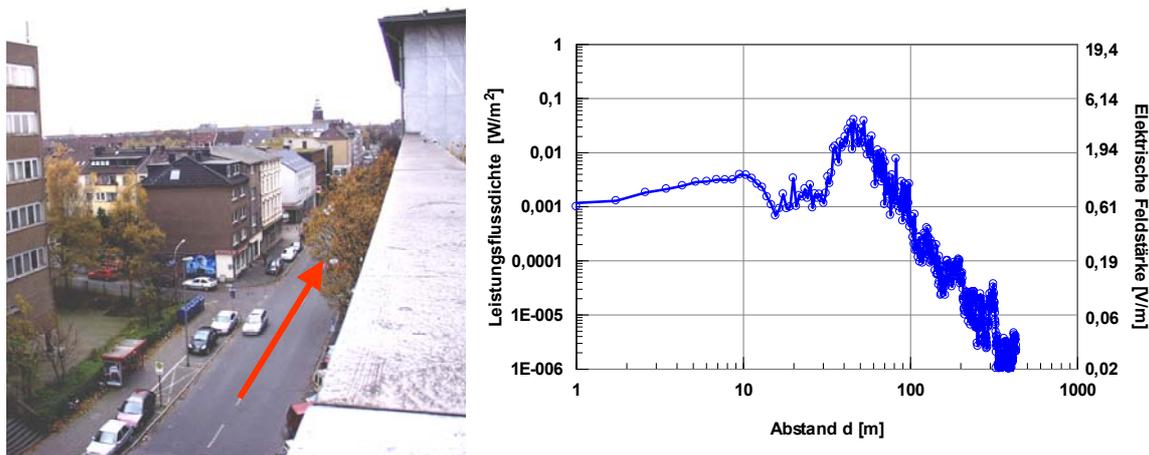


Bild 2.2.6 Ergebnisse der Messung an einer Anlage im Wohngebiet

Aufgrund der Tatsache, dass die verwendete Antenne im Nebenzipfelbereich nur einen dominanten Nebenzipfel aufwies, sind die Schwankungen im Entfernungsbereich vor der Hauptstrahlrichtung (1 m bis ca. 30 m) diesmal nicht stark ausgeprägt. Durch den starken Downtilt und die niedrigere Installation beginnt die Hauptstrahlrichtung schon in ca. 45 m Entfernung von der Antenne. Sehr gut ist der gleichmäßige Abfall der Leistungsflussdichte für größere Entfernungen zu erkennen. Der Abfall ist etwa proportional mit $d^{-4,6}$, wobei d der laterale Abstand ist.

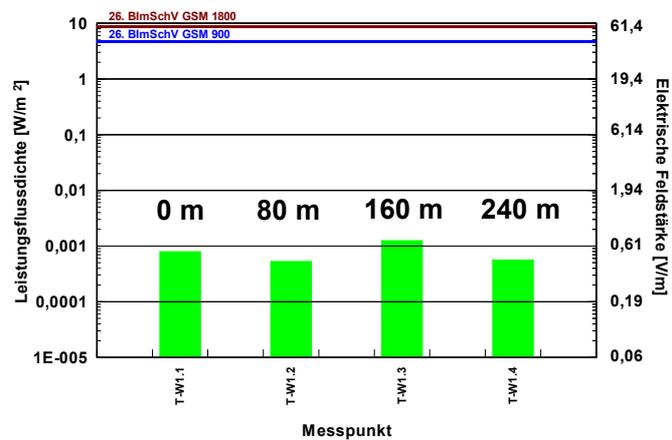


Bild 2.2.7 Entfernungabhängigkeit der Immission am Beispiel T-W1

Als letztes Beispiel ist in Bild 2.2.7 das Ergebnis einer Außenmessung in der Umgebung der dargestellten Anlage gezeigt. Die Messungen wurden an vier Messpunkten durchgeführt, die sich auf einer Linie im Abstand von 0 m (direkt am Gebäude), 80 m, 160 m und 240 m befinden. Es wurde nur der Anteil der Hauptsendeanlage ausgewertet. Wie zu sehen ist, kann auch hier von einer gleichmäßigen Abnahme der Immission bei zunehmendem Abstand nicht gesprochen werden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass im hier relevanten Entfernungsbereich bis 200 m von der Anlage weder der radiale, noch der laterale Abstand als maßgeblicher Einflussfaktor für die Größe der Immission in Frage kommt. In diesem Entfernungsbereich kommt es typischerweise zu Immissionsschwankungen, die durch den Nebenzipfelbereich der Antenne begründet sind. Die Schwankungen sind von der Art der Antenne und der Höhe von Sender bzw. Immissionsort abhängig. Erst ab lateralen Entfernungen, wo die Hauptstrahlrichtung den Boden erreicht, ist eine gleichmäßige Abnahme der Immission mit der Entfernung zu beobachten.

2.2.2 Höhenunterschied zur Mobilfunkanlage

Als zweiter Parameter soll untersucht werden, welchen Einfluss die Höhe des Immissionsortes bei der Beurteilung der Immission spielt. Aus Bild 2.2.8 wird ersichtlich, dass nicht allein die Höhe des Immissionsortes entscheidend ist, sondern die Höhe des Immissionsortes in Relation zur Höhe des Senderortes, oder anders ausgedrückt der Höhenunterschied.

Durchläuft man beispielsweise die Geschosse in einem benachbarten Haus von unten nach oben (roter Pfeil), so wird man in gewisser Weise die Nebenzipfel in Bild 2.2.8 durchwandern. Hierbei ist damit zu rechnen, dass im obersten Stockwerk mit einer vergleichsweise hohen Immission zu rechnen ist, da man sich hier „nahe der Hauptstrahlrichtung“ der Antenne befindet.

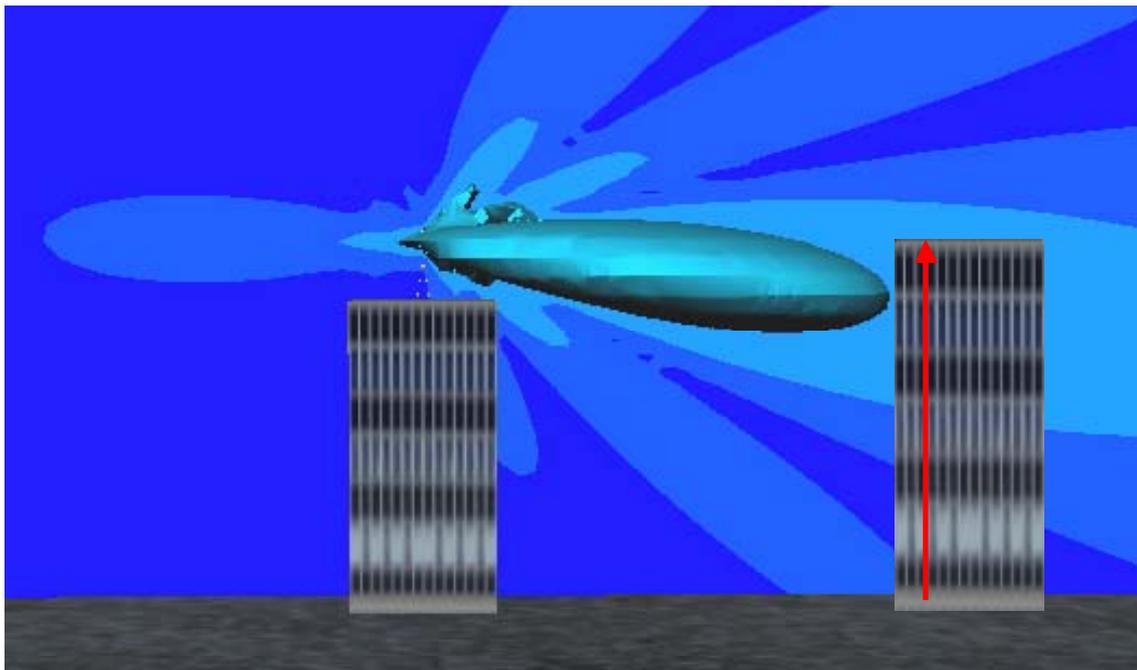


Bild 2.2.8 Durchlaufen der Nebenzipfel bei Erhöhung des Immissionsortes

Diese Höhenabnahme der Immission über der Geschosstiefe lässt sich messtechnisch in Bild 2.2.9 nachvollziehen. Hierbei wurden bei den rot markierten Messpunkten nur die Immissionsanteile der auf dem *Nachbargebäude* installierten Basisstation berücksichtigt. Alle Messpunkte befinden sich in der zur Basisstation zugewandten Gebäudeseite.

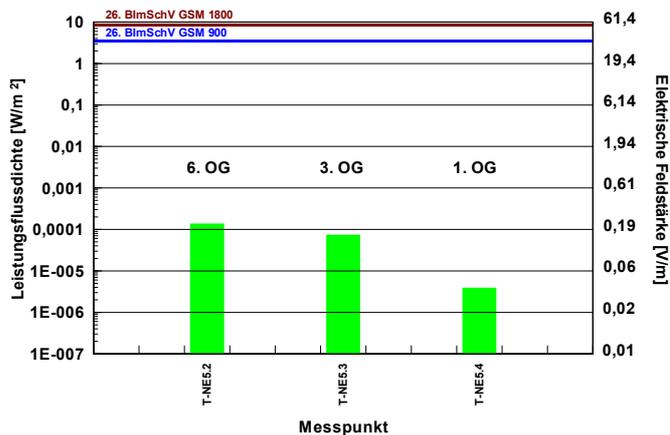


Bild 2.2.9 Höhenabhängigkeit der Immission am Beispiel T-NE5

Nach Bild 2.2.8 kann es jedoch auch möglich sein, dass ein mittlerer Geschossbereich des der Anlage gegenüberliegenden Gebäudes sich gerade in einem Einzug befindet, wohingegen die unteren Geschosse von einer Nebenstrahlrichtung erfasst werden. Hierfür gibt Bild 2.2.10 ein messtechnisches Beispiel. Offensichtlich befindet sich der Messpunkt im 5. OG nicht direkt in Hauptstrahlrichtung, dafür aber der Messpunkt im EG direkt in einem Nebenzipfel.

Es fällt auf, dass die Immission im EG höher ist als im 1. OG. Hierbei ist zwar einschränkend zu beachten, dass es sich beim Messpunkt im 1. OG im Gegensatz zum Messpunkt im EG um einen Innenmesspunkt handelt. Allerdings existiert mit T-DN3.1 ein von der Ausrichtung zur Sendeanlage vergleichbarer Innenmesspunkt, der nur eine geringfügig niedrigere Immission aufweist als der Außenmesspunkt T-DN3.2 (siehe Bild 2.1.5 oder Anhang). Der „Einbruch“ im 1. OG lässt sich nicht allein durch die Innenlage des Messpunktes erklären, sondern ist vermutlich auch durch die Lage dieses Messpunktes in einem Einzug des Sendeantennendiagramms begründet. Außerhalb dieses Einzugs in Richtung des nächsten Nebenzipfels wird die Immission wieder stärker und übersteigt im EG sogar die Immission im 5. OG.

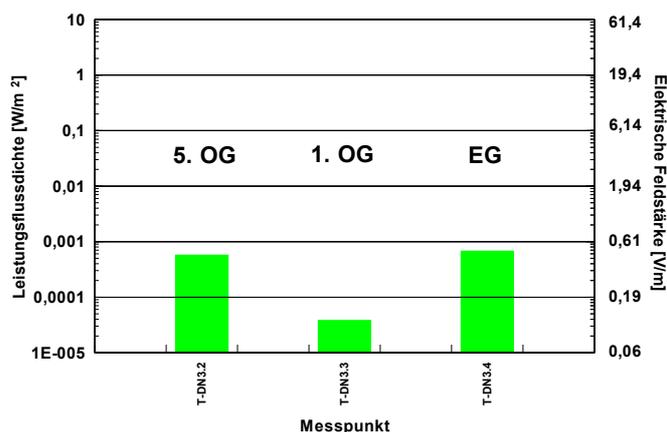


Bild 2.2.10 Höhenabhängigkeit der Immission am Beispiel T-DN3.2-3.4

In Bild 2.2.11 soll mit dem bereits oben erwähnten Freiraumwellenausbreitungsmodell untersucht werden, wie sich der prinzipielle Verlauf der ortsbezogenen Immission nach Bild 2.2.4 bei unterschiedlichen Höhendifferenzen darstellt. Die Höhendifferenz wird wie folgt variiert: 1 m, 5 m, 10 m, 20 m und 50 m. 1 m bis 10 m entsprechen typischen Konfigurationen in Wohngebieten; 20 m ist für die Betrachtung der ortsbezogenen Immission am Erdboden von einer Sendestation auf einem Hochhausdach ebenfalls denkbar. 20 m und 50 m können für die ortsbezogene Immission am Erdboden für Sendestationen auftreten, die auf einem separaten Trägermast installiert sind.

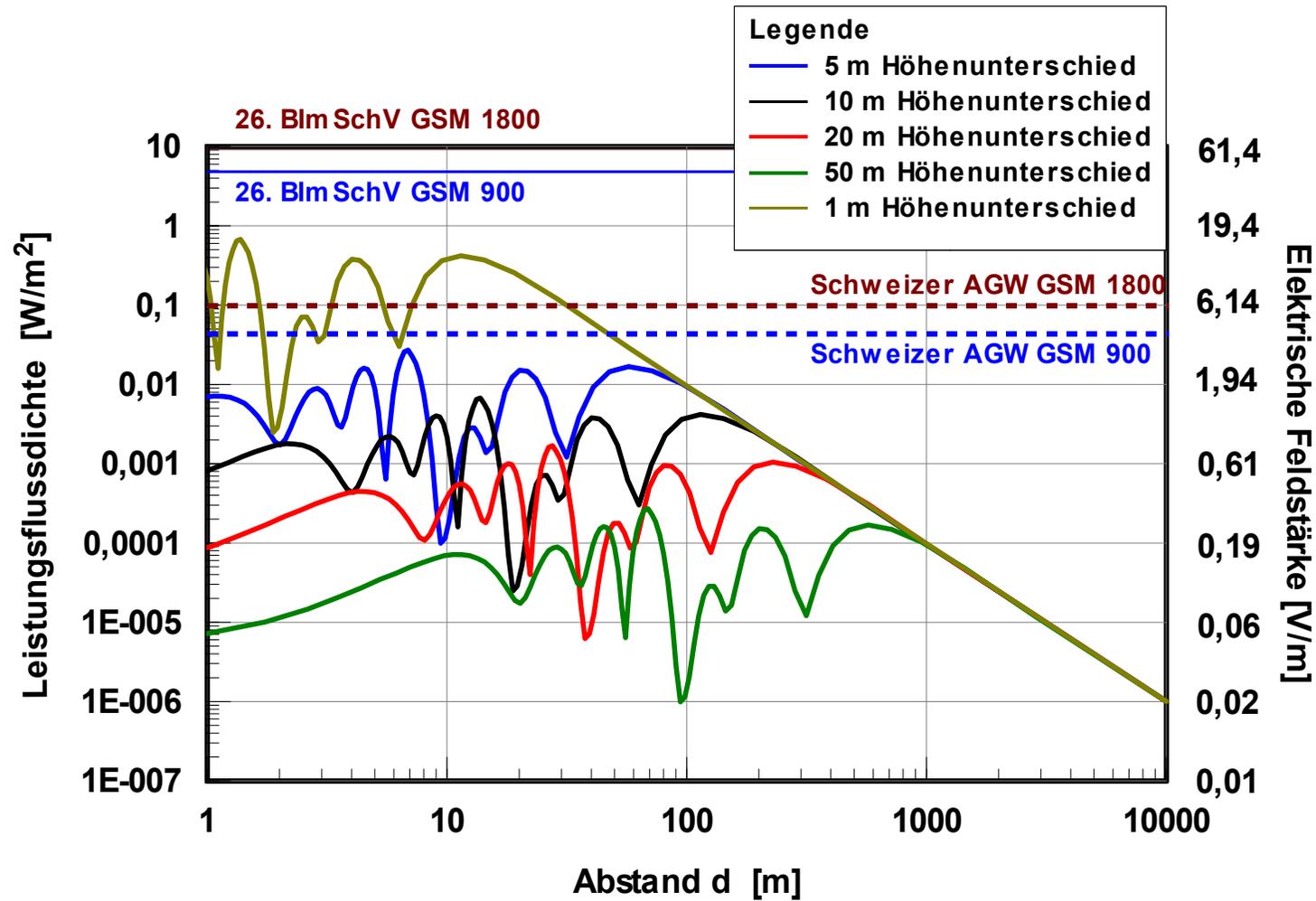


Bild 2.2.11 Verlauf der Immission in Abhängigkeit vom lateralen Abstand. Parametersatz 1 bei Variation des Höhenunterschiedes

Auswertung:

Bei Variation des Höhenunterschiedes bleibt die prinzipielle Kurvenform nach Bild 2.2.4 erhalten. Mit zunehmendem Höhenunterschied verschieben sich die Kurven im Nah- und mittlerem Abstandsbereich von der Antenne jedoch nach unten und gleichzeitig nach rechts. Die Rechtsverschiebung ist damit erklärbar, dass ein bestimmter Abstrahlwinkel der Antenne bei größerem Höhenunterschied erst in einem größeren Abstand von der Antenne erreicht wird. Durch den größeren Abstand ist auch die Immission kleiner, da unter Freiraumbedingungen die Leistungsflussdichte im Fernfeld quadratisch mit der Entfernung von der Antenne abnimmt. Bild 2.2.11 zeigt deutlich, dass bei geringen Höhenunterschieden (z.B. 1 m) die Werte der ortsbezogenen Immission stark steigen und sogar die Schweizer Anlagengrenzwerte deutlich überschritten werden können. Davon sind solche Immissionsorte z.B. innerhalb von Wohnungen betroffen, die sich in Hauptstrahlrichtung auf fast derselben Höhe wie die Sendeantenne befinden und relativ dicht (einige Meter) an ihr angrenzen. Bei großen Entfernungen von der Antenne (einige Hundert Meter) spielt die Höhendifferenz keine Rolle mehr, da man dort die Sendeantenne, unabhängig von ihrer Höhe, unter nahezu demselben Winkel sieht und die Hauptstrahlung über diesen Winkelbereich nahezu konstant ist. Deswegen münden die Immissionskurven ineinander ein.

(Anmerkung: Letztere Aussage gilt in der Realität nicht für innerstädtisches Gebiet ohne direkte Sicht zur Sendeanlage. Hier steigt die ortsbezogene Immission bei Erhöhung der Sendeantenne aus wellenausbreitungstechnischen Gründen an, da die Antenne „sichtbarer“ wird).

Im folgenden wird untersucht, ob sich diese theoretischen Überlegungen nicht nur an ausgewählten Beispielen, sondern generell in der Praxis widerspiegeln. Hierzu wurden wiederum die Ergebnisse der Messreihen *IMST 1* und *IMST 2* genauer analysiert: Jeder Messwert wurde als Funktion seines abgeschätzten Höhenunterschiedes Δh zur Basisstation in ein Diagramm eingetragen. Auch hier wurde wiederum nur der Anteil der Hauptsendeanlage betrachtet. Außerdem wurden nur diejenigen Punkte betrachtet, die direkte Sicht zur Anlage hatten, um die Ergebnisse nicht durch Dämpfungen an Sichthindernissen zu verfälschen. Somit wurden auch Messpunkte, die sich im selben Gebäude der Anlage befanden, nicht berücksichtigt.

Bild 2.2.12 zeigt das Ergebnis. Die Punktwolke sieht sehr ungleichmäßig aus, jedoch kann man schon einen Trend ableiten: Die höchsten Immissionswerte finden sich bei geringen Höhenunterschieden, wohingegen die niedrigsten Immissionswerte bei relevanten Höhenunterschieden von 15 m – 25 m auftreten. Die Uneinheitlichkeit der Ergebnisse kann darin begründet sein, dass die reine Höhenabhängigkeit noch keine zuverlässige Aussage darüber liefert, ob sich ein Messpunkt in Hauptstrahlrichtung befindet oder nicht. Dies ist primär vom lateralen Abstand des Messpunktes zur Sendeanlage und vor allem vom Downtilt der Sendeantenne abhängig.

Deswegen werden im folgenden aus den Messergebnissen diejenigen Messpunkte extrahiert, die sich mit großer Sicherheit in oder nahe der Hauptstrahlrichtung der Antenne befinden. Bild 2.2.13 zeigt das Ergebnis. Diesmal tritt die Aussage klar und deutlich zutage: Im Vergleich zu den Gesamtergebnissen der Messreihen *IMST 1* und *IMST 2* erfahren diejenigen

Punkte, die in oder nahe der Hauptstrahlrichtung liegen, die höchsten Immissionen. Alle in Bild 2.2.13 gezeigten Immissionen liegen deutlich über dem Durchschnitt.

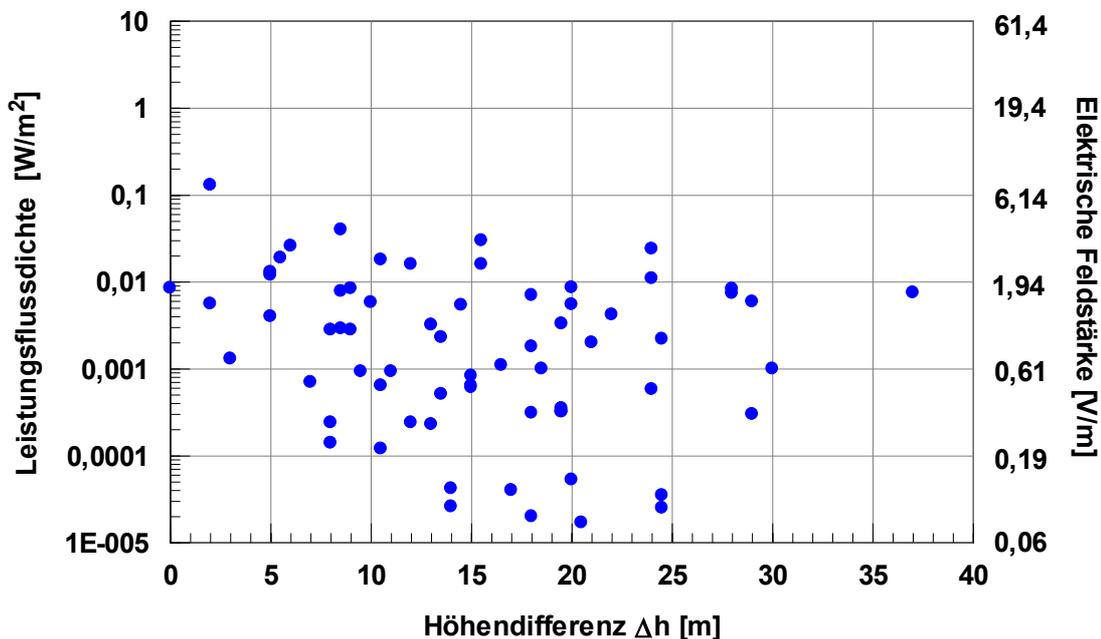


Bild 2.2.12 Verteilung der Messpunkte der Reihen *IMST 1 und 2* als Funktion der Höhendifferenz

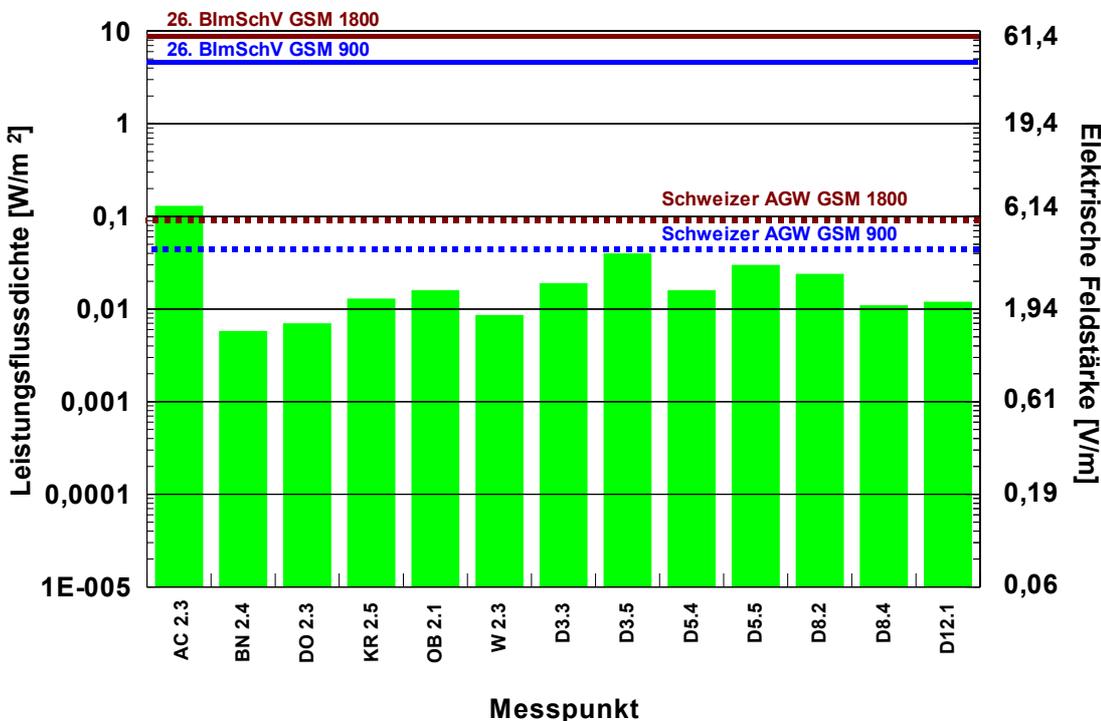


Bild 2.2.13 Extraktion der in oder nahe der Hauptstrahlrichtung liegenden Messpunkte aus den Messreihen *IMST 1 und 2*

Die Eindeutigkeit dieses Ergebnisses ist umso erstaunlicher, da die in Bild 2.2.13 gezeigten Messpunkte über einen großen Entfernungsbereich von 5 m bis 150 m variieren. Offensichtlich kann hier als wichtiges Ergebnis festgehalten werden, dass der Höhenunterschied als Einflussfaktor für die Immission eine weitaus größere Rolle spielt als der laterale Abstand.

Trotzdem darf aus dieser Tatsache nicht pauschal geschlossen werden, dass die Immission über die Geschosstiefe eines benachbarten Hauses *immer* stetig abnimmt, bzw. im obersten Geschoss grundsätzlich höher ist als in anderen Geschossen. Es kommt vielmehr darauf an, wie der Messpunkt zur Hauptstrahlrichtung und zu möglichen Nebenstrahlrichtungen der Sendeantenne orientiert ist. Aus Bild 2.2.8 beispielsweise kann gefolgert werden, dass tiefere Geschosse durchaus von einer Nebenstrahlrichtung erfasst werden können, so dass die Immission in tieferen Stockwerken u.U. wieder zunimmt. Die Immission dort kann, vor allem wenn das oberste Geschoss deutlich unter oder auch über der Hauptstrahlrichtung liegt, sogar größer sein als im obersten Geschoss. Diese beiden Aussagen werden in den Bildern 2.2.13 und 2.2.14 dokumentiert.

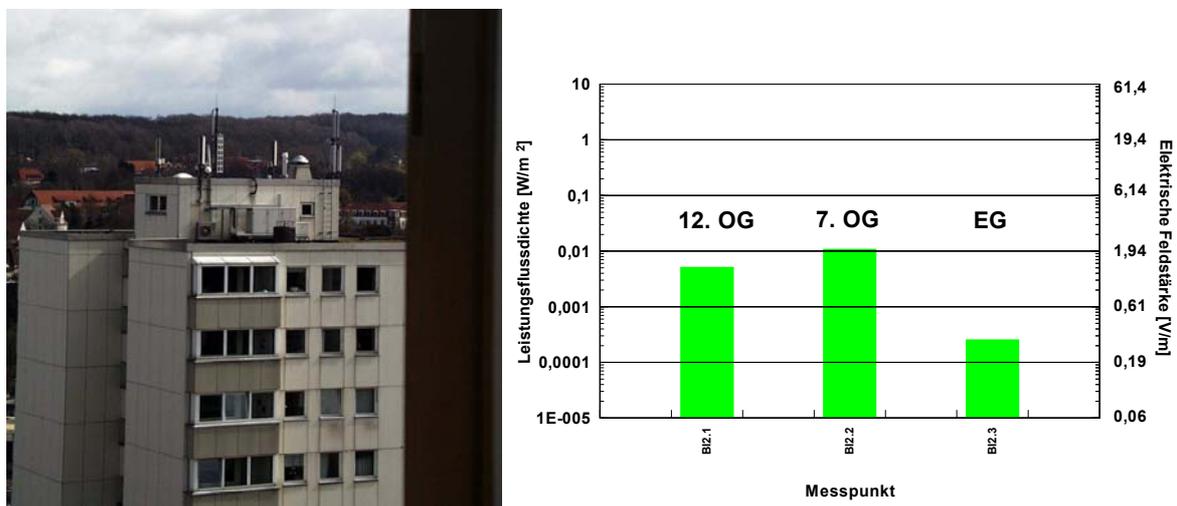


Bild 2.2.14 Höhenabhängigkeit der Immission am Beispiel BI2

In Bild 2.2.14 befinden sich die Immissionsorte in unterschiedlichen Geschossen im Gebäude, das der gezeigten Mobilfunkanlage gegenüberliegt. Das 12. OG liegt höhenbezogen offensichtlich schon weit *über* der Hauptstrahlrichtung, so dass im 7. OG eine größere Immission vorhanden ist als im 12. OG. Im Erdgeschoss dagegen ist die Immission deutlich niedriger. Alle Messpunkte lagen auf derselben Gebäudeseite in einer Flucht übereinander und hatten direkte Sicht zur Sendeanlage.

Auch in Bild 2.2.10 sind die Immissionsorte in ein und demselben Gebäude übereinander liegend in verschiedenen Stockwerken angeordnet. Hier ist bedeutsam, dass im Erdgeschoss eine höhere Immission gemessen wurde als im 5. OG. Dies kann dadurch begründet sein, dass das 5. OG außerhalb der Hauptstrahlrichtung liegt und das EG von einer Nebenstrahlrichtung erfasst wird.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der Höhenunterschied eine weitaus größere Rolle für die Größe der Immission spielt als beispielsweise der Abstand zur Anlage. In Zusammenhang mit den noch weiter unten folgenden Untersuchungen muss konstatiert werden, dass die sich aus dem Höhenunterschied abgeleitete Orientierung zur Hauptstrahl-

richtung *der dominierende Einflussfaktor* für die ortsbezogene Immission ist. Orte, die in Hauptstrahlrichtung liegen, erfahren eine weitaus größere Immission als Orte in anderen Abstrahlrichtungen, selbst wenn sie vergleichsweise weiter entfernt liegen.

2.2.3 Sendeleistung der Mobilfunkanlage

Auch die Sendeleistung der Mobilfunkanlage hat einen direkten Einfluss auf die ortsbezogene Immission. Die Untersuchung dieses Einflussfaktors ist u.a. relevant für die Fragestellung, inwieweit Anwohner einer Basisstation bei einer Aufrüstung der Station mit UMTS oder bei einer Mitbenutzung durch einen anderen Netzbetreiber (Mehrfachnutzung, site sharing) automatisch von einer entsprechenden Vervielfachung der Immission ausgehen müssen.

Das prinzipielle Verhalten der ortsbezogenen Immission bei Variation der Sendeleistung ist in Bild 2.2.15 gezeigt. Für die Sendeleistung werden Werte von 5 W, 20 W, 50 W und 100 W angenommen. Unter Sendeleistung wird hier die in einen Sektor *insgesamt* abgestrahlte, maximale Leistung bei Anlagenvolllast verstanden, d.h. Kanalzahl x Sendeleistung pro Kanal. 5 W und 20 W sind gängige Werte bei vielen Basisstationen. 50 W können bei einzelnen Anlagen auftreten, die maximal mit Sendekanälen bestückt sind; dies ist aber schon als nicht allgemeiner Fall anzusehen. 100 W sind für eine einzelne Anlage/Sektor sicherlich unrealistisch, unter dem Gesichtspunkt der Mehrfachnutzung jedoch denkbar.

Auswertung:

Mit veränderter Leistung ändert sich am prinzipiellen Verhalten der Kurve aus Bild 2.2.4 nichts; die Kurven werden einfach parallel nach oben (steigende Leistung) bzw. unten (sinkende Leistung) verschoben. Hier spiegelt sich die Proportionalität zwischen Sendeleistung P_S und Leistungsflussdichte S wider, d.h. bei steigender Gesamtleistung der Sendeanlage erhöht sich die ortsbezogene Immission entsprechend. Zur Orientierung sind wieder die für Deutschland gültigen Grenzwerte der 26. BImSchV sowie die Schweizer Vorsorgewerte für Orte mit empfindlicher Nutzung angegeben.

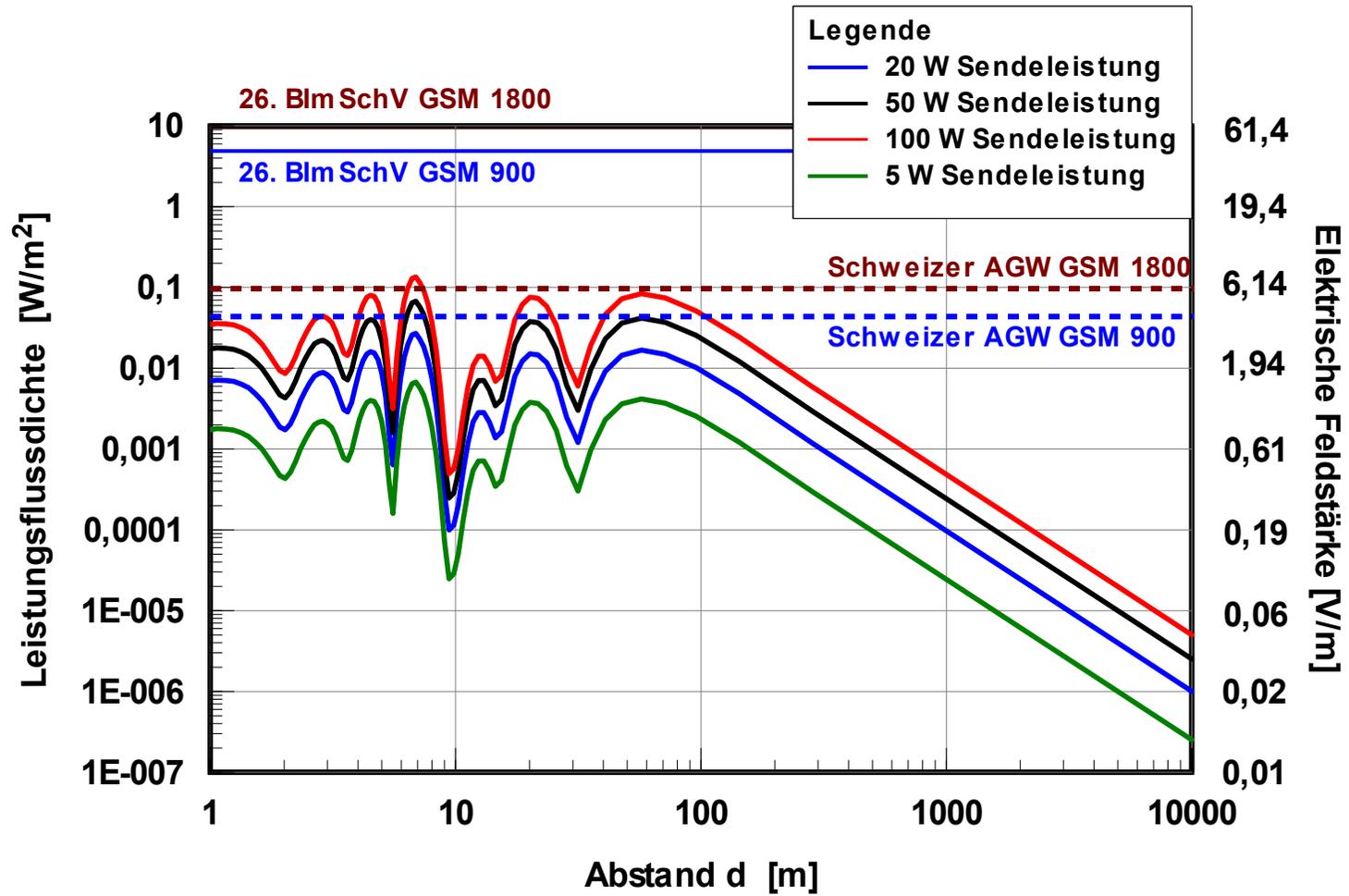


Bild 2.2.15 Verlauf der Immission in Abhängigkeit vom lateralen Abstand. Parametersatz 1 bei Variation der Sendeleistung

Eine Fragestellung bei der Untersuchung des Einflussfaktors Sendeleistung ist jedoch, ob es realistisch ist, pauschal die Sendeleistungen mehrerer Sendesysteme unterschiedlicher Betreiber *aufzusummieren*. Eine entsprechende Summierung wäre streng genommen nur dann erlaubt, wenn die Antennen der unterschiedlichen Betreiber exakt gleich ausgerichtet sind, sich an exakt derselben Stelle befinden, den gleichen Downtilt verwenden und mit derselben Frequenz senden. Diese Bedingungen werden in der Realität nicht vorhanden sein. Um diese Fragestellung messtechnisch zu überprüfen, werden wiederum die Werte der Messreihen *IMST 1 und 2* herangezogen. Diesmal werden die Messwerte nach der Anzahl der Kanäle sortiert, über die die Sendeanlage insgesamt verfügt. Ist auf der Sendeanlage beispielsweise ein Betreiber vertreten, der auf drei Sektoren mit jeweils zwei Kanäle arbeitet, wird als Kanalzahl sechs angenommen. Handelt es sich um einen Standort mit Mehrfachnutzung, auf dem Betreiber A mit jeweils zwei Kanälen, Betreiber B mit jeweils vier Kanälen und Betreiber C mit jeweils sechs Kanälen pro Sektor arbeitet, ist die Kanalzahl 36. Da die Sendeleistung zwischen den einzelnen Netzbetreibern zumindest in innerstädtischen Gebieten von der Größenordnung her vergleichbar ist, ist die Kanalzahl ein vernünftiges Maß für die insgesamt Sendeleistung des Standorts. Auch hier werden wiederum nur die Beiträge der Hauptsendeanlage betrachtet.

Bild 2.2.16 zeigt das Ergebnis. Eine eindeutige Aussage ist schwierig, obwohl hier wieder ein Trend erkennbar ist: Die geringsten Immissionen treten durchweg bei kleinen Kanalzahlen auf, die höchsten Immissionen vermehrt bei hohen Kanalzahlen. Trotzdem lässt sich nicht schlussfolgern, dass bei kleinen Kanalzahlen *durchweg* kleinere Immissionen auftreten und bei großen Kanalzahlen *durchweg* höhere Immissionen. Immissionen bei kleinen Kanalzahlen können stellenweise höher sein als Immissionen bei größeren Kanalzahlen. Möglicherweise wird hier eine eindeutige Aussage von einer starken Abhängigkeit von der Wahl des Messpunktes (insbesondere Orientierung zur Hauptstrahlrichtung) verdeckt.

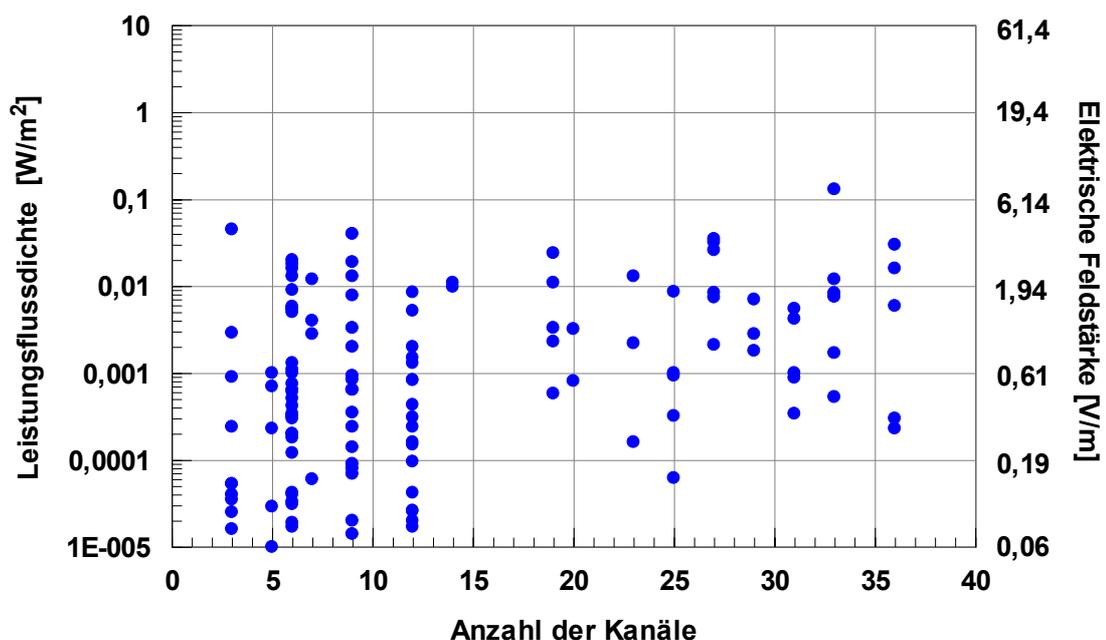


Bild 2.2.16 Verteilung der Messpunkte der Reihen *IMST 1 und 2* als Funktion der Anzahl der Kanäle

Deswegen soll im folgenden versucht werden, nur bezüglich ihrer Lage *vergleichbare* Messpunkte in die Auswertung einzubeziehen. In Übereinstimmung mit dem vorangegangenen Abschnitt werden deswegen nur diejenigen Messpunkte einbezogen, die bezüglich ihres Höhenunterschiedes alle in der Hauptstrahlrichtung der Sendeanlage liegen, freie Sicht zum Sender haben und in einem Entfernungsbereich von 45 m bis 150 m liegen. Bild 2.2.17 zeigt das Ergebnis.

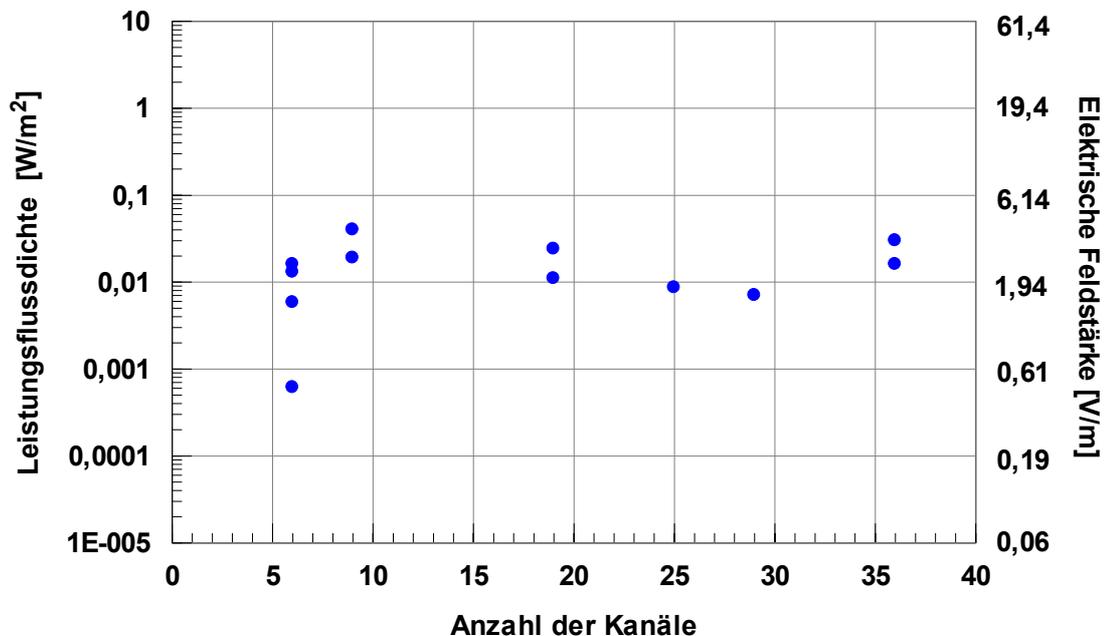


Bild 2.2.17 Verteilung der in Hauptstrahlrichtung liegenden Messpunkte der Reihen *IMST 1 und 2* als Funktion der Anzahl der Kanäle

Auch hier kann keine klare Abhängigkeit der Immission von der reinen Anzahl der Sendekanäle festgestellt werden.

Ein Beispiel für die leistungsmäßige Zusammensetzung der Immissionen an einem festen Messpunkt zeigt Bild 2.2.18. Hier sind die Beiträge der unterschiedlichen Netzbetreiber zur Gesamtmission aufgetragen. Es wird deutlich, dass die Immissionen nicht mit der Anzahl der Kanäle korreliert zu sein scheint. Hohe Kanalzahlen erzeugen nicht automatisch die höchsten Immissionen. Im Beispiel von Bild 2.2.18 tritt noch eine andere Besonderheit auf, die oftmals bei weiter von der Anlage entfernten Messpunkten festgestellt wird: Die Immissionen durch die GSM 1800 Netze ist trotz vergleichbarer Kanalzahl häufig niedriger als die Immissionen durch die GSM 900 Netze. Eine Erklärung dafür lässt sich nicht durch das Freiraumwellenausbreitungsmodell beschreiben, da hier die Größe der Immission (Leistungsflussdichte oder Feldstärke) nur durch die Sendeleistung, den Antennengewinn und den Abstand bestimmt wird. Bei größeren Abständen von der Antenne (sehr groß gegenüber der Höhe des Sender- bzw. Empfangsstandortes) und starken Reflexionen, z.B. durch die Bodenreflexion, ist jedoch das Freiraummodell nicht mehr gültig. Hier ist zum einen eine andere Abhängigkeit vorhanden (Leistungsflussdichte proportional zu $1/d^4$), außerdem ist die Immission *frequenzabhängig* [PAR 92]. Bei höheren Frequenzen werden die Funkwellen stärker gedämpft und die Immission wird dementsprechend kleiner. Die Abhängigkeit der

Leistungsflussdichte proportional zu $1/d^4$ kommt durch Überlagerung von direktem und am Boden reflektiertem (und um 180° phasengedrehten) Strahl zustande. Mit wachsendem Abstand von der Sendeantenne werden die Laufzeitunterschiede zwischen beiden Strahlen immer kleiner, so dass die Intensitätsabnahme bei der Überlagerung beider Strahlen wesentlich schneller erfolgt als die $1/d^2$ Abnahme nur eines Strahles im Freiraum ohne Bodenreflexion. Dieser prinzipielle Verlauf ist auch gut in Bild 2.2.6 rechts zu beobachten.

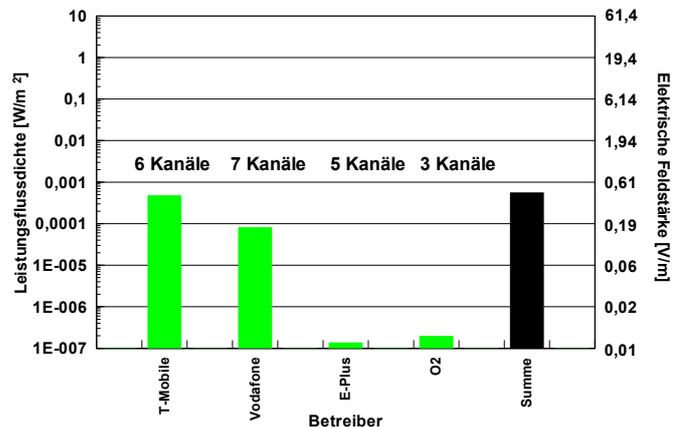


Bild 2.2.18 Anteile der unterschiedlichen Betreiber am Messpunkt T-BOT5.1

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Sendeleistung einer Anlage zwar prinzipiell einen Einfluss auf die ortsbezogene Immission hat. Offensichtlich ist jedoch entscheidender, wie die Lage des Messpunktes zur Anlage ist, wie die Sendeantennen ausgerichtet sind, welche Antennen mit welchem Downtilt eingesetzt werden und in welchem Frequenzbereich die Anlage arbeitet. Insofern lässt sich bei einer Aufrüstung einer bestehenden Anlage nicht pauschal von einer entsprechenden Vervielfachung der Immission ausgehen. Die Erhöhung der Immission kann sowohl unter-, als auch überadditiv ausfallen. Außerdem ist bei größeren Abständen von der Antenne und dem Vorhandensein von Reflexionen die Immission frequenzabhängig: Frequenzen des GSM 900 Bandes liefern tendenziell höhere Immissionen als die des GSM 1800 Bandes. Bezugnehmend auf den vorangegangenen Abschnitt hat offensichtlich die Orientierung des Messpunktes zur Hauptstrahlrichtung einen wesentlich größeren Einfluss auf die Immission als die reine Sendeleistung.

Ein weiterer Einflussfaktor, der direkt mit der Sendeleistung verknüpft ist, ist das *Verkehrsaufkommen*. Mehrkanalige Mobilfunkanlagen arbeiten ab Kanal 2 mit einer teilnehmer- und verbindungsqualitätsabhängigen Leistungsregelung. Mehr Mobiltelefonnutzer, die gleichzeitig über die selbe Basisstation telefonieren, erhöhen deren Sendeleistung. Die sich hieraus ergebenden tageszeit- und wochentagsabhängigen Immissionsschwankungen sind ausführlich in Abschnitt 4.1.2 erläutert. Bei den in Abschnitt 2.1 vorgestellten Messreihen wurde der Faktor Verkehrsaufkommen durch die Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung eliminiert.

2.2.4 Downtilt der Sendeantenne

Unter dem Downtilt einer Sendeantenne wird eine Abwärtsneigung der Antenne in Richtung Erdboden um wenige Grad verstanden. Sinn hierbei ist, dass die Sendeenergie nicht horizontal abgestrahlt werden soll, sondern in Richtung Erdboden. Ein größerer Downtilt wird vor allem im innerstädtischen Bereich verwendet, wo man aus Kapazitätsgründen die Funkzellen klein halten und scharf voneinander abgrenzen muss, um das Übersprechen in benachbarte Zellen zu minimieren.

Der Downtilt kann elektrisch (bereits in der Antenne realisiert) oder/und mechanisch (die Antenne wird bei der Installation nach unten gekippt) ausgeführt sein.

Auch hier werden wieder prinzipielle Berechnungen mit dem Freiraummodell vorgenommen. Bild 2.2.19 zeigt die ortsbezogene Immission, wobei als Parameter der Downtilt der Antenne variiert wird.

Auswertung:

Für größere Downtilts verschieben sich die Kurven nach links, und die ortsbezogenen Immissionspegel werden größer. Interessanterweise steigt die im Bereich der Hauptstrahlung liegende ortsbezogene Immission stärker an als die im Bereich der Nebenzipfel liegende. Auch für moderate Sendeleistungen (20 W) kann es bei realistischen Downtilts schon zur Überschreitung der Schweizer Anlagengrenzwerte kommen. Die Kurven münden für große Abstände von der Antenne nicht ineinander ein, da man dort in einem Winkelbereich des Elevationsdiagramms ist, wo sich die Abstrahlung sehr stark bei minimaler Winkeldifferenz ändert. Für 8° Downtilt wird für große Abstände bereits der erste Nebenzipfel über dem Horizont erreicht, deswegen steigt die Kurve wieder an.

Eine messtechnische Überprüfung dieses theoretisch abgeleiteten Einflusses ist in der Praxis nur schwer möglich. Aufgrund der Vielzahl der eingesetzten Antennentypen und Downtilts wären einerseits eine Vielzahl von Messungen notwendig, um eine repräsentative Auswahl von unterschiedlichen Konfigurationen zu erfassen und belastbare Daten zu gewinnen. Andererseits ist durch den im Vergleich zum Einflussfaktor Höhenunterschied geringeren Einfluss des Downtilts zu erwarten, dass messtechnisch nachweisbare Effekte völlig von anderen Einflussfaktoren, wie z.B. der Lage des Messpunktes, verdeckt werden. Eine indirekte messtechnische Untersuchung des Einflussfaktors Downtilt findet weiter unten im Rahmen der Unterscheidung bezüglich morphographischer Parameter (Lage der Messpunkte in städtischem oder ländlichem Gebiet) statt, da wie oben erwähnt für unterschiedliche Landnutzungsklassen unterschiedliche Downtilts verwendet werden.

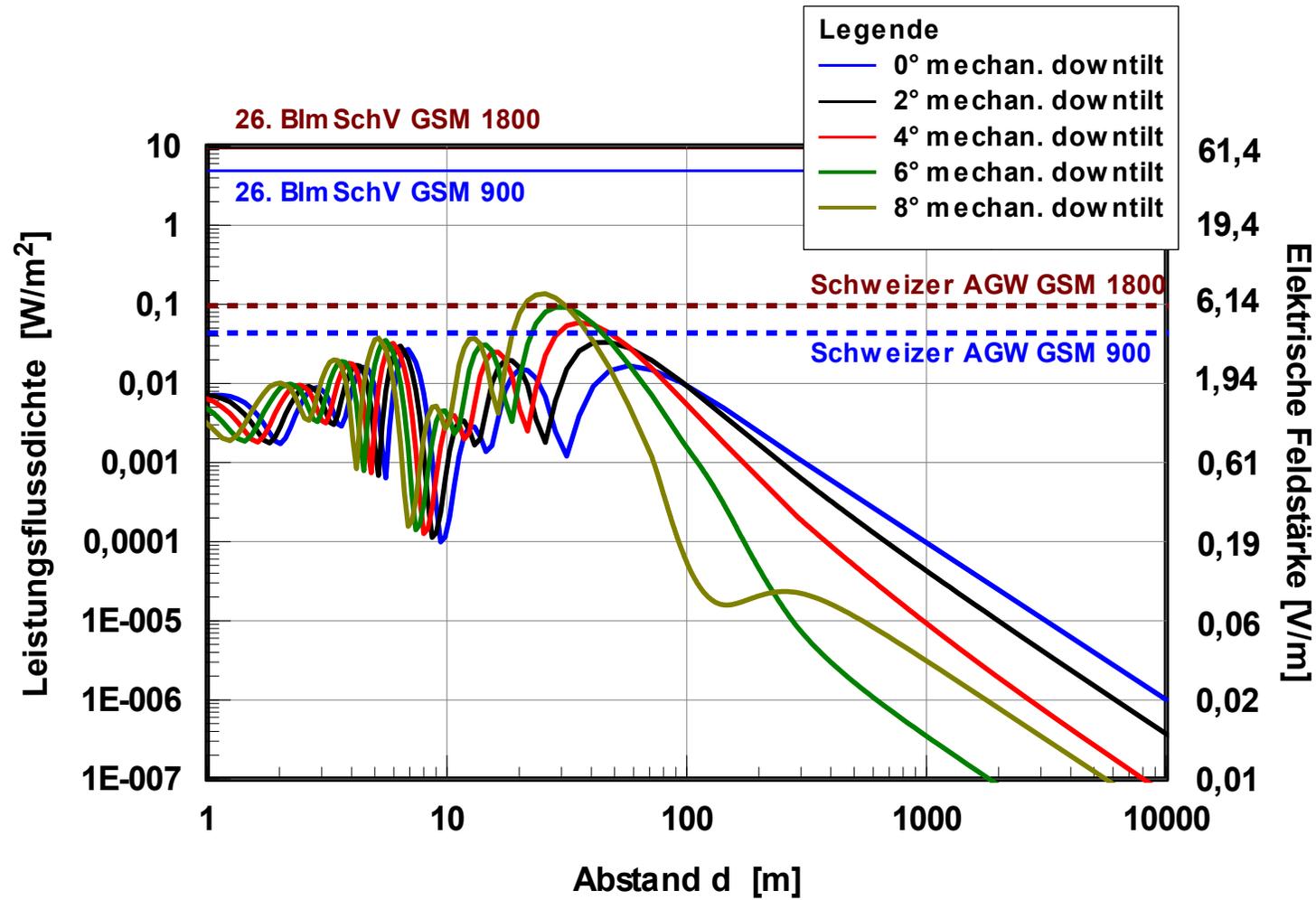


Bild 2.2.19 Verlauf der Immission in Abhängigkeit vom lateralen Abstand. Parametersatz 1 bei Variation des Downtilts

2.2.5 Typ der Sendeantenne

Die in den vorangegangenen Abschnitten gezeigten typischen Immissionskurven sind für einen Antennentyp gültig, der für Basisstationsantennen gängig ist. Prinzipiell werden selbstverständlich verschiedene Antennentypen verwendet, je nach Netzbetreiber und ausleuchtungstechnischen Anforderungen.

Zur Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Antennentypen werden zwei andere Antennen, die ebenfalls im GSM 1800 Netz Verwendung finden, betrachtet. Bezüglich der Elevation sind im Bereich der Hauptstrahlung alle drei Kurven deckungsgleich. Im Bereich der relevanten Nebenzipfel ergeben sich jedoch Abweichungen. Unten wird gezeigt, welchen Einfluss dies auf die Immission in der Sektormitte hat. Der elektrische Downtilt von 2° ist bei allen drei Antennen gleich.

In Bild 2.2.20 ist der Verlauf der Leistungsflussdichte in Abhängigkeit vom lateralen Abstand für die drei Antennentypen zu sehen. Es gelten wiederum die Angaben von Parametersatz 1, wobei hier der Antennentyp variiert wird. Prinzipiell sind alle drei Verläufe ähnlich: Bis zum Erreichen der Hauptstrahlrichtung der Antennen bei ca. 50 m werden wiederum die Nebenmaxima und -minima durchlaufen. Da diese für alle drei Antennen unterschiedlich aussehen, differiert der Verlauf der Immission in diesem Bereich. Ab etwa 50 m fallen die Kurven wieder gleichmäßig ab, allerdings ist die Immission durch die Antenne K 739 707 wegen ihres um ca. 1,5 dBi kleineren Gewinns entsprechend niedriger.

Auswertung:

Die Wahl der Antenne hat Auswirkungen vor allem auf den Verlauf der ortsbezogenen Immission im Bereich der Nebenzipfel, d.h. je nach Höhe bis zu ca. 50 m (5 m Höhenunterschied) bzw. ca. 500 m Abstand (50 m Höhenunterschied) von der Antenne entfernt. Hier kann vor allem durch Wahl einer Antenne mit niedrigen Nebenzipfeln die Immission deutlich gesenkt werden (nur bei der Antenne K 735 147 liegt die Immission im Bereich der Nebenzipfel über der Immission in Hauptstrahlrichtung!). Ab Erreichen der Hauptstrahlrichtung verlaufen die Kurven gleich und sind nur noch vom Gewinn der Antenne abhängig. Durch die Antenne verändern sich die in den vorhergehenden Abschnitten festgestellten Trends *nicht*.

Eine messtechnische Überprüfung dieses theoretisch abgeleiteten Einflusses ist in der Praxis aus den bereits im vorigen Abschnitt genannten Gründen schwierig. Eine indirekte messtechnische Untersuchung des Einflussfaktors Antennentyp findet weiter unten im Rahmen der Unterscheidung bezüglich morphographischer Parameter (Lage der Messpunkte in städtischem oder ländlichem Gebiet) statt, da für unterschiedliche Landnutzungsklassen unterschiedliche Antennen verwendet werden. Hier kann jedoch bereits festgestellt werden, dass es wenig sinnvoll ist, aus Sicht der Immissionsminimierung ein besonders „schützenswertes“ Objekt, z.B. einen Kindergarten, grundsätzlich in solchen Abständen von der Sendeantenne zu positionieren, wo sich bei einem Antennentyp eine besonders niedrige Immission einstellt. Es ist dann möglich, dass bei Verwendung eines anderen Antennentyps und Downtilts bei diesem Abstand gerade ein Immissionsmaximum vorliegt.

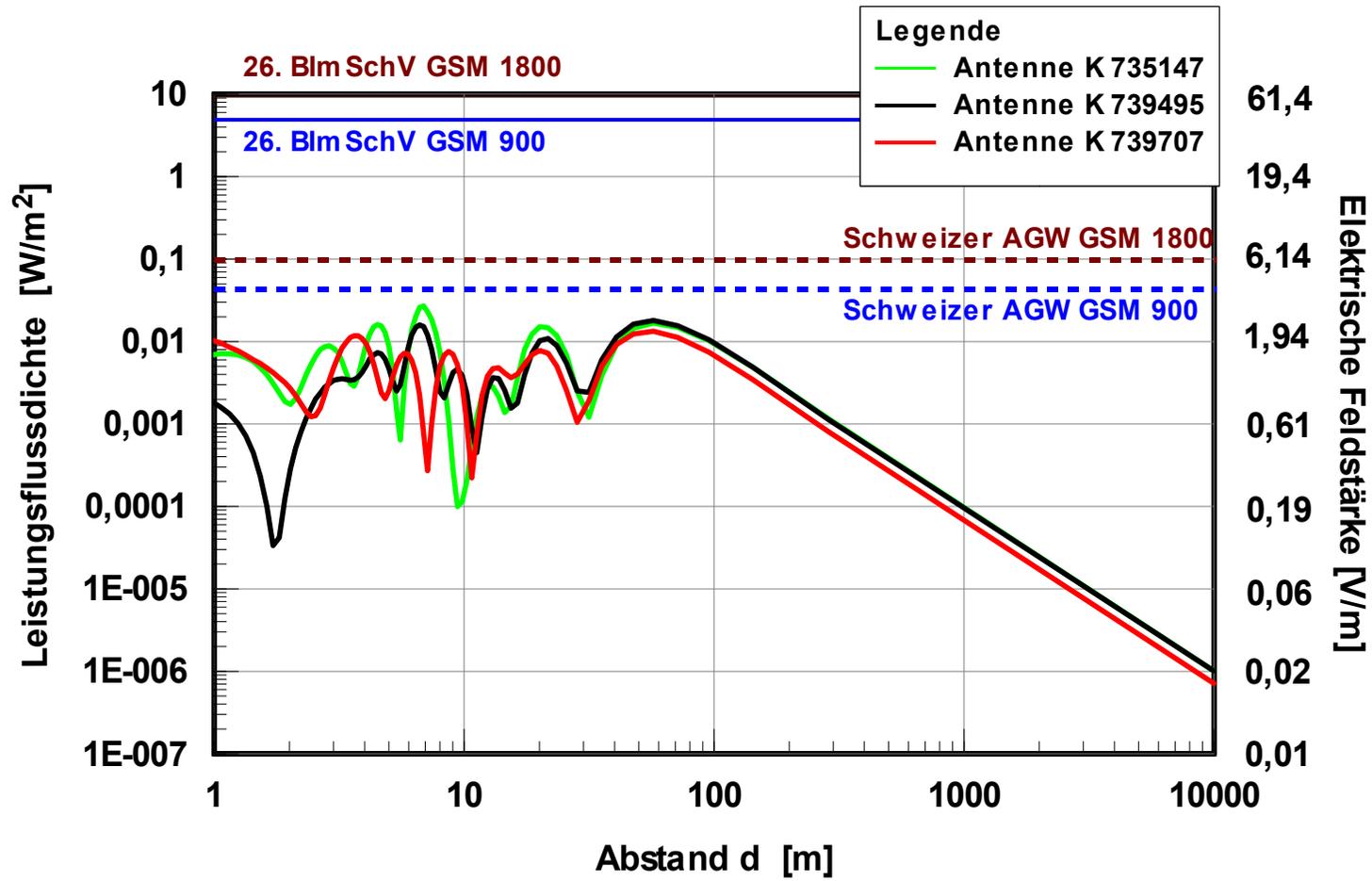


Bild 2.2.20 Verlauf der Immission in Abhängigkeit vom lateralen Abstand. Parametersatz 1 bei Variation des Antennentyps

2.2.6 Horizontale Ausrichtung

Üblicherweise werden pro Basisstation drei um 120° versetzte Sendeantennen betrieben, die jeweils einen Sektor (eine Funkzelle) ausleuchten. Durch diesen Versatz wird erreicht, dass durch eine Basisstation insgesamt ein nahezu kreisförmiger Bereich versorgt werden kann. Dies ist schematisch in Bild 2.2.21 dargestellt; wobei man hier, vergleichbar mit Bild 2.2.2 rechts, von oben auf die Antennen sieht. Die rote, blaue und grüne Kurve beschreiben die einzelnen Ausleuchtungen der drei versetzt aufgestellten Antennen. Die schwarze Kurve gibt die Summenimmission aller drei Einzelabstrahlungen an.

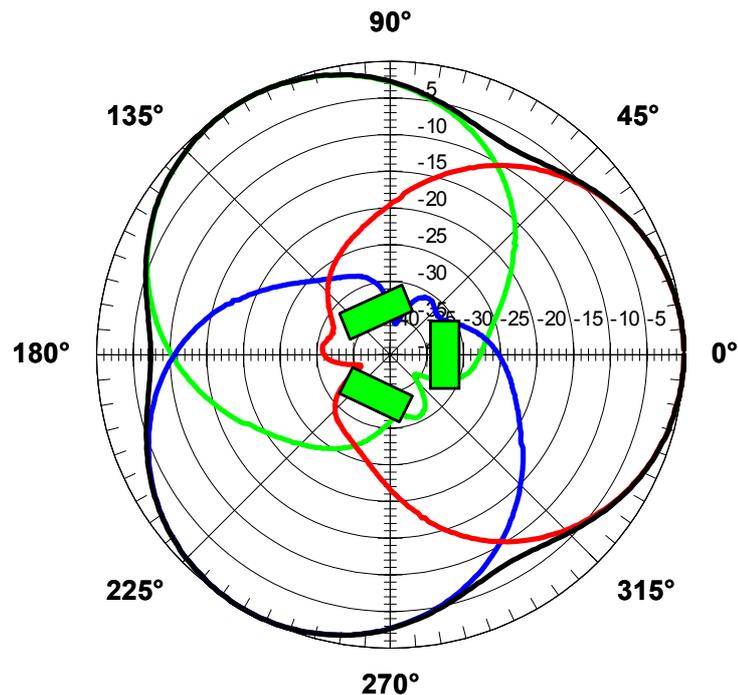


Bild 2.2.21 Ausleuchtung eines kreisförmigen Gebietes durch drei versetzt aufgestellte Antennen
K 735147

Aus Bild 2.2.21 wird deutlich, dass es je nach horizontaler Ausrichtung des Immissionsortes bezüglich der Sendestation Unterschiede in der Immission geben wird: Wohingegen die Immission dann maximal ist, wenn eine der Antennen voll auf den Immissionsort ausgerichtet ist (0° , 120° oder 240°), wird die Immission dann geringer sein, wenn sich der Immissionsort in dem Überlappungsbereich zwischen zwei Sektoren befindet (60° , 180° oder 300°). Zwar überlagern sich in diesem Überlappungsbereich die Abstrahlungen beider benachbarter Antennen zu einer resultierenden Abstrahlung, jedoch ist diese in diesem Beispiel immer noch deutlich kleiner als in Sektormitte.

Werden Antennen mit breiterer Azimutcharakteristik oder gar Rundstrahlcharakteristik eingesetzt, ist der Pegel einbruch im Überlappungsbereich zweier Sektoren nicht mehr so deutlich oder gar nicht mehr ausgeprägt. Wird hingegen eine Anlage mit nur zwei Sektoren betrieben, dann ist auf der „abgewandten“ Seite mit deutlich geringeren Immissionen zu rechnen.

Ein Beispiel für den Einfluss der horizontalen Ausrichtung des Messpunktes zur Anlage ist in Bild 2.2.22 dargestellt. Hier wurden Messungen bei unterschiedlichen Positionen um eine

Anlage durchgeführt. Alle Messpunkte befanden sich auf einem Kreis um die Anlage mit dem Radius 200 m, d.h. bei gleichem Abstand von der Anlage. Variiert wurde die Winkelposition. Die Ergebnisse zeigen, dass eine deutliche Abhängigkeit von der Ausrichtung zur Anlage besteht.

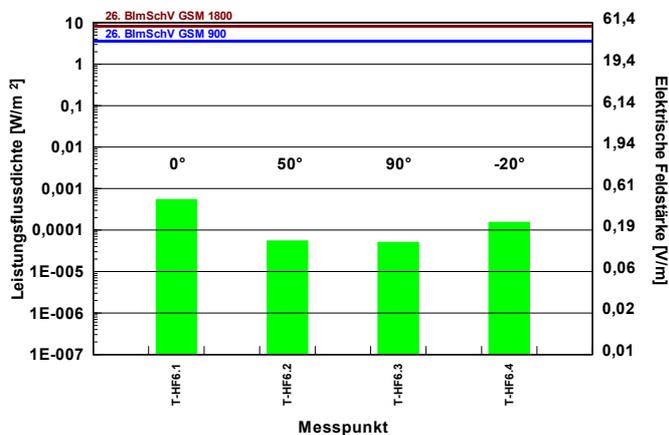


Bild 2.2.22 Winkelabhängigkeit der Immission am Beispiel T-HF6

2.2.7 Dämpfung durch Gebäude und andere Sichthindernisse

Die Untersuchung des Problems der Dämpfung durch Gebäude und andere Sichthindernisse ist vielschichtig. In Übereinstimmung mit Bild 2.2.23 umfasst dieser Themenkomplex die folgenden Fragestellungen:

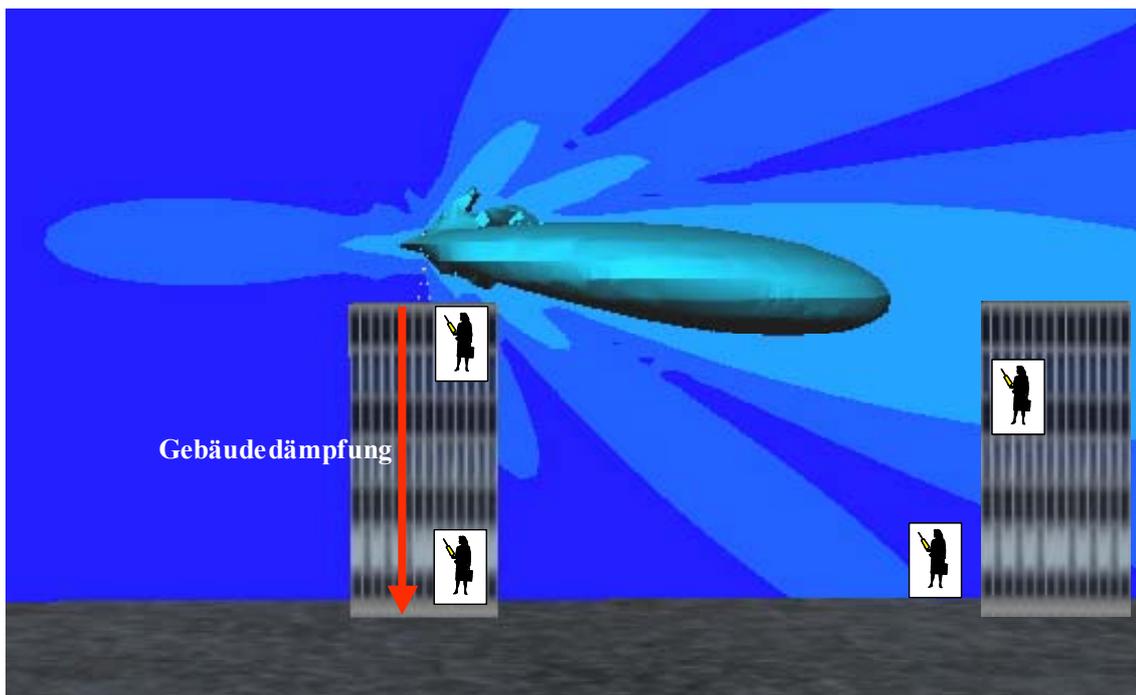


Bild 2.2.23 Verschiedene Aspekte der Dämpfung durch Gebäude

1. Lässt sich im Gebäude, auf dem die Anlage steht, eine Höhenabhängigkeit der Immission über der Geschosshöhe feststellen? Was für eine Rolle spielen Reflexionen an benachbarten Gebäuden?
2. Wie groß sind die Immissionen im Gebäude, auf dem die Sendeanlage steht, im Vergleich zu den Immissionen in benachbarten Gebäuden und an Außenmesspunkten? Wie groß ist insbesondere die Immission in der obersten Etage (Stichwort „Leuchtturmeffekt“ oder „Regenschirmeffekt“)? Dies hat direkte Auswirkungen auf die oft diskutierte Fragestellung, ob es bezüglich der Immissionsminimierung in einem besonders „schützenswerten“ Gebäude (sensibler Ort) günstiger ist, die Sendeanlage *auf* oder *neben* den sensiblen Ort zu stellen.
3. Lässt sich aus dem Vorgenanntem generell ein Unterschied in der Immission zwischen Innen- und Außenmesspunkten ableiten?
4. Wie kann die Dämpfung durch verschiedene Materialien beurteilt werden? Gibt es generelle Unterschiede in der Immissionen an Messpunkten, die freie Sicht haben, zu Messpunkten ohne freie Sicht zur Anlage? Inwieweit wird auch durch „natürliche“ Sichthindernisse wie z.B. Bäume eine Dämpfung verursacht? Welche Rolle spielen dabei jahreszeitliche Einflüsse, z.B. unterschiedlicher Laubanteil eines Baumes im Sommer und Winter?

2.2.7.1 Verteilung der Immissionen über der Geschosshöhe

Prinzipiell nimmt die Immission durch eine auf dem selben Gebäude betriebene Anlage in den darunter liegenden Wohnungen mit abnehmender Geschosshöhe ab. Dies ist durch die zunehmende Dämpfung durch das Deckenmaterial und durch Mobiliar begründet: Wohingegen im obersten Stockwerk nur eine Decke zwischen Sendeanlage und Wohnung liegt, sind es in der Wohnung drei Etagen weiter unten schon vier Decken. Die Bilder 2.2.24 und 2.2.25 belegen diese theoretischen Erwägungen in der Praxis. Hier ist vorerst nur der Anteil durch die Hauptsendeanlage gezeigt.

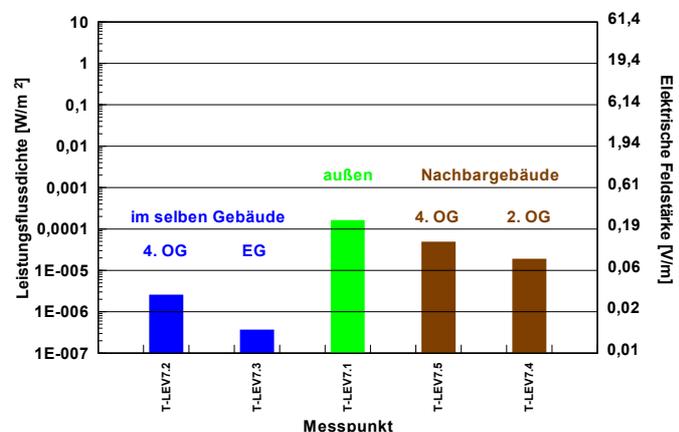


Bild 2.2.24 Gemessene Immissionen am Standort T-LEV7

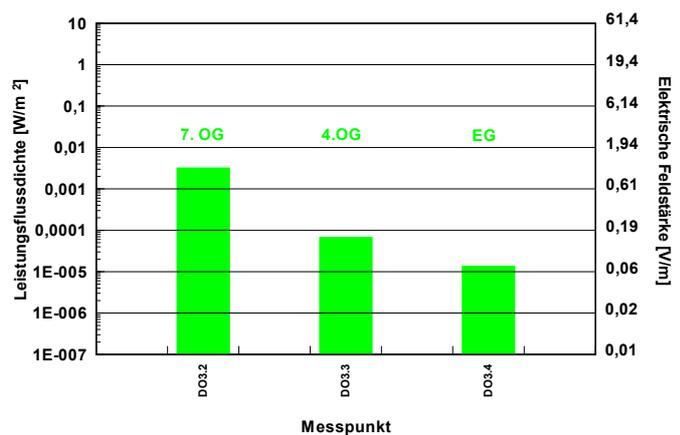


Bild 2.2.25 Verteilung der Immissionen über der Geschosstiefe am Standort DO3

Von dieser Verteilung gibt es in der Regel nur dann Ausnahmen, wenn in der unmittelbaren Nähe ein etwa gleich hohes Objekt, z.B. ein benachbartes Hochhaus, steht. An diesem können Reflexionen auftreten, die die gleichmäßige Abnahme der Immission mit abnehmender Geschosshöhe unterbrechen und in „mittelhohen“ Geschossen wieder zu einem Ansteigen der Immission führen. Bild 2.2.26 zeigt so einen Fall. Im 7. OG steigen die Immissionen an, wohingegen im Erdgeschoss die Immissionen am niedrigsten sind.

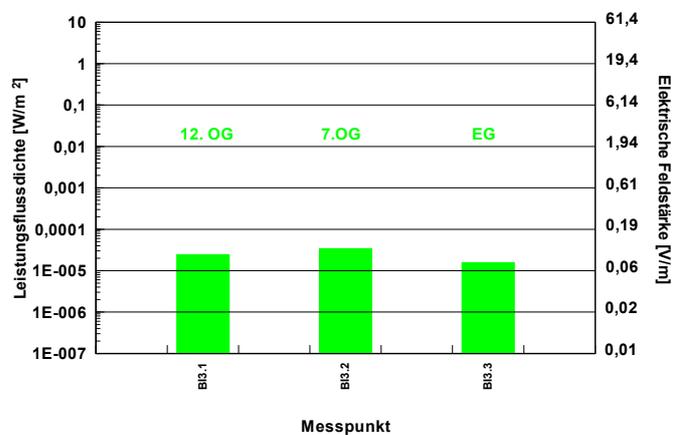


Bild 2.2.26 Erhöhung der Immission in der Gebäudemitte durch Reflexion am Nachbarhochhaus. Das benachbarte Hochhaus ist links dargestellt und verfügt auch über eine Sendeanlage, deren Anteil hier aber ausgeklammert wird

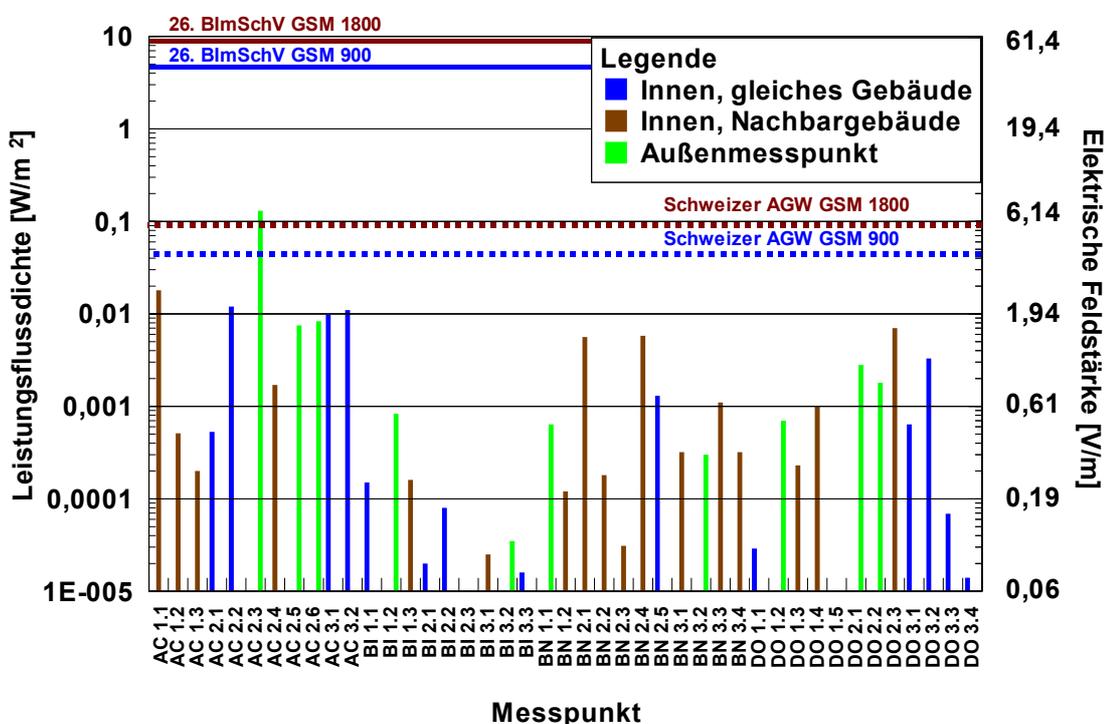
2.2.7.2 Innen- und Außenmesspunkte, Leuchtturmeffekt

Oftmals wird behauptet, dass die Immission im selben Gebäude, auf dem die Anlage steht, vor allem im obersten Stockwerk sehr klein im Vergleich zu den Immissionen in umliegenden Gebäuden bzw. an Außenmesspunkten ist. Dieser Umstand wird begründet mit der Feststellung, dass aufgrund der Abstrahlcharakteristik der Antenne nur sehr wenig Energie in das darunter liegende Gebäude gelangt. Auch die in Bild 2.2.24 dargestellten Immissionsverhältnisse scheinen diese Theorie zu bestätigen. Ob diese Aussage generell gültig ist, soll in diesem Abschnitt geklärt werden.

In Bild 2.2.27a und b sind die Messpunkte der Messreihen *IMST 1 und 2* danach sortiert, ob es sich bei den Messpunkten um solche im selben Gebäude der Anlage, in einem Nachbargebäude oder um einen Außenmesspunkt handelt. Als Außenmesspunkte wurden hier auch solche gewertet, die sich zwar in einem Gebäude, aber auf dem Balkon befanden. Es ist wiederum nur der Anteil der Hauptsendeantenne erfasst.

Entgegen den Erwartungen kann man aus den Bildern nicht schließen, dass an Außenmesspunkten generell eine höhere Immission vorliegt als an Innenmesspunkten. Eventuell vorhandene Dämpfung durch Fenster oder Mauerwerk kann durchaus durch die „günstigere“ Lage bezüglich der Sendeantenne wettgemacht werden.

Als weitere interessante Aussage kann abgeleitet werden, dass offenbar nicht grundsätzlich die Wohnungen im Gebäude der Anlage besonders niedrige Immissionen aufweisen. Diese können zwar oft vergleichsweise niedrig sein, stellenweise aber auch höhere Werte annehmen. Dies ist noch einmal in Bild 2.2.28 dargestellt, wo speziell alle Messpunkte im obersten Geschoss direkt unterhalb der Anlage zusammengefasst sind.



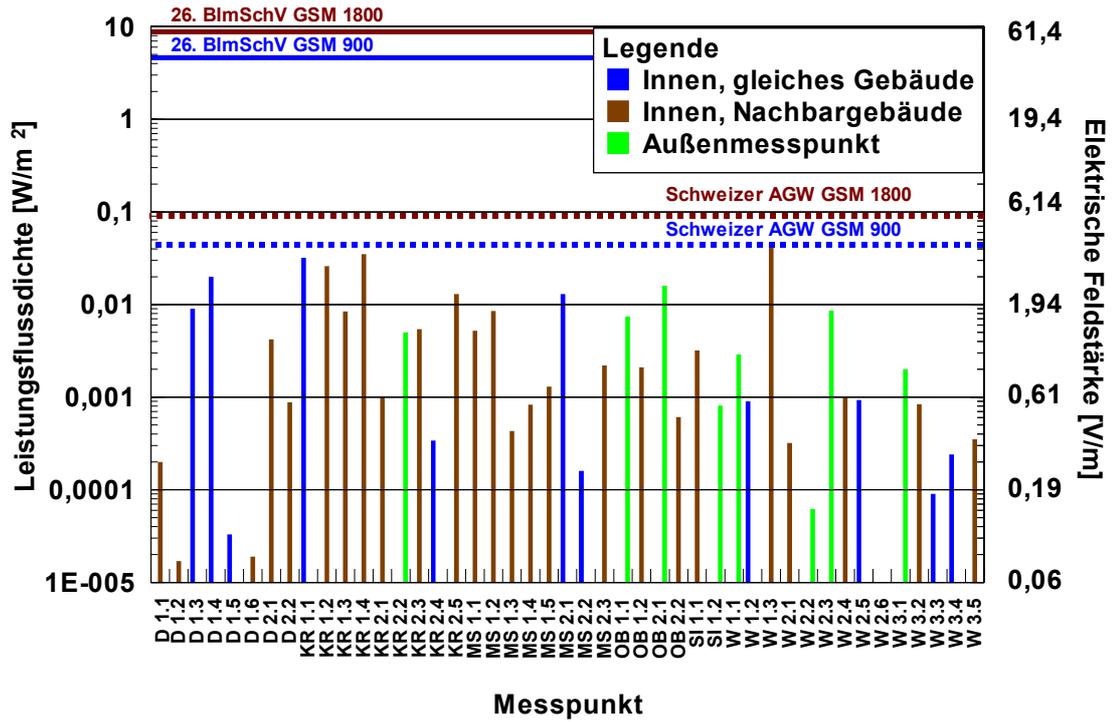


Bild 2.2.27a Nach Lage sortierte Messpunkte der Reihe *IMST 1*

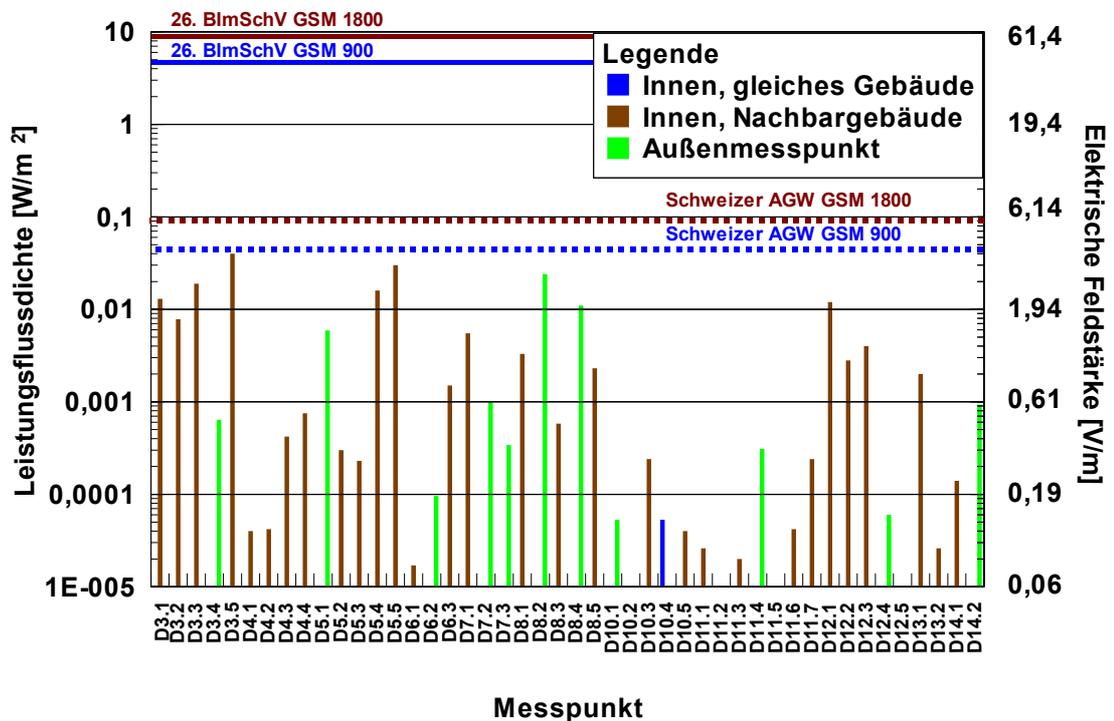


Bild 2.2.27b Nach Lage sortierte Messpunkte der Reihe *IMST 2*

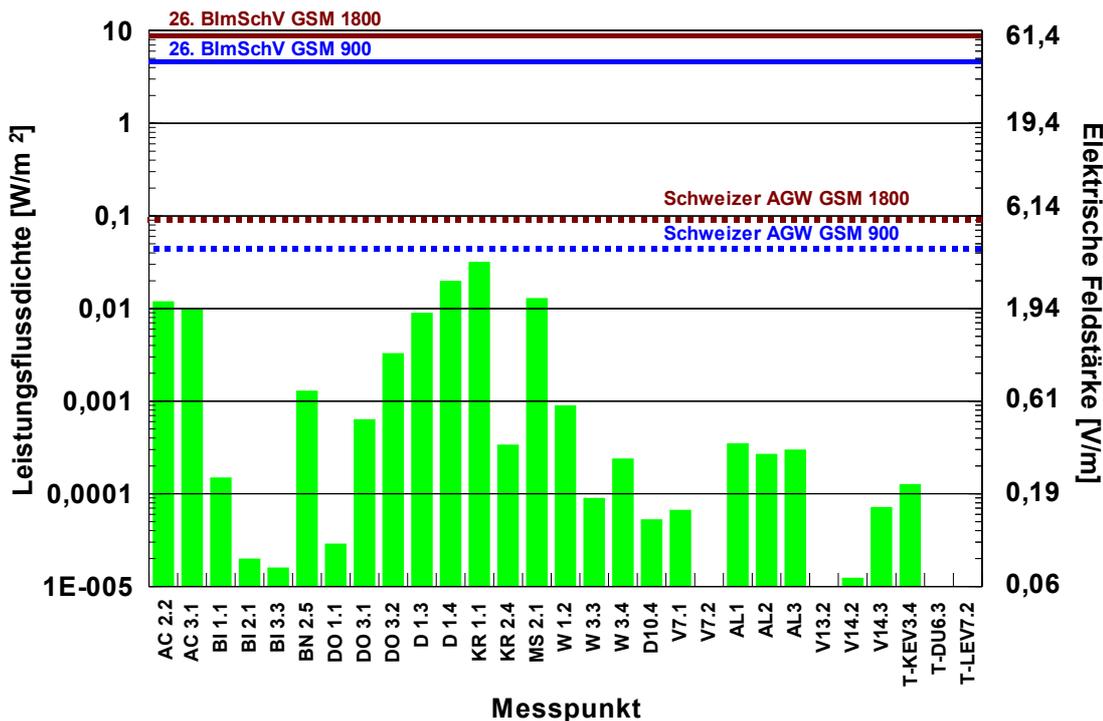


Bild 2.2.28 Messpunkte im obersten Geschoss im Gebäude der Anlage

Diese Tatsache ist erstaunlich, da alle diese Messpunkte von ihrer Lage zur Sendeantenne wesentlich vergleichbarer sind als die Vielzahl der anderen Messpunkte. Trotzdem ist die Schwankungsbreite der Immission erheblich; sie beträgt mehr als drei Zehnerpotenzen bezüglich der Leistungsdichte. Es kann die Vermutung aufgestellt werden, dass diese Schwankungen mit der Anzahl der Kanäle der Anlage korreliert. Dies wird in Bild 2.2.29 überprüft.

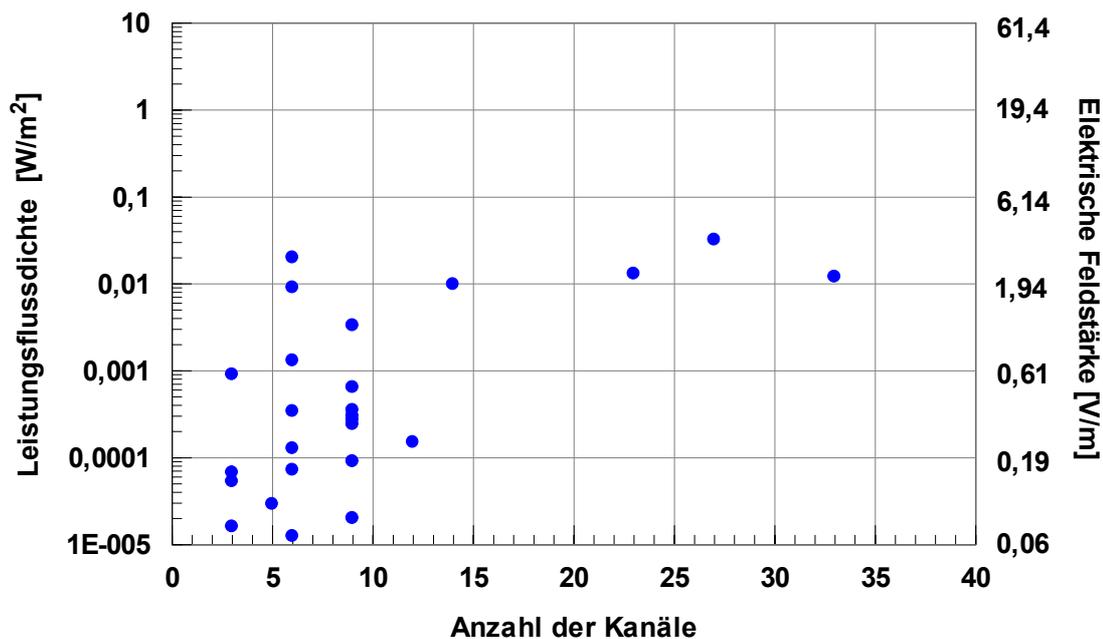


Bild 2.2.29 Korrelation von Messpunkten im obersten Geschoss im Gebäude der Anlage und Kanalzahl

Hier ist nun wieder eine recht klare Tendenz zu erkennen: Geringe Immissionen finden sich vorrangig bei Anlagen, die mit wenigen Kanälen bestückt sind. Hohe Sendeleistungen verursachen tendenziell höhere Immissionen. Allerdings kann auch hier wieder nicht der pauschale Schluss gezogen werden, dass hohe Immissionen *nur* bei hohen Sendeleistungen auftreten.

Als weitere Ursache für diese starken Schwankungen der Immission im obersten Stockwerk eines Gebäudes mit Anlage werden Abhängigkeiten vom Deckenmaterial und vom Antennentyp vermutet. Bezüglich der Antennen gibt es verschiedene Typen, die eine relativ starke Nebenstrahlrichtung schräg nach unten aufweisen.

Zusammenfassend wird festgestellt, dass die pauschale Aussage, dass in Wohnungen unterhalb der Anlage *generell* besonders niedrige Immissionen, verglichen mit der Umgebung, auftreten, nicht gültig ist. Es ist jedoch richtig zu konstatieren, dass hier die Immissionen niedriger sind, als der geringe radiale Abstand zur Sendeanlage vermuten ließe.

In [BAL 03] wurde kürzlich das Problem der Bestimmung der Immission im obersten Stockwerk numerisch mit einem Vollwellenansatz betrachtet. Für realistische Sendeleistungen liegen die dort errechneten Immissionswerte durchaus in derselben Größenordnung, wie sie oben messtechnisch festgestellt wurden.

2.2.7.3 Dämpfung durch Sichthindernisse

Besteht von einem Immissionsort freie Sicht zur Anlage, dann steht zu vermuten, dass am Immissionsort eine größere Immission vorliegt als an Orten ohne freie Sicht zur Anlage. Die Dämpfung durch das Hindernis kann dann wie eine Reduzierung der Sendeleistung der Anlage betrachtet werden (Bild 2.2.15). Bei Messpunkten ohne direkte Sicht hingegen gelangen Immissionsanteile vorrangig durch Reflexion- und Beugungserscheinungen zum Immissionsort. Im folgenden soll anhand der Messergebnisse das Verhältnis der Immissionen bei vorhandenen und nicht vorhandenen Sichtbedingungen untersucht werden.

Auch wenn hier vor allem an der Reihe *IMST 1* wieder eine pauschale Aussage dahingehend schwer fällt, dass an Messpunkten mit Sicht zur Anlage *generell* höhere Immissionen als an solchen ohne freie Sicht vorliegen würden, kann man diese Aussage an den verschiedenen Einzelmessungen *um ein und die selbe Anlage* sehr oft beobachten: Beispiele sind die Messpunkte AC1, AC2, BI1, BI3, BN1 usw., wo diese Aussage sehr wohl zutrifft. Bei der Messreihe *IMST 2* gilt die Aussage sogar nahezu pauschal. Trotzdem gibt es auch hier einige bemerkenswerte Ausnahmen (z.B. W1 oder D13), was zum großen Teil auf eine „ungünstige“ Lage der Messpunkte ohne Sicht (vor allem bezüglich Höhenunterschied) zurückzuführen ist.

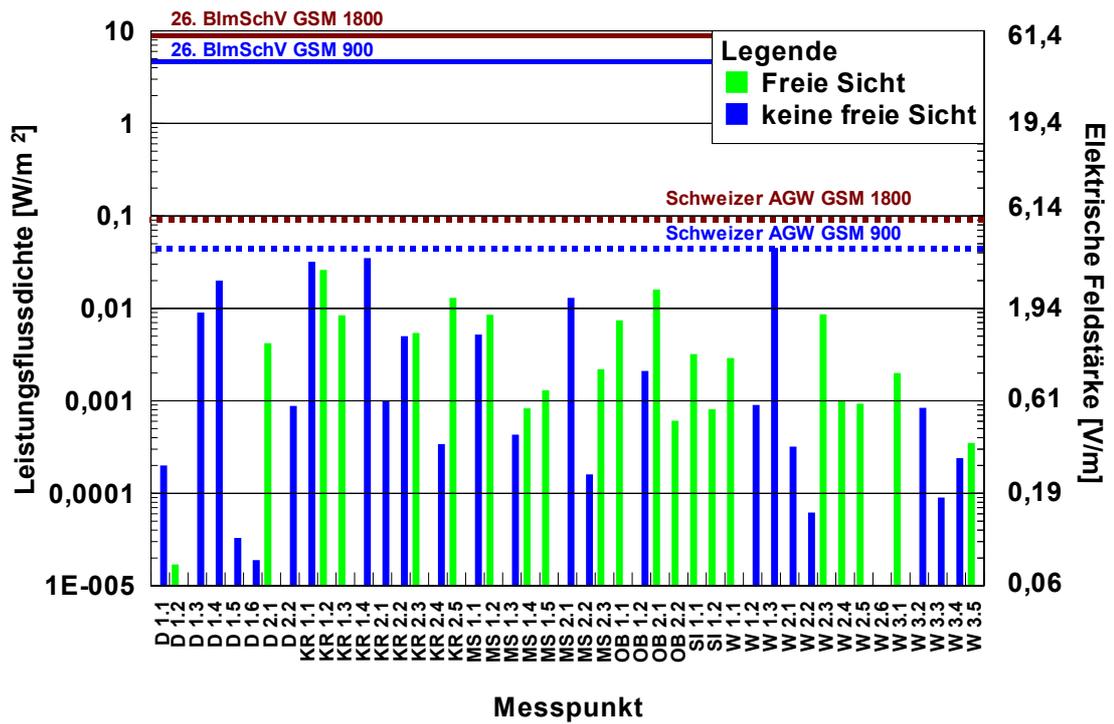
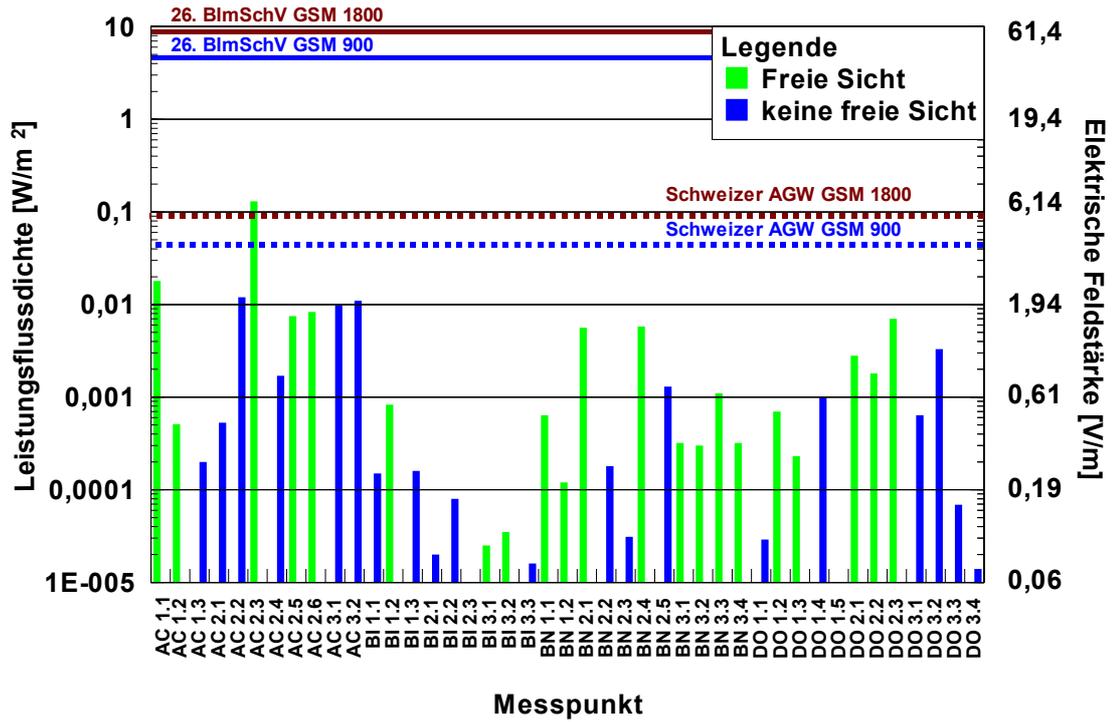
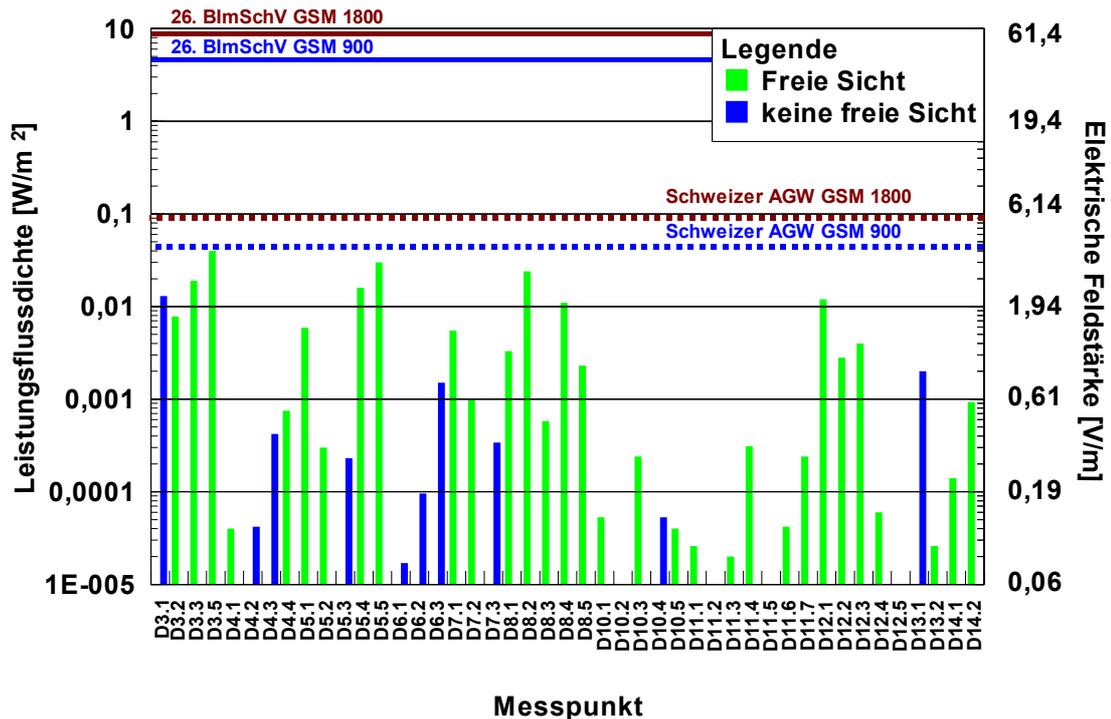


Bild 2.2.30a Einteilung der Messpunkte der Messreihe *IMST 1* nach Sichtbedingungen

Bild 2.2.30b Einteilung der Messpunkte der Messreihe *IMST 2* nach Sichtbedingungen

Sichthindernisse zwischen Immissionsort und Sendeantenne können Gebäude, Wände oder auch Vegetation sein. Dämpfungsmessungen dieser Objekte sind vor allem innerhalb von Innenräumen mit großen Fehlern behaftet. Es ist nur sehr eingeschränkt möglich, an einem Messpunkt, der freie Sicht (Fenster) zur Sendeanlage hat, die Immission zu ermitteln und mit derjenigen zu vergleichen, die 2 m weiter seitlich vorliegt, wo eine Raumwand die Sicht zum Sender behindert, und aus dem Unterschied die Dämpfung der Raumwand zu bestimmen. Ursache ist hierbei der stark unregelmäßige Feldverlauf (siehe unten), so dass man beim ermittelten Immissionsunterschied zwischen Fenster/Wand nicht sagen kann, ob tatsächlich die Wand dafür verantwortlich war oder man bei der Messung an der Wand gerade ein Minimum der schwankenden Immissionskurve gefunden hat. Solche Dämpfungsbestimmungen sind deswegen besser unter Laborbedingungen, z.B. in einer Absorberkammer oder in einem Wellenleitersystem zu bestimmen, wo Fehler durch umliegende Reflexionen begrenzt werden können.

Eine sehr umfangreiche und praxisrelevante Abhandlung zu solchen Messungen unter Laborbedingungen und den dabei erzielten Ergebnissen enthält z.B. [PAU 00, PAU 03] oder [LFU 03]. Auch in [BOR 98] gibt es diesbezügliche Aussagen; hier sind aus messtechnisch ermittelten Materialparametern Dämpfungsberechnungen durchgeführt worden.

Schließlich gibt es unter dem Vorbehalt des oben Gesagten einige Erfahrungswerte der zahlreich durchgeführten Messungen: So dämpft normales Fensterglas bei senkrechtem Einfall der Mobilfunkstrahlung (Anlage direkt sichtbar) nicht nennenswert; beschichtetes Fensterglas jedoch (z.B. in klimatisierten Büros) kann hingegen 20 dB bis 30 dB Dämpfung aufweisen (dies entspricht einem Faktor von 100 bis 1000 bezüglich der Leistungsdichte). Dies wurde z.B. bei Messungen als Unterschied zwischen geschlossenem und offenem Fenster an den Messpunkten V15.3 und T-K1.4 festgestellt. Eine Gebäudeaußenwand hat

typischerweise Dämpfungen im Bereich von 5 dB bis 10 dB, stellenweise auch bis 20 dB (Faktor 3 bis 10, stellenweise bis 100 bezüglich der Leistungsflussdichte). Diese Angaben gelten nur für den mobilfunktypischen Frequenzbereich.

Auch Vegetation, z.B. im Sichtpfad stehende Bäume oder Sträucher, dämpfen die von Mobilfunkanlagen ausgehenden Emissionen. Die Dämpfung ist hier u.a. abhängig vom Volumenverhältnis zwischen Ästen und Blättern. Dieses Verhältnis wird im Winter anders sein als zu den anderen Jahreszeiten; je nach Polarisation der Welle können sich hier also jahreszeitliche Unterschiede in der Gesamtdämpfung ergeben. In [MÖN 03] sind hierzu theoretische Abschätzungen vorgenommen worden, die mit Messungen verifiziert wurden. Danach kann die Dämpfung durch einen belaubten Baum durchaus in der selben Größenordnung wie bei einer Gebäudeaußenwand liegen. Im Winter ist wegen des fehlenden Blattanteils mit geringerer Dämpfung zu rechnen.

2.2.8 Beiträge von benachbarten Mobilfunkanlagen

Bislang wurden alle Auswertungen primär auf die Immissionsbeiträge der *Hauptsendeanlage*, d.h. der direkt vor Ort befindlichen Sendeanlage, bezogen. In diesem Abschnitt soll untersucht werden, ob dies bei der Beurteilung der Gesamtmission durch Mobilfunk an einem in direkter Nähe der Station befindlichen Messpunkt gerechtfertigt ist bzw. wie groß der Anteil benachbarter Sendeanlagen am Messpunkt ist.

Eine Antwort auf die Frage geben die Bilder 2.1.1 und 2.1.2. Bei diesen Messreihen ist der Anteil der Hauptsendeanlage zur Gesamtmission durch Mobilfunk getrennt ausgewiesen. Es ist ersichtlich, dass an einer Vielzahl der Messpunkte die Hauptsendeanlage die Gesamtmission dominiert. Hiervon gibt es jedoch auch einige bemerkenswerte Ausnahmen. Man beachte hierbei die logarithmische Darstellung, d.h. ist der Balken „Mobilfunk gesamt“ nur geringfügig höher als der Balken „Hauptsendeanlage“, kann dies schon eine Dominanz der Immission durch umliegende Stationen bedeuten. Solche Ausnahmen bilden z.B. die Messpunkte BI 2.1-2.3, BI 3.1-3.3, DO1.1, D1.2, W2.1, D6.1-6.3. Bei den Messpunkten D9 war die Hauptsendeanlage zur Zeit der Messungen noch nicht in Betrieb, deswegen sind hier nur die Beiträge umliegender Anlagen eingetragen.

Ein Quervergleich dieser vom Allgemeintrend abweichenden Messpunkte mit Bild 2.2.27 zeigt, dass es sich teilweise um Messpunkte handelt, die sich im selben Gebäude wie die Hauptsendeanlage befinden, und dort vorrangig in oberen Geschossen. Gerade diese Messpunkte sind aber bezüglich freier Sichtverhältnisse und vertikaler Ausrichtung (geringer Höhenunterschied – Hauptstrahlrichtung) *sichtbarer* für umliegende Anlagen. Wenn dann, wie oftmals vorhanden, die Immission durch die darüber gelegene Anlage vergleichsweise gering ist, kann der Beitrag umliegender Stationen zur Gesamtmission wesentlich höher als durch die Anlage auf dem Dach sein.

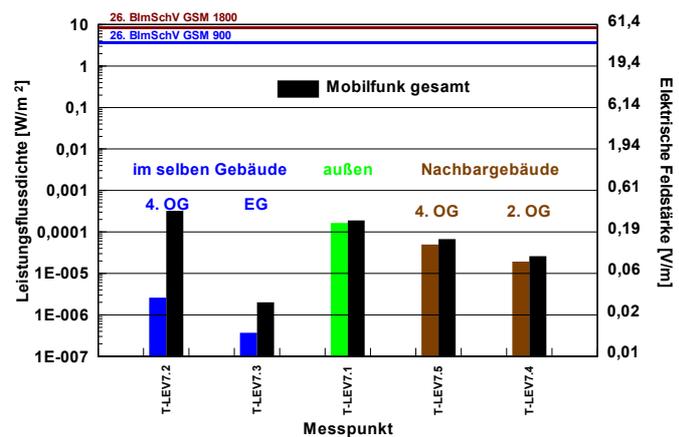


Bild 2.2.31 Gemessene Immissionen am Standort T-LEV7

Hervorragend ist dies in Bild 2.2.31 zu sehen. Es handelt sich um den schon in Bild 2.2.24 zitierten Messpunkt T-LEV7. Wird nur die Hauptsendeanlage auf dem Dach des Gebäudes betrachtet, sind die Ergebnisse nahezu klassisch: Im selben Gebäude sind die Immissionen kleiner als an umliegenden Gebäuden oder im Außenraum und nehmen über die Geschosstiefe hin ab. Berücksichtigt man jedoch auch die Beiträge der umliegenden Stationen, sehen die Verhältnisse grundlegend anders aus: Plötzlich liefert der Messpunkt direkt unter der Anlage den höchsten Immissionswert. Bezeichnenderweise ist der Unterschied zwischen den Immissionen von Hauptsendeanlage und Mobilfunk gesamt an den beiden Messpunkten im Gebäude der Hauptsendeanlage am größten (und davon im obersten, d.h. am besten „sichtbaren“ Messpunkt am höchsten), wohingegen der Zuwachs an den umliegenden Messpunkten (Nachbargebäude und Außenmesspunkt) eher unbedeutend ist.

Dies unterstreicht auf eindrucksvolle Weise die Aussage, dass zur Beurteilung der Immission an einem festen Ort oftmals eine ganzheitliche Betrachtung vonnöten ist. Das bedeutet, dass vor allem an Messpunkten, die bezüglich der Hauptsendeanlage abgeschirmt sind, auch die umliegenden Mobilfunkanlagen in die Betrachtung einbezogen werden müssen, da sonst erhebliche Unterschätzungen der Immissionssituation auftreten können.

2.2.9 Sonstiges

In diesem Abschnitt wird auf den schon oben erwähnten Versuch einer Eingruppierung der Messpunkte in verschiedene morphographische Klassen eingegangen, d.h. der Frage nachgegangen, ob sich die Immission im Umfeld von Anlagen in Städten anders verhält als im außerstädtischen Bereich.

Außerdem werden die Mobilfunkimmissionen anderen HF-Immissionen, die z.B. durch Rundfunk- und TV-Sender, aber auch durch DECT-Telefone entstehen können, gegenübergestellt.

2.2.9.1 Vergleich der Immissionen in städtischen und außerstädtischen Bereichen

Interessant ist die Fragestellung, ob es Unterschiede hinsichtlich der Größe der Mobilfunkimmissionen im Umfeld von Sendeanlagen in Abhängigkeit der Landnutzungsclass gibt, bzw. ob man z.B. im Umfeld einer Mobilfunkanlage im innerstädtischen Bereich eine größere Immission erfährt als im außerstädtischen bzw. ländlichen Bereich.

Aufgrund der geringeren Stationsdichte im außerstädtischen Bereich wird hier vermutlich die *flächenmäßig durchschnittliche* Immission geringer sein als im innerstädtischen Bereich. Genau diese These hat sich in der Messreihe *Baden-Württemberg* bestätigt [BOCH 03]. Da hier die Messpunkte katastermäßig, und nicht speziell in der Nähe von Mobilfunksendeanlagen ausgewählt wurden, sind die Ergebnisse exakt als flächenmäßige Mittelwerte interpretierbar. Aus Bild 2.2.32 [BOCH 03] ist in der Tat zu entnehmen, dass innerorts Mobilfunk eine größere durchschnittliche Immission verursacht als außerorts. Die Immissionen sind hier als Prozent des (Feldstärke-) Grenzwerts angegeben.

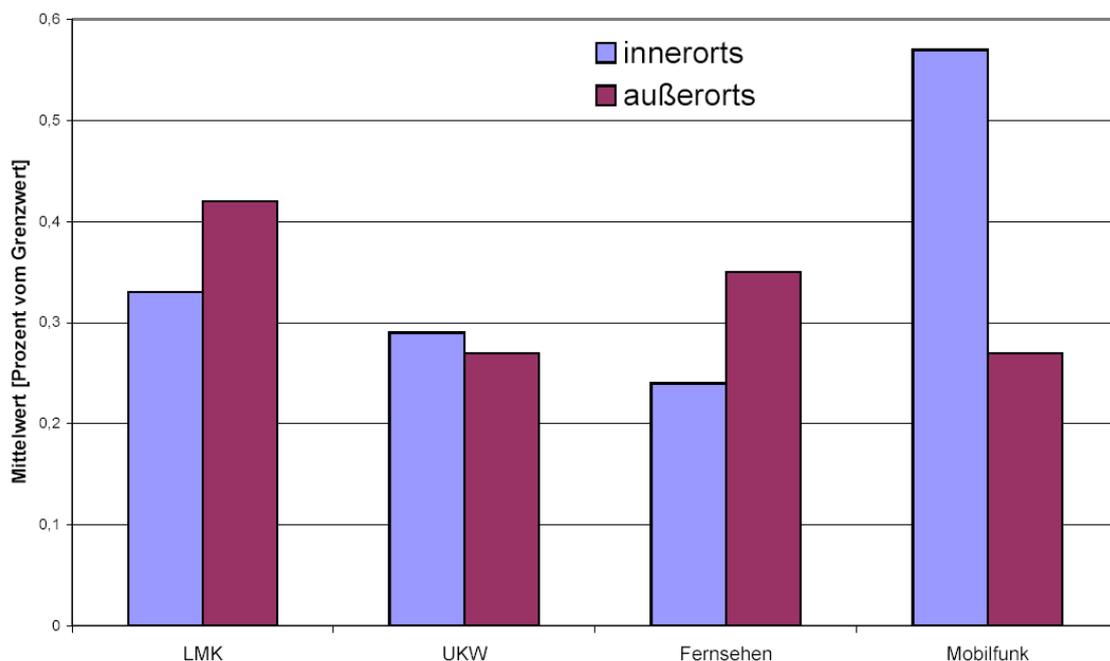


Bild 2.2.32 Ergebnisse des Baden-Württemberg Messprojektes [BOCH 03]: Durchschnittliche Beiträge der einzelnen Funkdienste zu den Immissionen je nach geografischer Lage der Messorte

Für vorliegende Untersuchungen ist aber nicht eine *mittlere flächenmäßige* Immission durch Mobilfunk interessant, sondern die Immission im direkten Umfeld von Mobilfunksendeanlagen bis zu einer Entfernung von 200 m, so dass hier die Stationsdichte nur im Rahmen der Anteile durch benachbarte Stationen eingehen kann. Nach den bislang untersuchten Einflussfaktoren sind vor allem solche Einflussfaktoren wie die Lage des Immissionsortes zur Basisstation (Höhe, Ausrichtung, Entfernung) sowie technische Anlagendaten (Leistung, Ausrichtung, Antennen, Downtilt) usw. entscheidend. Da die Lage eines Immissionsortes zur Basisstation in städtischem und außerstädtischen Bereich durchaus vergleichbar sein kann, bleiben als Faktoren für mögliche Unterschiede in den Immissionen die Anlagendaten: Bei innerstädtischen Anlagen sind oft mehrere Kanäle pro Netzbetreiber (Kapazitätsaspekt) vorhanden als im außerstädtischen Bereich, wo in erster Linie eine Netzabdeckung erreicht werden soll.

Außerdem wird im innerstädtischen Bereich öfter mit größeren Downtiltwinkeln operiert als auf dem Land. Im folgenden wird anhand der messtechnischen Daten untersucht, ob sich diese Unterschiede in den Messwerten wiederfinden.

Dazu werden die Messwerte der Messreihen *IMST 1 und 2* in die drei Klassen

- Großstadtinnenbereich,
- Stadtbereich
- Kleinstadt- / ländlicher Bereich

untergliedert.

Die Ergebnisse sind in den Bildern 2.2.33a bis c dargestellt. Klare Unterschiede sind hier schwer auszumachen. Aber es gibt in der Tat Tendenzen dahingehend, dass in der Klasse Großstadtzentrum die Immissionen im Durchschnitt höher sind. Allerdings sind die absoluten Spitzenwerte nicht nennenswert unterschiedlich. Das spricht dafür, dass, wie schon in den vorangegangenen Abschnitten festgestellt, die Lage des Messpunktes zur Basisstation das entscheidende Kriterium ist.

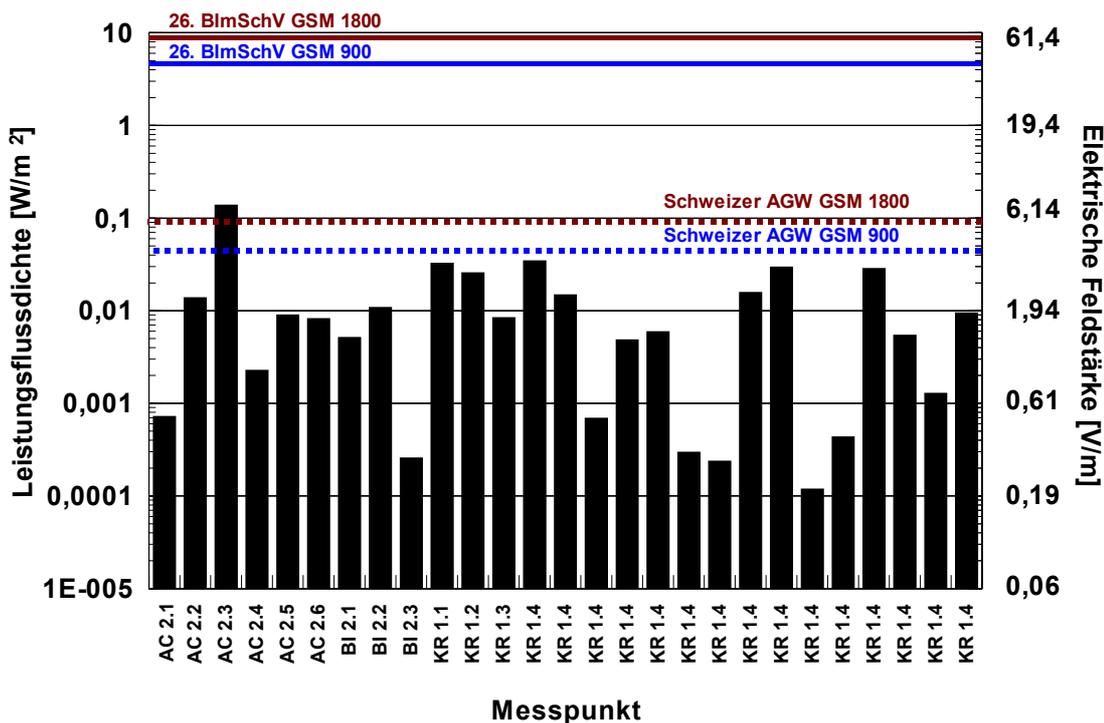


Bild 2.2.33a Messwerte (Mobilfunk gesamt) für die Klasse Großstadtzentrum: Mittelwert 0,015 W/m²

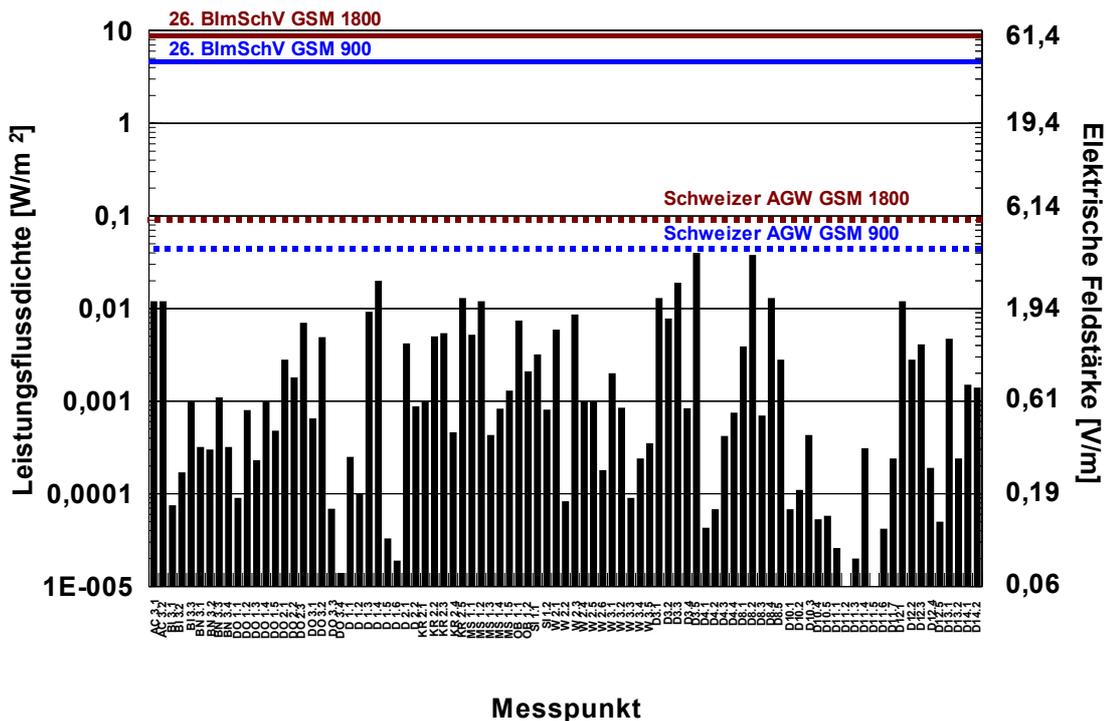


Bild 2.2.33b Messwerte (Mobilfunk gesamt) für die Klasse Stadt: Mittelwert $0,0037 W/m^2$

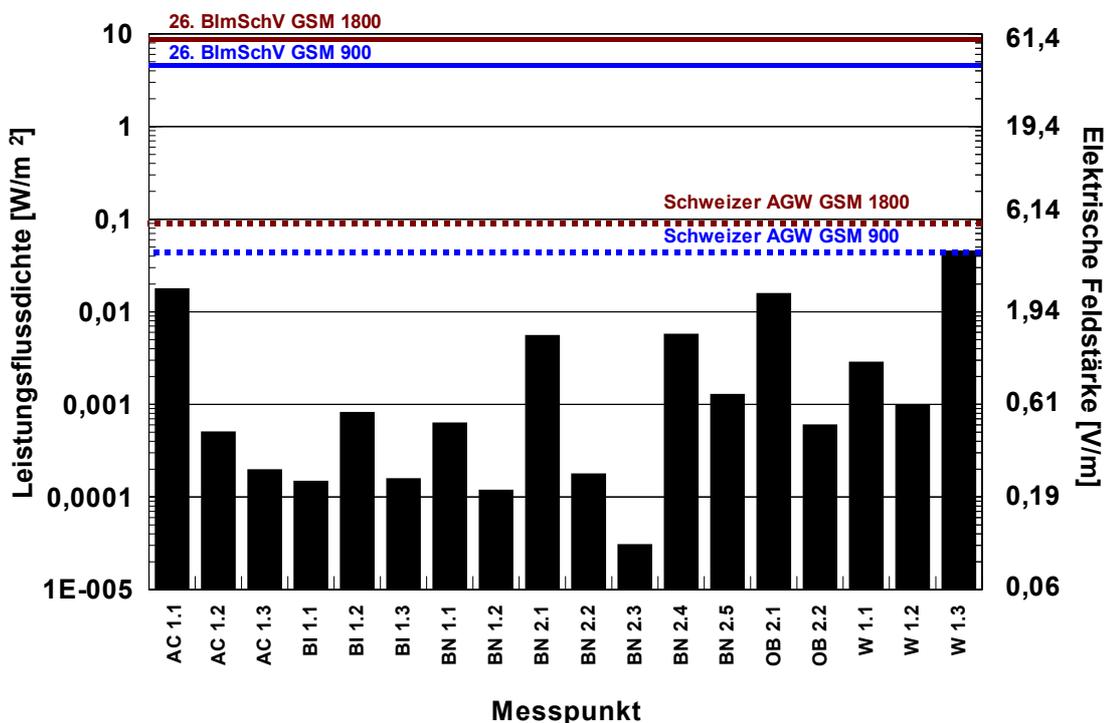


Bild 2.2.33c Messwerte (Mobilfunk gesamt) für die Klasse Kleinstadt/Land: Mittelwert $0,0056 W/m^2$

2.2.9.2 Vergleich der Immissionen durch Mobilfunkanlagen zu anderen HF Immissionen

Eine interessante Fragestellung ist diejenige nach dem Verhältnis der Mobilfunkimmissionen zu den Immissionen anderer HF Quellen, also z.B. von Rundfunk- oder Fernsehsendern. Hierbei wird oft behauptet, dass auch in unmittelbarer Nähe zu Mobilfunkanlagen die Immissionen durch andere HF Sendeanlagen dominieren und Mobilfunkimmissionen nur mit wenigen Prozent zur Gesamtimmission an einem Messpunkt beitragen.

Sicherlich ist es richtig, dass vor allem Rundfunk- und Fernsehsender im Kilowatt- oder sogar Megawattbereich arbeiten, wohingegen Mobilfunkanlagen maximal einige Zehn Watt abstrahlen. Es bleibt jedoch zu untersuchen, wie sich das Verhältnis nicht flächengemittelt, sondern direkt in der Umgebung einer Mobilfunkstation darstellt.

Hierzu wurden in der Messreihe *IMST 1* frequenzselektive Messungen in einem größeren Frequenzbereich durchgeführt, wobei die untere Frequenzgrenze 10 kHz war. Bild 2.2.34 zeigt das Ergebnis für diejenigen Messpunkte, an denen neben Mobilfunkimmissionen auch andere Immissionen gemessen wurden. Die eingezeichneten Grenzwerte beziehen sich nur auf den Mobilfunkfrequenzbereich.

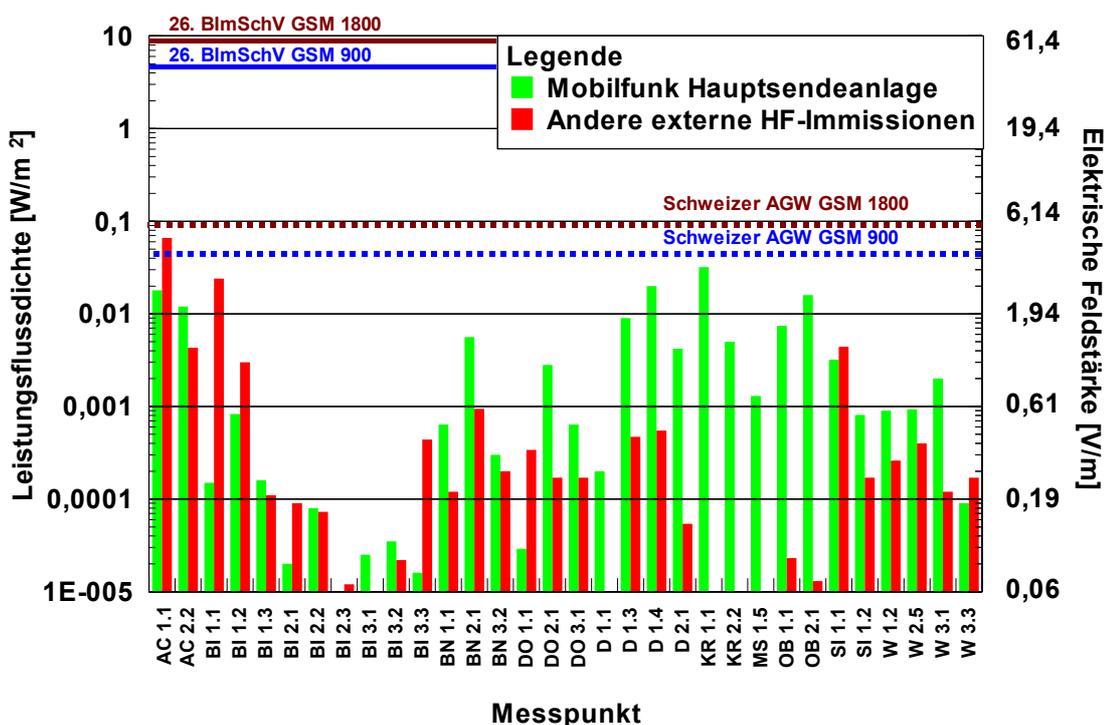


Bild 2.2.34 Vergleich von Mobilfunkimmissionen zu anderen externen HF Immissionen, Reihe *IMST 1*

Das Ergebnis zeigt, dass hier nicht pauschal von einer Dominanz der Immissionen durch andere HF Quellen gesprochen werden kann. Die Verhältnisse können von Standort zu Standort wechseln. Nach den Erfahrungen der Verfasser dominieren vor allem in Innenstädten sehr häufig die Mobilfunkimmissionen in unmittelbarer Nähe einer Basisstation, wohingegen es im ländlichen Bereichen stellenweise auch zu einer Umkehrung dieses Verhältnisses kommen kann. Als Erklärung dafür wird vermutet, dass die Wahrscheinlichkeit, in die Nähe eines leistungsstarken Rundfunk- oder Fernsehsenders zu gelangen, im innerstädtischen

Bereich sehr viel kleiner als im außerstädtischen Bereich ist, wohingegen im Innenstadtbereich die Basisstationsdichte wesentlich größer ist als außerstädtisch.

Prinzipiell kommt die Baden-Württembergischer Untersuchung [BOCH 03-1 bis 03-3] zu ähnlichen Ergebnissen, zumindest bezüglich der unterschiedlichen Größenordnung der Immissionen durch Rundfunk- und Fernsehsender im inner- und außerstädtischen Bereich. Das ist sehr gut in Bild 2.2.32 zu erkennen: Die flächengemittelten Immissionen durch Lang-, Mittel- und Kurzwellensender (LMK) sowie Fernsehsender ist im innerstädtischen Bereich kleiner als im außerstädtischen Bereich. Allerdings zeigt Bild 2.2.32 auch, dass die additive Überlagerung der Nicht-Mobilfunkimmissionen im Mittel sowohl inner-, als auch außerstädtisch höher ist als die Mobilfunk Immissionen. Dieses Ergebnis kommt aber vermutlich aufgrund des katasterartigen Ansatzes zustande, d.h. der nicht generellen Messung im *direkten* Umfeld einer Mobilfunkanlage. Mobilfunkanlagen sind in ihrem unmittelbaren Umfeld bezüglich ihrer Immissionen als Punktquellen anzusehen, wohingegen die Immission durch die leistungsstarken Rundfunk- und Fernsehsender in einiger Entfernung wesentlich „gleichmäßiger“ ist. Somit wird sich das Verhältnis von Mobilfunk- zu anderen HF Immissionen *in direkter Nähe* einer Mobilfunkanlage anders gestalten als in größerer Entfernung von der Mobilfunkanlage.

In Bild 2.2.35 ist der Vergleich der Mobilfunkimmissionen mit einer speziellen anderen Quelle von HF Immissionen dargestellt: Hierbei sind die Immissionen durch die in Wohnungen betriebenen schnurlosen DECT Telefone erfasst. Der Grenzwert für DECT Telefone ist ähnlich wie für GSM 1800 Mobilfunk.

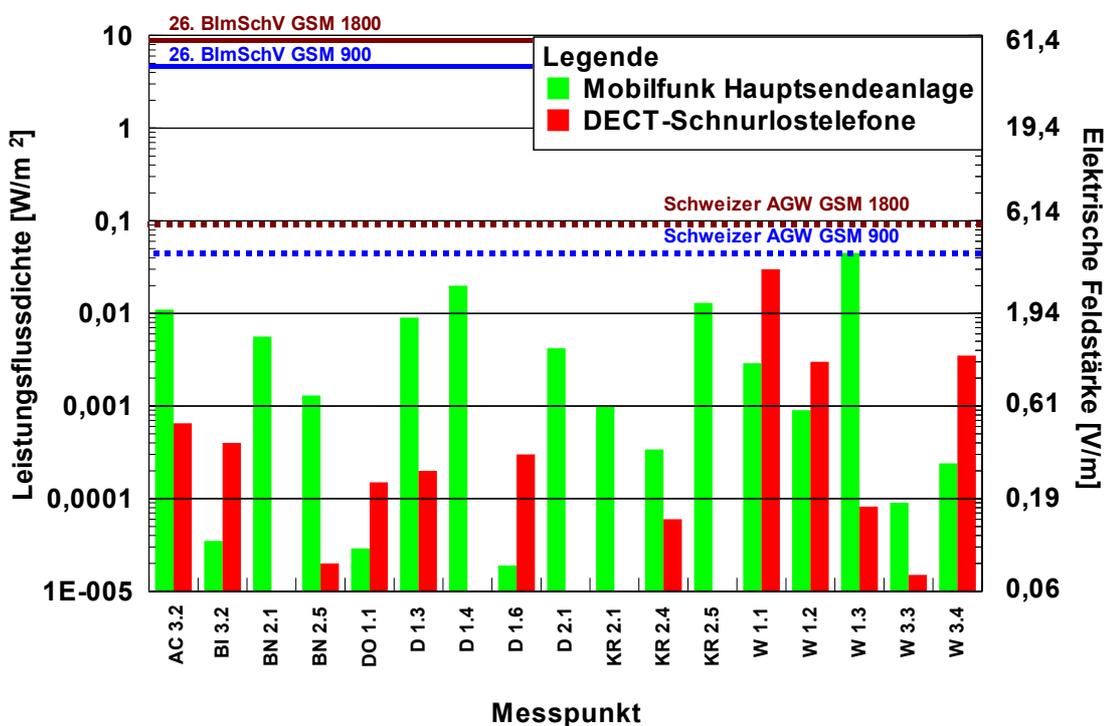


Bild 2.2.35 Vergleich von Mobilfunkimmissionen zu DECT Immissionen, Messreihe *IMST 1*

Auch hier ist das Verhältnis von der konkreten Situation vor Ort abhängig, d.h. von der Sichtbarkeit des Messpunktes zur nächsten Basisstation bzw. zum nächsten DECT Telefon. Es ist jedoch eine Tatsache, dass ein in der Wohnung betriebenes DECT Telefon am Ort der

Messung (auch, wenn dieser sich in einem anderen Zimmer befindet) vergleichbare oder sogar höhere Immissionen hervorrufen kann wie eine Basisstation, die sich auf einem Nachbargebäude befindet.

2.3 Zusammenfassung

Die Immissionen im Umfeld der Basisstationen werden üblicherweise als elektrische Feldstärke oder Leistungsflussdichte gemessen, da eine Ermittlung der spezifischen Absorptionsrate als Basisgröße viel zu aufwändig ist und höchstens zu Arbeitsschutzzwecken Anwendung findet.

Die Messergebnisse der Immission an unterschiedlichen Messpunkten im direkten Umfeld von Mobilfunk-Basisstationen unterliegen einer großen Streubreite. Der niedrigste in verschiedenen Messreihen ermittelte Immissionswert beträgt $0,00000004 \text{ W/m}^2$, der höchste $0,28 \text{ W/m}^2$. Selbst verschiedene Messreihen, die die Verfasser nach ein und demselben Messverfahren durchgeführt haben, differieren bezüglich der gefundenen Maximal- und Mittelwerte der Immission sehr stark. Dies ist primär auf die unterschiedlichen Intentionen von Messungen zurückzuführen: Messungen an typischen, im Umfeld von Basisstationen auftretenden Szenarien mit besonderer Berücksichtigung von sogenannten „sensiblen Orten“ ergeben meist geringere Immissionsmesswerte als Messreihen, bei denen die Suche nach Extremalwerten für die Immission im Vordergrund steht. Insofern ist es nicht verwunderlich, dass auch zu Vergleichszwecken herangezogene Messreihen anderer auf diesem Gebiet tätiger Institutionen trotz vergleichbarer Messmethodik stark voneinander differierende Messwerte erbringen.

Auch innerhalb ein und derselben Messreihe ist die Schwankungsbreite der Immissionsmessergebnisse sehr hoch. Dies ist Veranlassung, eingehend die Einflussfaktoren zu studieren, die die Immission im Umfeld von Basisstationen bestimmen.

Folgende Einflussfaktoren, getrennt nach anlagenbezogenen und immissionsortbezogenen Faktoren, spielen eine entscheidende Rolle:

Einflussfaktoren seitens der Mobilfunkanlage:

- insgesamt Sendeleistung der Anlage (Anzahl der Netzbetreiber, Anzahl der Kanäle, Sendeleistung pro Kanal, Verkehrsaufkommen bei mehrkanaligen Anlagen),
- Höhe der Sendeanlage über Grund,
- verwendete Antennentypen,
- Downtilt der Antennen,
- horizontale Ausrichtung der Antennen.

Einflussfaktoren seitens des Immissionsortes:

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

Eine eingehende Untersuchung dieser Faktoren, wie hier geschehen, zeigt, dass ihr Zusammenwirken sehr komplex ist. Eine isolierte Betrachtung einzelner Einflussfaktoren führt in der Regel zu nicht generell gültigen Verpauschalisierungen.

So spielt zum Beispiel der Faktor Entfernung (d.h. radialer oder lateraler Abstand) von der Basisstation im hier untersuchten Entfernungsbereich vom Sicherheitsabstand bis ca. 200 m nicht die entscheidende Rolle, da ein Durchlaufen der Nebenzipfel der Antenne zu einer örtlich stark schwankenden, aber nicht gleichmäßig abnehmenden Immission führt. Auch die insgesamt Sendeleistung eines Standortes, z.B. repräsentiert durch die Anzahl der Netzbetreiber bei Mehrfachnutzung und durch die Anzahl der Kanäle pro Betreiber, spielt sicherlich eine Rolle, jedoch nicht die dominierende. Nach Auswertung der vorliegenden Messergebnisse hat sich ergeben, dass die höhenmäßige Ausrichtung des Immissionsortes zur Anlage, d.h. seine Ausrichtung zu Hauptstrahlrichtung, die entscheidende Rolle spielt: Die Immission eines entfernteren Ortes in Hauptstrahlrichtung einer mit wenigen Sendekanälen ausgerüsteten Ein-Betreiber-Anlage ist in der Regel wesentlich höher als die Immission an einem näher gelegenen, nicht direkt in Hauptstrahlrichtung liegenden Ort eines mehrfachgenutzten Standortes z.B. im Innenstadtzentrum.

Auch andere „klassische“ Regeln für die Immission im Umfeld der Anlagen lassen sich nicht verpauschalisieren; sie gelten zwar oft, aber nicht immer:

- Die Immissionen im Gebäude, auf dem eine Anlage steht, sind zwar oft, aber nicht stets kleiner als an umliegenden Messpunkten. Vor allem die im obersten Geschoss liegenden Messpunkte können wesentliche Immissionen durch umliegende Stationen erfahren; außerdem kann in Abhängigkeit von Sendeleistung und Antennenbauform auch die Dachanlage relevante Beiträge liefern.
- An Außenmesspunkten, auch mit direkter Sicht zur Anlage, ist die Immission oft, aber nicht pauschal höher als an Messpunkten innerhalb von Gebäuden, vor allem dann, wenn die Gebäude „günstiger“ zur Mobilfunkanlage ausgerichtet sind.
- Die Immission im selben sowie in einem der Anlage gegenüberstehenden Gebäude nimmt oft, aber nicht immer mit abnehmender Geschosshöhe ab. Reflexionen an umliegenden Gebäuden sowie Nebenzipfel der Sendeantennen können hier von der klassischen Vorstellung abweichende Verläufe hervorrufen.
- Die gesamte hochfrequente Immission in mobilfunkanlagen nahen Orten wird nicht pauschal von Rundfunk- oder Fernsehsendern dominiert, auch wenn diese üblicherweise eine sehr viel größere Sendeleistung aufweisen. Gerade im innerstädtischen Bereich wird die Gesamtmission im direkten Umfeld von Mobilfunkanlagen von diesen dominiert; in ländlichen Bereichen ist das Verhältnis stellenweise umgekehrt.

So lässt sich auch kein signifikanter Unterschied der maximalen Immission an Innen- und Außenmesspunkten bzw. Messpunkten im städtischen und ländlichen Bereich finden. Für die Suche nach Extremalwerten in Bezug auf die Überprüfung von Grenzwerten steht in erster Linie die Suche nach (allgemein zugänglichen) Orten, die sich höhenmäßig sowie auch horizontal in Hauptstrahlrichtung zur Sendeantenne befinden, im Vordergrund. Bei dieser Suche ist auch der Downtilt der Antenne zu berücksichtigen, der vor allem im innerstädtischen Bereich signifikant größer sein kann.

3 Kleinskalige räumliche Verteilung der Immission

Zusätzlich zu der im vorangegangenen Kapitel detailliert untersuchten Abhängigkeit der „großräumigen“ Verteilung der ortsbezogenen Immission von verschiedenen Einflussfaktoren zeigt die Immission auch eine *kleinskalige* Ortsabhängigkeit. Unter „kleinskaligen“ Schwankungen sollen solche bezeichnet werden, die im Bereich von einigen Zentimetern auftreten. 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 unterschiedliche 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.

Die Beurteilung des Fast Fadings bezüglich Schwankungsbreiten und typischen Verteilungen ist aus folgenden Gründen wichtig: Zum einen gibt sie Aufschluss über die Notwendigkeit, eine Maximalfindungstechnik bei der Messung anzuwenden, sofern nach Grenzwertphilosophie die Suche nach Extremalwerten gefordert ist: Schwankt die Immission kleinskalig sehr stark, sind Immissionsmessungen an einem festen Punkt, z.B. auf einem Stativ, nicht aussagekräftig. Zum anderen ist eine Kenntnis von typischen Fast Fading Feldverteilungen notwendig, um Hinweise über die für die Erfassung von „mittleren“ Immissionen geeigneten Mittelungsgeometrien zu erlangen, sofern keine *Maximalwertsuche* nach geltenden Normen durchgeführt werden soll.

Diese beiden Problematiken sollen im folgenden behandelt werden

3.1 Typische kleinskalige Feldverteilungen

Gerade innerhalb von Innenräumen kann die Immission örtlich kleinskalig stark schwanken. Um einen Eindruck von der Größenordnung dieser kleinskaligen Variationen der Immissionen zu bekommen, wurden detaillierte Messungen in einem Innenraum durchgeführt. Hierbei ist zu beachten, dass die Person des Messenden an sich auch wesentlich zu Verzerrungen und Unregelmäßigkeiten im Immissionsverlauf beiträgt. Um diesen Faktor auszuschließen, wurde quasi unter Laborbedingungen mit einem automatischen Scannersystem gearbeitet, das in einem Innenraum auf einer Strecke von 1,36 m in Schritten von 2 cm die Immission aufnahm und protokollierte. Die Sendeantenne (1,9 GHz, vergleichbar mit GSM 1800) befand sich im gleichen Gebäude eine Etage höher. Die Empfangsantenne hatte eine isotropähnliche Richtcharakteristik, um auch aus unterschiedlichen Raumrichtungen einfallende Signale exakt berücksichtigen zu können.

Bild 3.1.1 zeigt den Verlauf der Leistungsflussdichte über den abgescannten Bereich. Deutlich sind die ortsabhängigen, kleinskaligen Schwankungen zu erkennen, die durchaus einen Faktor 100 (bezüglich der Leistungsflussdichte) ausmachen können. Die absoluten Werte sind bei dieser Messung nicht von Belang, sondern nur die relativen Schwankungen.

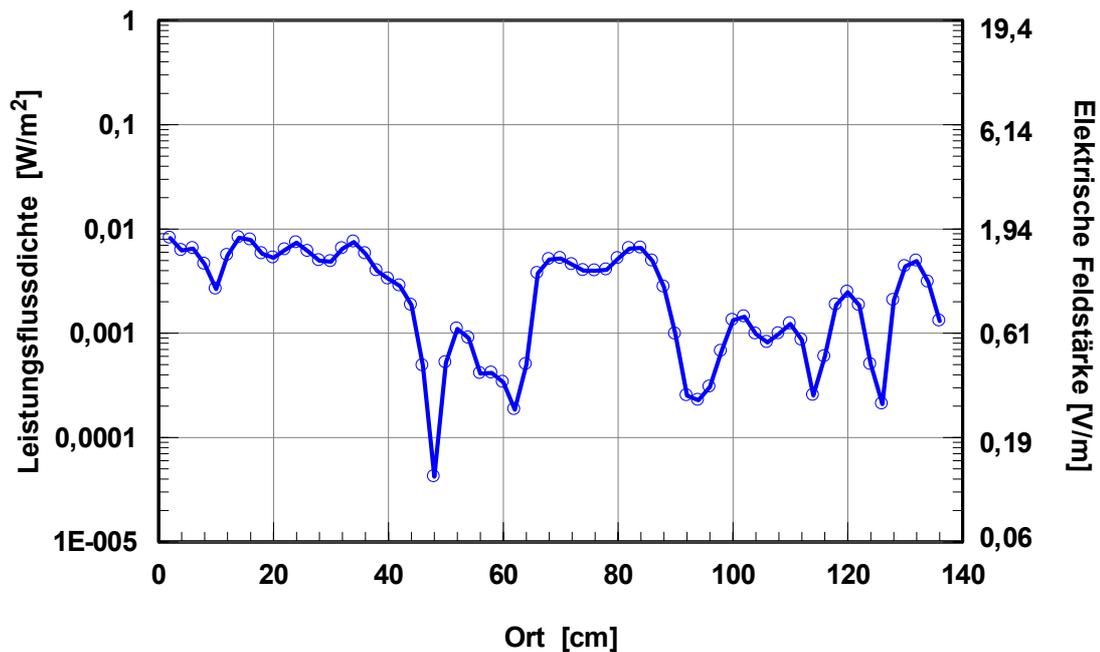


Bild 3.1.1 Immissionsverlauf in einem Innenraum über einer Strecke von 1,36 m; Frequenz 1,9 GHz

Um über dieses Messbeispiel heraus einen Eindruck über die flächige Verteilung der Schwankungen sowie der zugrunde liegenden Wirkungsmechanismen zu bekommen, wurde im Vorgriff auf die im dritten Arbeitspaket vorliegenden Gesamtprojektes zu evaluierenden Simulationsprogramme die kleinskaligen Immissionsveränderung auch *rechentechnisch* untersucht. Zur Anwendung kam dabei das Programm *EMPIRE* [EMPIRE], ein Vollwellenanalyseprogramm, das auf der Methode der Finiten Differenzen im Zeitbereich basiert. Die untersuchte Anordnung ist in Bild 3.1.2 dargestellt: Eine (ebene) Welle mit der Frequenz 900 MHz bzw. 1800 MHz fällt durch das linke Fenster in einen Innenraum ein und unterliegt im Raum vielfältigen Reflexions- und Absorptionsmechanismen.

Das Zimmer ist mit einer Tür, Schränken und einem Tisch ausgestattet. Es wurden verschiedene Materialien einschließlich geeigneter dielektrischer Materialparameter für die Modellierung verwendet:

- rot markiert: Holz (Schränke, Tür, Tischplatte)
- gelb markiert: Metall (Schrank, Tischbeine)
- grau markiert: Stein (Wände, Decke, Boden)

Die Bilder 3.1.3 und 3.1.4 zeigen die Feldverteilung im Zimmer in einer horizontalen Ebene auf Höhe der Tischplatte bei 1800 MHz (GSM 1800) und 900 MHz (GSM 900). Als Immissionsgröße dargestellt und farbig skaliert ist die elektrische Feldstärke. Sehr gut zu sehen sind die schon in Bild 3.1.1 messtechnisch ermittelten kleinskaligen örtlichen Schwankungen. Für die Ausbildung der stehenden Wellen spielt vor allem die der Fenster gegenüberliegende Wand die dominierende Rolle. Die Einbrüche wechseln bei 1800 MHz aufgrund der kleineren Wellenlänge häufiger als bei 900 MHz. Außerdem erscheinen die „Einbrüche“ zwischen den Wellenbergen bei GSM 900 tiefer als bei GSM 1800.

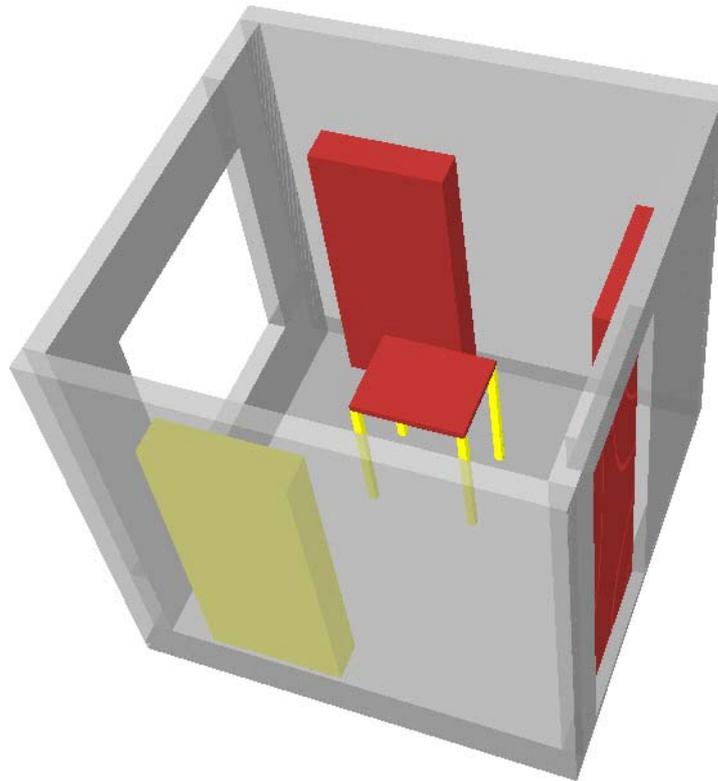


Bild 3.1.2 Untersuchtes Indoorszenario mit folgenden Materialien: Grau = Stein, rot = Holz, gelb = Metall

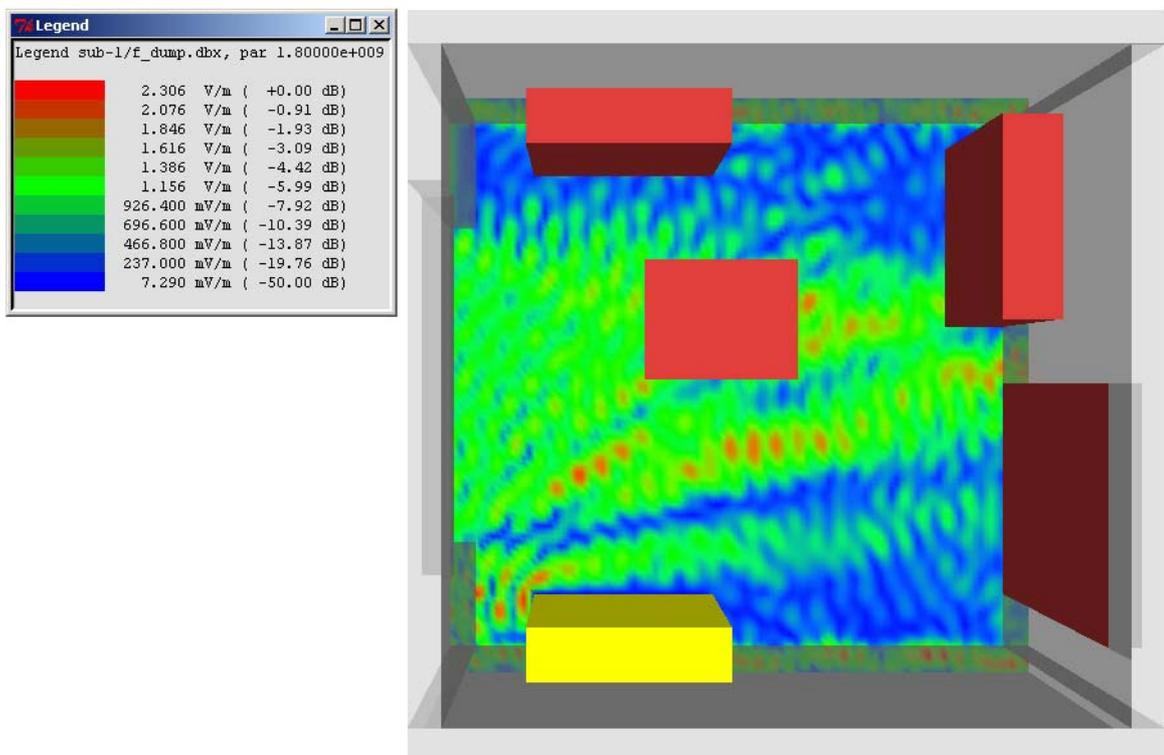


Bild 3.1.3 Verteilung der elektrischen Feldstärke in der Tischebene, einfallende Welle bei 1800 MHz

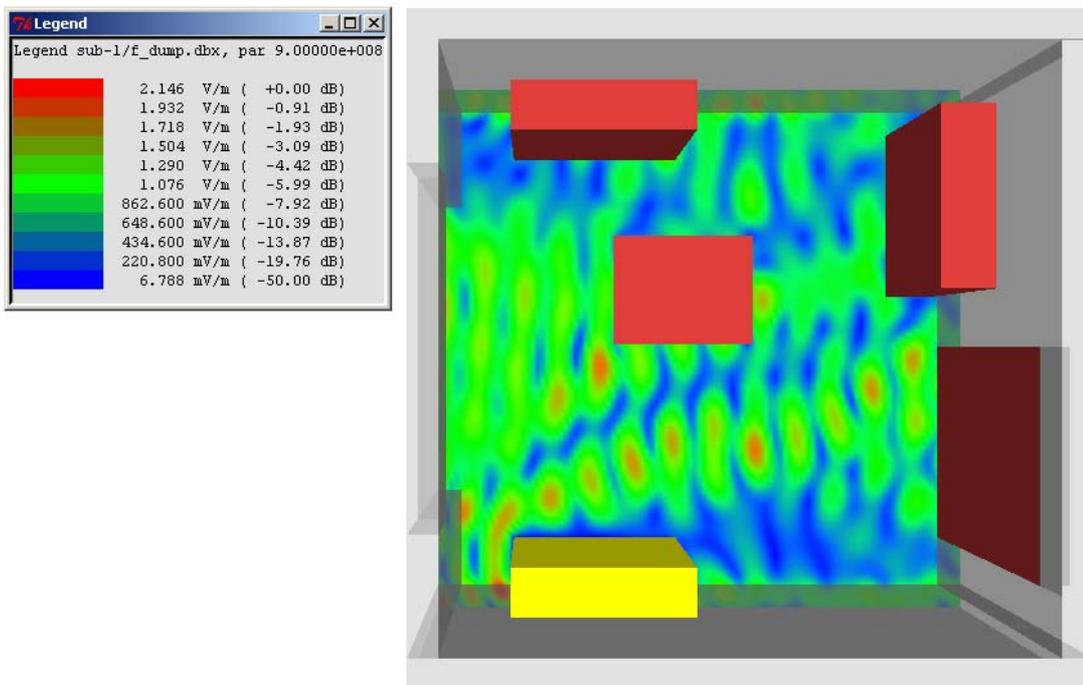


Bild 3.1.4 Verteilung der elektrischen Feldstärke in der Tischebene, einfallende Welle bei 900 MHz

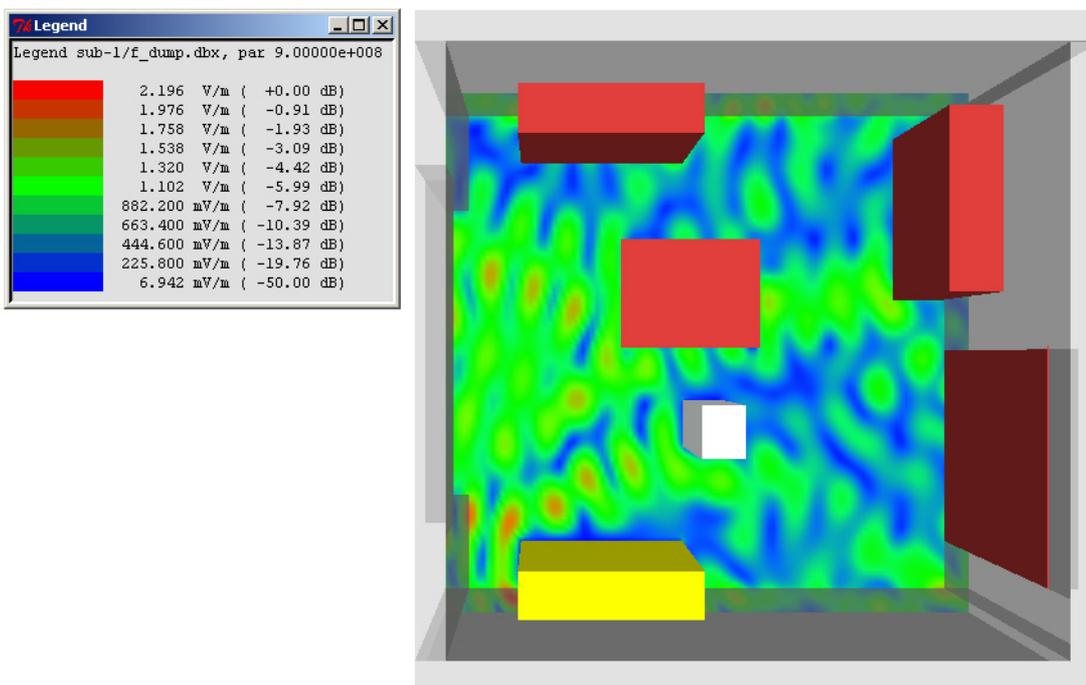


Bild 3.1.5 Verteilung der elektrischen Feldstärke in der Tischebene, einfallende Welle bei 900 MHz, Anwesenheit einer Person im Raum (weißer Block)

In Bild 3.1.5 ist zusätzlich die Anwesenheit einer Person simuliert (weißer Block; Materialparameter von Muskelgewebe). Dadurch verändert sich das Feldbild nicht nur im Bereich der Person, sondern bis etwa zur Tür grundlegend.

Noch komplexer wird die Feldverteilung, wenn nicht, wie hier betrachtet, nur eine Frequenz dominiert, sondern wenn gleichzeitig Immissionen verschiedener Frequenzen präsent sind. Dies können unterschiedliche Frequenzen innerhalb eines Frequenzbandes sein (z.B. verschiedene Sende Kontrollkanäle (BCCH) und Transportkanäle (TCH)), aber auch Kanäle der verschiedenen Frequenzbänder GSM 900, GSM 1800 und UMTS. Durch dieses multifrequenzielle Szenario dürfte auch eine Abschwächung von Interferenzerscheinungen zu beobachten sein. Diese Vermutung wird weiter unten exemplarisch untersucht. Speziell für UMTS wird in [OLI 03] unter gewissen Voraussetzungen eine Minimierung der örtlichen Schwankungen beschrieben; ein messtechnischer Nachweis steht aber noch aus.

Die vorangegangenen Beispiele konzentrierten sich auf eine Untersuchung der kleinskaligen Schwankungen in einem bestimmten Expositionsszenario, d.h. Innenraum mit direkter Sicht zur Basisstation. Im folgenden soll untersucht werden, ob es grundsätzliche Unterschiede in der Größe der Immissionsschwankungen *in verschiedenen Expositionsszenarien* gibt. Es ist hierbei nicht möglich und auch nicht nötig, sämtliche real existierende Szenarien nachzubilden. Deswegen sollen hier nur einige wichtige Basisszenarien exemplarisch untersucht werden. Es sind dies:

1. Innenraum mit direkter Sicht zur Sendeantenne (Bild 3.1.6 links)
2. Innenraum ohne Sicht zur Sendeantenne (Bild 3.1.6 rechts)
3. Außenpunkt mit Sicht zur Antenne ohne reflektierende Objekte in der Umgebung

Die Innenräume sind aus Vereinfachungsgründen leer, d.h. hier wurde auf die Einbeziehung von Mobiliar verzichtet.

Für die Untersuchungen kommt das Programmpaket *Wireless InSite* der Firma Remcom [INSITE] zum Einsatz, das in der hier eingesetzten Version auf einem strahlentheoretischen Ansatz beruht. Im Gegensatz zu den oben gezeigten Beispielen wird hier eine reale Sendeantenne modelliert.

Die Ergebnisse werden jeweils auf einer 2 m langen Achse in drei zueinander orthogonalen Richtungen präsentiert. Bild 3.1.6 zeigt die Anordnung der Achsen zum Sender. Alle Ergebnisse sind auf den Maximalwert der drei Auswertachsen normiert.

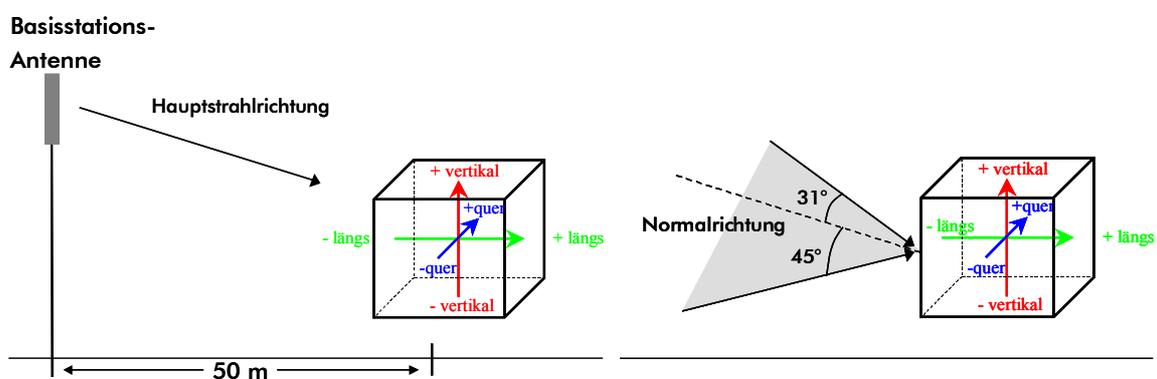


Bild 3.1.6 Orientierung der in den nachfolgenden Bildern gezeigten Auswertachsen. Szenario mit direkter Sicht zur Sendeantenne (links) und ohne Sicht zur Sendeantenne (rechts). Beim rechten Szenario liegen beide einfallende Strahlen in einer Ebene. In +Längsrichtung gesehen fallen die Strahlen von links bzw. rechts oben in den Innenraum ein.

Für die Simulation wird der Parametersatz 2 nach Tabelle 3.1.1 verwendet.

Parametersatz 2	
Sendeleistung P_S	20 W
Höhe Basisstation Indoor	17 m
Höhe Immissionsort Indoor	13 m (1 m über Zimmerboden)
Höhe Basisstation Outdoor	5,25 m
Höhe Immissionsort Outdoor	2 m
Lateraler Abstand Basisstation - Immissionsort	50 m
Antenne	K 741324 (X-Pol)
mechanischer Downtilt Indoor	4°
mechanischer Downtilt Outdoor	6°
Frequenz	1767,5 MHz
Berechnungsverfahren	Strahlenoptik

Tabelle 3.1.1 Beschreibung der Parameter für Parametersatz 2

Bild 3.1.7 zeigt die Berechnungsergebnisse für das Szenario Innenraum mit freier Sicht zur Antenne. Die Sendeenergie fällt senkrecht durch das 50 cm über dem Boden beginnende Fenster in den Raum ein (vgl. z.B. mit Bild 3.1.3). Der Nullpunkt der drei Auswertachsen befindet sich in 1 m Höhe über dem Fußboden (vertikale Achse), 2 m vom Fenster entfernt im Rauminnen (Längsachse) mittig zwischen den Seitenwänden (Querachse).

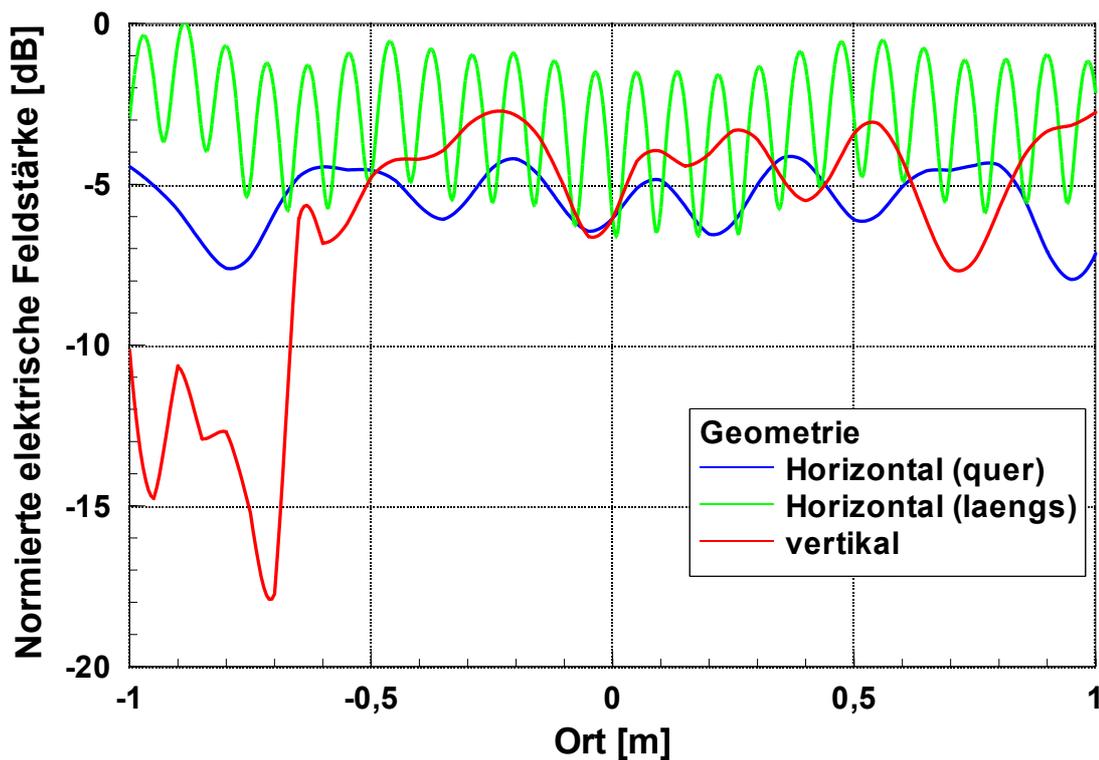


Bild 3.1.7 Fadingverteilung auf drei senkrechten Achsen. Parametersatz 2, Szenario Innenraum mit direkter Sicht zur Antenne

In Übereinstimmung mit Bild 3.1.3 sind, hervorgerufen durch die senkrecht zur Einfallrichtung der Welle stehende rechte Zimmerwand, die Feldstärkeschwankungen in Längsrichtung am stärksten, was die Häufigkeit und die Amplitude betrifft. In vertikaler Richtung sind relevante Feldwerte erst ab einer Zimmerhöhe von ca. -0,4 m zu erkennen, da das Fenster erst ab -0,5 m Höhe beginnt.

Eine messtechnische Verifizierung der hier gezeigten der kleinskaligen Schwankungen vor allem in der horizontalen Längsrichtung ist in der Realität nur mit Miniatursonden möglich. Für Emissionsmessungen üblicherweise verwendete, räumlich ausgedehnte logarithmisch-periodische oder bikonische Antennen mitteln die Felder über einen größeren Raumbereich, so dass extreme Schwankungen dadurch weniger sichtbar werden.

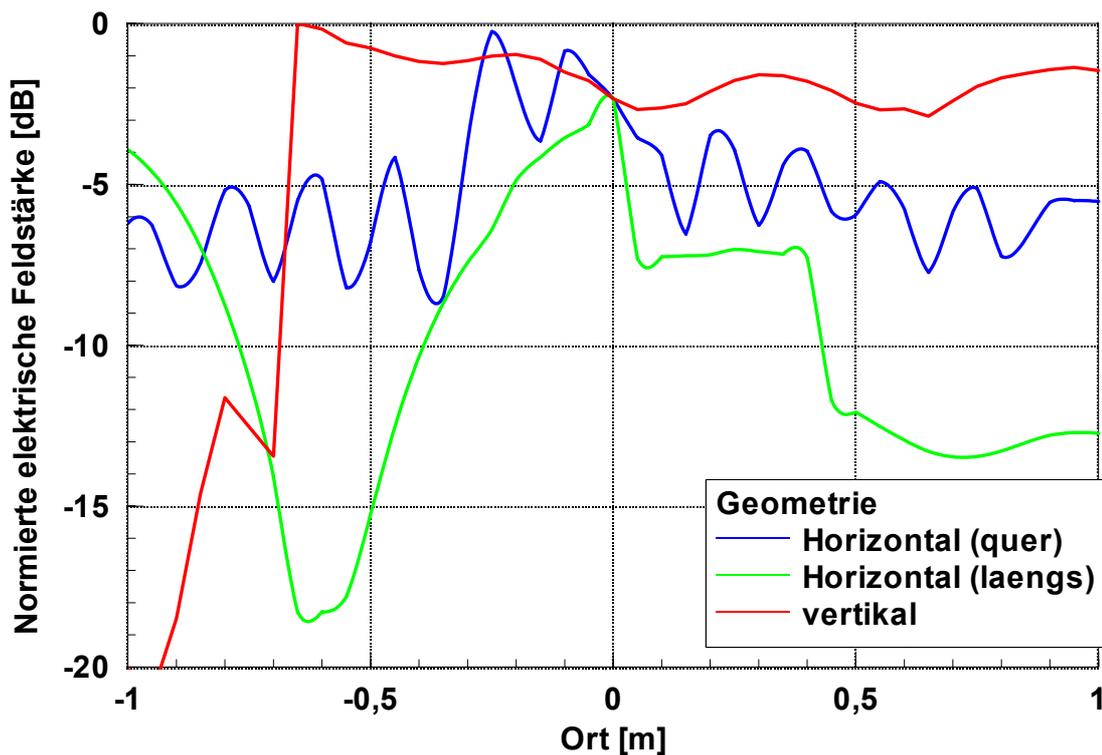


Bild 3.1.8 Fadingverteilung auf drei senkrechten Achsen. Parametersatz 2, Szenario Innenraum ohne direkter Sicht zur Antenne, zwei dominante Reflexionswege

Bild 3.1.8 zeigt die Immissionsverteilung für den Innenraum ohne freie Sicht zum Sender. Die Sendeenergie kommt durch zwei außerhalb des Zimmers befindliche, asymmetrisch bezüglich der Seitenwände angeordnete Reflexionsstellen durch das Fenster in das Zimmer (etwa 45° und 31° bezüglich der Normalrichtung, vgl. Bild 3.1.6 rechts). Es ergibt sich ein im Vergleich zum Bild 3.1.7 deutlich verändertes Interferenzbild. Aufgrund der Tatsache, dass nun die einfallenden Wellen nicht mehr parallel zu den Seitenwänden des Innenraums sind, sondern unter einem streifenden Winkel einfallen, sind örtliche Schwankungen auch in der Querrichtung zu beobachten. In vertikaler Richtung ist wieder der Einfluss des Fensters sichtbar. Die horizontale Längsverteilung hat sich grundlegend geändert. Ursache ist die komplizierte Überlagerung beider einfallender Wellen, so dass hier eine einfache Vorhersage der komplexen Feldverläufe fast unmöglich erscheint. In der Realität wird sich, je nach Sichtbarkeit der Anlage und Reflexionsbedingungen in der Umgebung, ein noch komplizierteres Interferenzbild einstellen. In vorliegenden Berechnungen geht es jedoch primär darum, einen grundlegenden Überblick bezüglich der Größe und Schwankungshäufigkeit der Immission zu gewinnen.

Bild 3.1.9 zeigt die Verteilung für das Außenszenario mit direkter Sicht zum Sender *ohne* reflektierende Objekten in unmittelbarer Nähe. Die Höhe der Antenne wurde mit 5,25 m hier so gewählt, dass sich der Empfangsbereich innerhalb der Hauptstrahlrichtung der Antenne befindet.

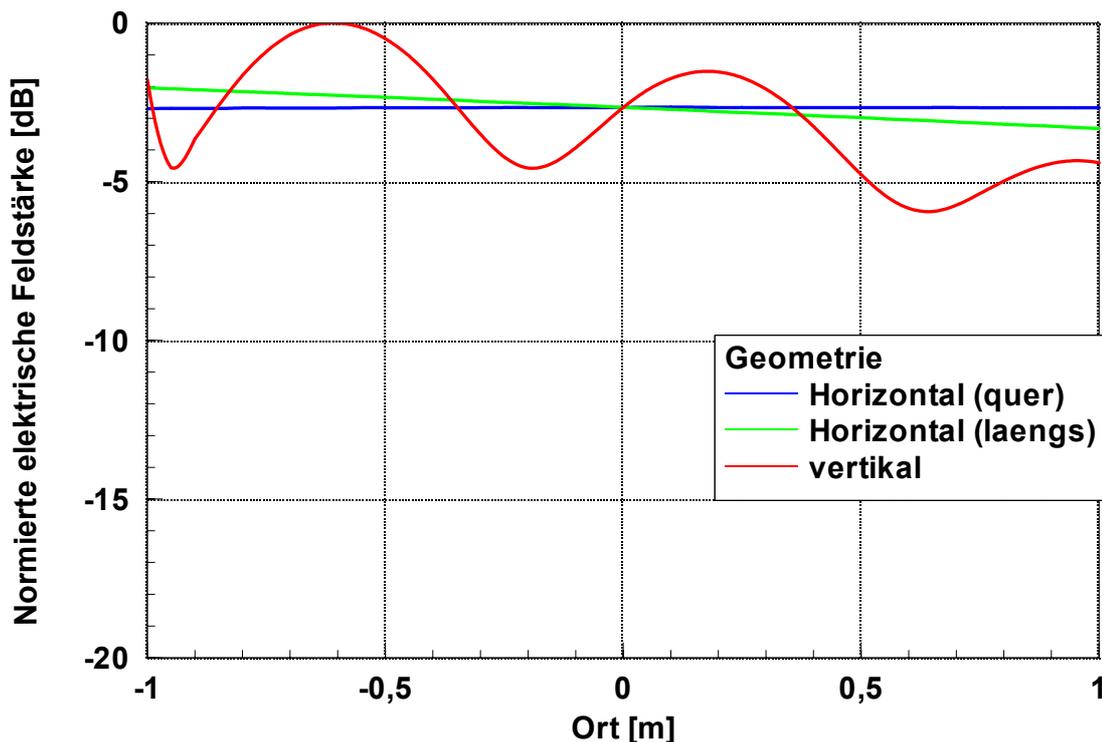


Bild 3.1.9 Fadingverteilung auf drei senkrechten Achsen. Parametersatz 2, Szenario Außenbereich mit direkter Sicht zur Antenne, keine reflektierenden Objekte

Bemerkenswert sind hier die folgenden Punkte: In horizontaler Querrichtung sind keine Feldstärkeschwankungen zu sehen. Dieses ist verständlich, da man sich in der horizontal sehr breit ausgerichteten Hauptstrahlrichtung der Antenne bewegt. In horizontaler Längsrichtung ist ein Feldstärkeabfall zu beobachten. Das ist der schon in Bild 2.2.4 gezeigte gleichmäßige Abfall der Immission mit der Entfernung ab Erreichen der Hauptstrahlrichtung. Eine zum Fading führende Interferenz zweier Einzelwellen findet nur in vertikaler Richtung statt zwischen einer direkten und einer am Erdboden reflektierten Welle. Der Boden wurde hier nicht als ideal metallisch, sondern als feuchte Erde modelliert. Die Schwankungshäufigkeit in vertikaler Richtung ist jedoch wesentlich kleiner als in den Indoor Szenarien, da die bodenreflektierte Welle auf den Boden nicht senkrecht, sondern bezüglich der Normalrichtung in einem stumpfen Winkel auftrifft. Auch hier werden in *realen* Außenbereichsszenarien, z.B. durch Reflexionen an umliegenden Gebäuden, unter Umständen kompliziertere Interferenzbilder auftreten, die auch zu einem Fading in den Horizontalachsen führen werden. Trotzdem ist eine Untersuchung der hier betrachteten grundlegenden Szenarien wichtig, da somit ein Verständnis über die dem Fading zugrunde liegenden Wirkungsmechanismen ermöglicht wird. Berechnungen und Messungen in komplizierteren Szenarien sind im allgemeinen für generelle Aussagen wenig aussagekräftig, da die grundlegenden Einflussfaktoren für das Fading nicht mehr klar zutage treten und nicht getrennt voneinander untersucht werden können.

Gleichermaßen verhält es sich bezüglich einer Überlagerung von Einzelwellen *unterschiedlicher Frequenzen*. Die Überlagerung kann zu Feldbildern führen, die eine separate Interpretation der einzelnen Wirkmechanismen nicht mehr zulassen. Trotzdem wird solch eine Überlagerung verschiedener Frequenzen, wie oben bereits angesprochen, bezüglich des resultierenden Gesamtfeldes zu einer Abschwächung der Schwankungsamplitude und u.U. auch der

Schwankungshäufigkeit führen. Dies ist in Bild 3.1.10 für die schon in Bild 3.1.7 berechnete Anordnung gezeigt, d.h. das Innenraumszenario mit direkter Sicht zur Antenne. Hier ist der Welle bei 1767,5 MHz eine Welle bei 902,5 MHz (Sendeleistung der Basisstation 10 W) überlagert worden. Bild 3.1.10 zeigt nur die horizontalen Längskomponenten (grün in Bild 3.1.7) bei den beiden Einzelfrequenzen und für die Überlagerung. Durch die Überlagerung beider Felder (rote Kurve) werden die tiefen „Einbrüche“ bei der 900 MHz Frequenz von bis zu 14 dB auf maximal 8 dB abgeschwächt. Die Abschwächung würde noch gravierender ausfallen und zu einem wesentlich unregelmäßigen Interferenzmuster führen, wenn sich die beiden Frequenzen nicht um nahezu den ganzzahligen Faktor 2 unterscheiden würden, sondern um einen gebrochenen Faktor.

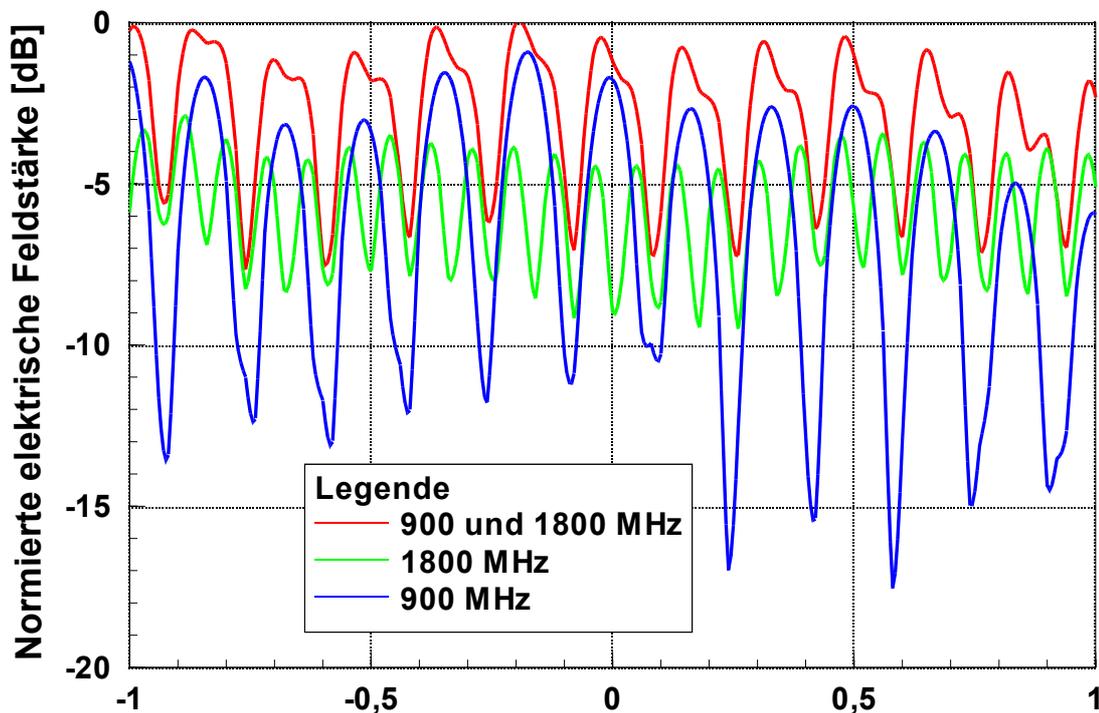


Bild 3.1.10 Fadingverteilung auf der horizontalen Längsachse. Parametersatz 2, Szenario Innenraum mit direkter Sicht zur Antenne, vgl. Bild 3.1.7. Überlagerung einer GSM 900 mit einer GSM 1800 Frequenz

Für die in vorliegendem Projekt letztlich zu entwickelnden Messverfahren haben die Untersuchungen folgende praktische Auswirkungen: Zur Auffindung von Extremalwerten (Maximalwertsuche der Immission) sind geeignete Messverfahren einzusetzen, die die Immission nicht nur punktwise erfassen, sondern ein Bewertungsvolumen abtasten müssen. Durch eine Punktmessung kann die maximale Immission um mehrere Größenordnungen unterschätzt werden. Bei der volumenbezogenen Maximalwertsuche sind alle drei Raumrichtungen einzubeziehen. Dies ist deutlich im Beispiel des Außenpunktes mit direkter Sicht zur Sendeanenne zu sehen: Die Schwankung der Felder in der Horizontalebene ist sehr gering; die relevante Variation der Felder findet in der Vertikalen statt. Daher ist bei der Maximalwertsuche vor allem auch eine vertikale Verschiebung der Messantenne durchzuführen.

3.2 Erfassung einer über den Körper „gemittelten“ Immission

Bereits in [BOR 02] wurde darauf hingewiesen, dass es seitens einiger Forschungsgruppen Ansätze gibt, zum Vergleich mit den Grenzwerten nicht den *Maximalwert* der gemessenen Immission, sondern einen *Mittelwert* zu erfassen. Begründet wird dies damit, dass einige Personenschutznormen (z.B. [ICNIRP 98]) die (abgeleiteten) Grenzwerte als über den gesamten menschlichen Körper räumlich gemittelte Werte definieren. Obwohl nicht explizit erwähnt, „mittelt“ dieses Verfahren natürlich die aufgrund der oben gezeigten starken örtlichen Amplitudenschwankungen real existierenden hohen Immissionsspitzen weg und ergibt somit ein „moderateres“ Bild der Immissionssituation vor Ort. Dies ist sicherlich aus Netzbetreiber-sicht positiv, muss aber in jedem Fall durch die jeweilige nationale Personenschutznorm gedeckt sein.

Als Mittelungsgeometrien werden in den diesbezüglichen Untersuchungen verschiedenste geometrische Figuren vorgeschlagen und ausgewertet; die Vielfalt reicht von horizontal oder vertikal ausgerichteten Linien und Ebenen über Würfel bis hin zu „Dummy“-Phantomen und detaillierten Mensch-Nachbildungen [BOR 02, LEH 03]. Bild 3.2.1 zeigt einige der vorgeschlagenen Geometrien.

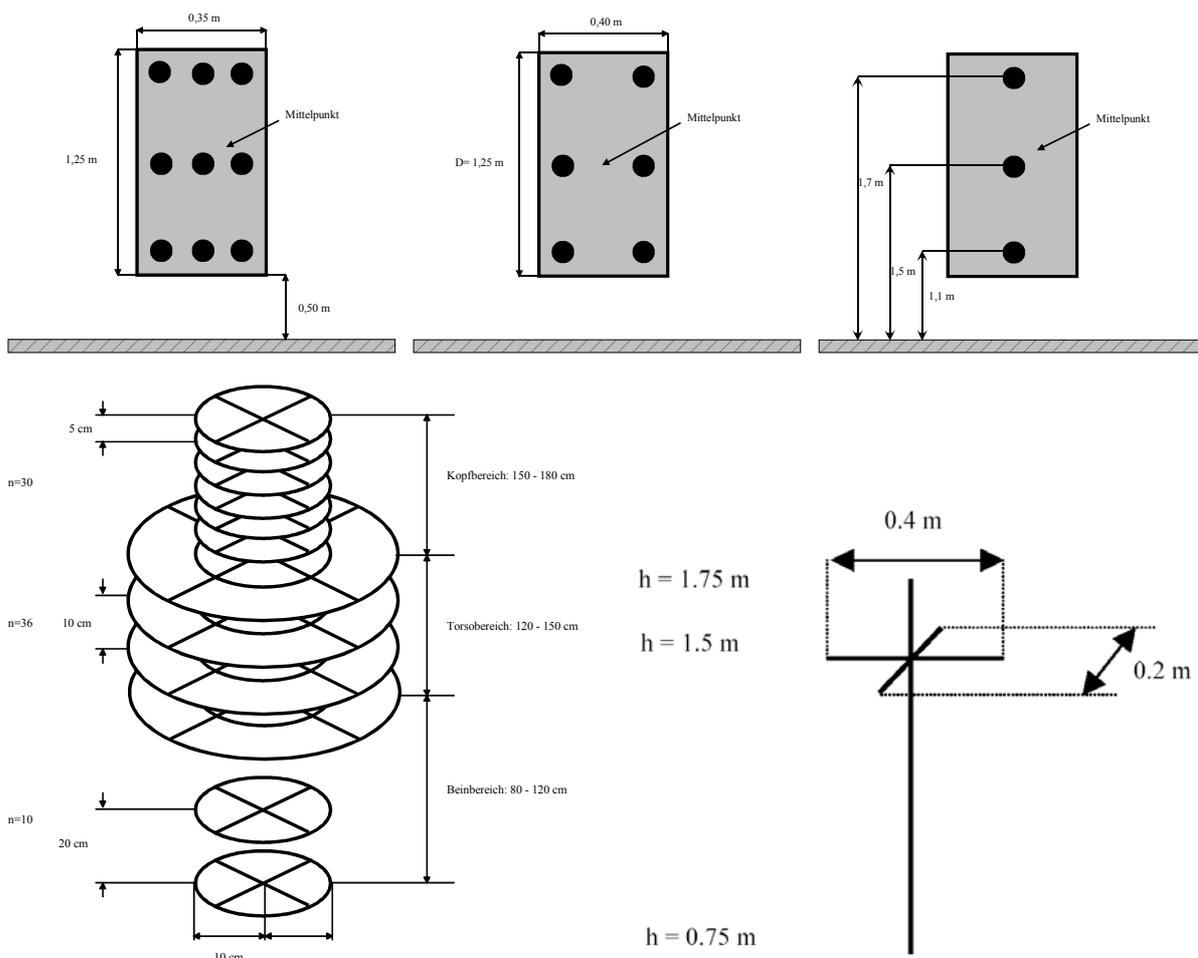


Bild 3.2.1 Verschiedene vorgeschlagene Messraster für eine Mittelung der Messwerte.
Oben links: [ANFR/DR-15]; oben Mitte: [prEN 50400]; oben rechts: [CEPT 02];
unten links: [SICTA 01], unten rechts: [LEH 03]

Diese Arbeiten sind zur Zeit brandaktuell, und ein klares Ergebnis ist bislang noch nicht zutage getreten. Die Beschäftigung mit dieser Thematik im vorliegenden Kapitel ist insofern relevant, da bei der Festlegung einer geeigneten Mittelungsgeometrie die Kenntnis der vorliegenden kleinskaligen örtlichen Feldstärkeschwankungen und ihrer unterschiedlichen Verteilung in verschiedenen Expositionsszenarien unerlässlich ist.

So werden beispielsweise in [LEH 03, NEU 03] sehr aufwändige Untersuchungen durchgeführt, die folgende Fragen klären sollen:

- Ist das Mittelungsergebnis für ein festes Expositionsszenario von der Mittelungsgeometrie abhängig? Wie groß ist die Spanne zwischen größtem und kleinstem erfassten Wert innerhalb einer Geometrie?
- Was ist die optimale Anzahl der Punkte innerhalb einer Mittelungsgeometrie? Hierbei wurden auch Geometrien untersucht, die deutlich feiner gerastert waren als die in Bild 3.2.1 dargestellten.
- Welche Mittelungsgeometrie ergibt die geringste Abweichung des ermittelten Mittelwertes vom „wahren“ Mittelwert eines Bewertungsvolumens? Hier wurden größere Raumbereiche fein abgetastet und verschiedene Mittelungsgeometrien durch diese Punktwolke „durchgeschoben“. Dabei wurde auch erfasst, wie groß die Schwankungsbreite ein und derselben Mittelungsgeometrie an verschiedenen Positionen innerhalb der Punktwolke sind. Neben den in Bild 3.2.1 dargestellten Geometrien kamen auch andere Geometrien, z.B. horizontale und vertikale Linien, Ebenen und Würfel zum Einsatz.

Als Ergebnis wurde bislang festgestellt, dass *auch für ein und denselben Messort* die gemessenen Mittelwerte sehr stark von der verwendeten Mittelwertgeometrie abhängen. Dies ist dadurch erklärbar, dass einige Mittelungsgeometrien ihre Punkte primär in vertikaler Richtung verteilen, wohingegen andere auch eine relevante horizontale Ausdehnung haben. Es ist nun, wie im vorangegangenen Abschnitt gezeigt, stark vom Expositionsszenario abhängig, wie sich die Energie in vertikaler Richtung und in horizontaler Raumrichtung verteilt.

Durch unterschiedliche Geometrien kann sich nicht nur der resultierende Mittelwert, sondern auch die Häufigkeitsverteilung der an den „Gitterpunkten“ der Geometrie erfassten Feldstärken grundlegend verändern. Bild 3.2.2 (entnommen aus [LEH 03]) zeigt die Häufigkeitsverteilung der elektrischen Feldstärke für zwei unterschiedliche Geometrien an ein und demselben Messort: Geometrie 3 besteht dabei aus 3 horizontal übereinander angeordneten kreisförmigen Ebenen mit je 22,5 cm Punkteanstand (63 Punkte insgesamt); Geometrie 5 ist das in Bild 3.2.1 unten links dargestellte [SICTA 01] Modell (76 Punkte insgesamt). Hierbei ist ersichtlich, dass die Häufigkeitsverteilungen völlig unterschiedlich sind, da sie quasi jeweils nur einen „Ausschnitt“ aus der „wahren“ räumlichen Häufigkeitsverteilung in einem ausgedehnten Volumen darstellen.

Die umfangreichen Untersuchungen führen die Autoren von [LEH 03] sogar zu der Vermutung, dass die Messgeometrie einen *stärkeren* Einfluss auf die Häufigkeitsverteilung der Feldstärke hat als unterschiedliche Expositionsszenarien.

In Zusammenhang damit besteht auch begründeter Anlass zur Vermutung, dass der Einfluss der *Messgeometrie* auf die Mittelwerte größer ist als der Einfluss unterschiedlicher Expositionsszenarien.

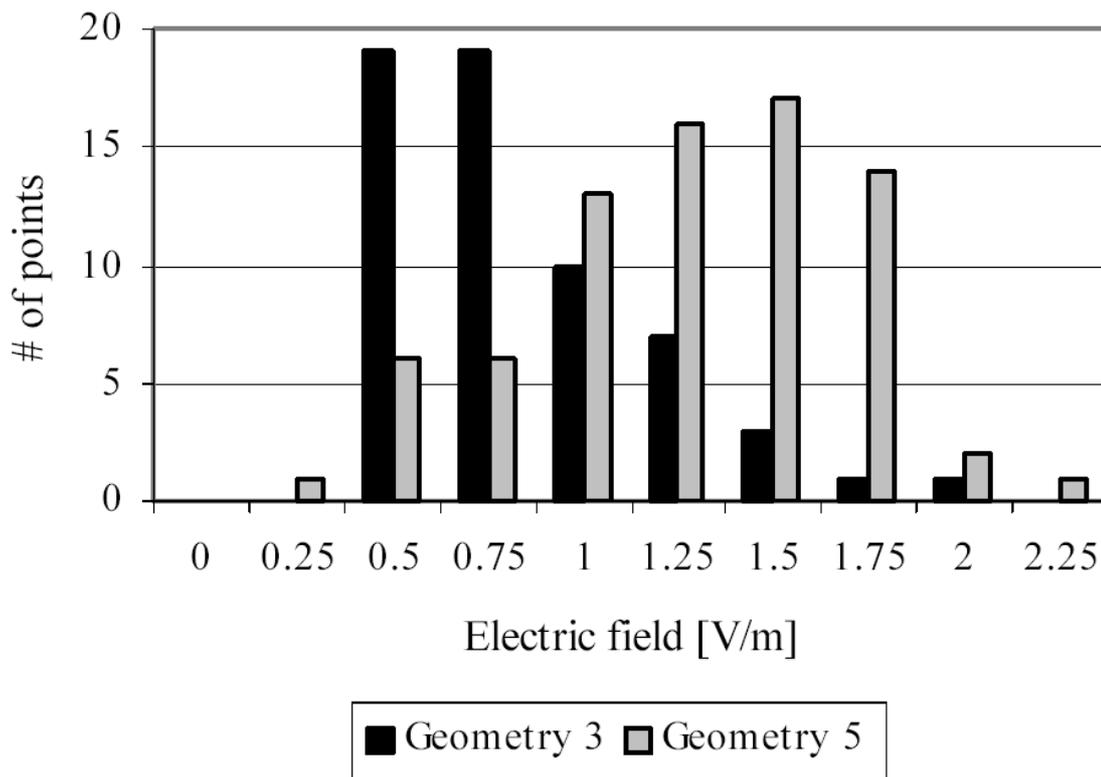


Bild 3.2.2 Vergleich der Häufigkeitsverteilungen der elektrischen Feldstärke für zwei unterschiedliche Mittelungsgeometrien an ein und demselben Messort, aus [LEH 03]

Hierbei muss zusätzlich noch folgendes berücksichtigt werden: Die Untersuchungen von Mittelungsgeometrien mit den o.g. Punktzahlen (63 bzw. 76 Punkte) ist nur noch rein akademischer Natur; im täglichen Messeinsatz ist die Verwendung solcher Geometrien nicht praktikabel. Insofern müssen Geometrien gefunden werden, die

- eine möglichst geringe Punktzahl aufweisen (keinesfalls mehr als 10) und
- den menschlichen Körper dennoch nachbilden.

Beide Forderungen erscheinen nach gegenwärtigem Erkenntnisstand nicht sinnvoll verknüpfbar, da mit abnehmender Punktzahl und dem daraus resultierenden größeren Punkteabstand das Fast Fading nicht mehr adäquat erfasst werden kann. Wenn sehr detaillierte Körperrückbildungsgeometrien bei gleichen Expositionsszenarien schon gegensätzliche Ergebnisse liefern, wie groß werden dann die Unterschiede bei stark reduzierter Punktzahl sein? Aufgrund der Tatsache, dass bei punktereduzierten Geometrien immer ein Teil der tatsächlichen Feldverteilungsinformation in einem realen Körpervolumen verloren geht, wird die „optimale“ Mittelungsgeometrie vermutlich auch stark vom Expositionsszenario abhängen, d.h. der Fragestellung, ob die Messungen im Freiraum oder in Räumen, innerhalb oder außerhalb der Hauptstrahlrichtung, mit oder ohne direkte Sicht zur Basisstation usw. stattfinden. Die im vorangegangenen Abschnitt durchgeführten Fast Fading Berechnungen haben gezeigt, dass je nach Szenario starke Feldstärkeschwankungen mal in der vertikalen und mal in der horizontalen Richtung auftreten. Auf keinen Fall wird es sinnvoll sein, in Abhängigkeit vom Messort diesen zuerst zu „klassifizieren“, um dann die optimale Mittelungsgeometrie festzulegen und nach dieser die punktwisen Messungen durchzuführen. Die damit dem

Messteam offen stehenden Freiheitsgrade würde die Gefahr von unterschiedlichen Bewertungen eröffnen und der Idee eine „Normierung“ der Messvorschriften zuwider laufen.

Außerdem ist auch noch die folgende Problematik zu beachten: Die als Begründung für die Mittelung angeführte Personenschutzempfehlung [ICNIRP 98] verlangt neben der Einhaltung des Ganzkörper SAR-Wertes auch die Einhaltung eines Teilkörper SAR-Wertes für stark lokale Exposition. *Beide* Werte müssen eingehalten werden. Bezüglich der Ableitung der Referenzwerte aus den Basisgrenzwerten heißt es in [ICNIRP 98]:

„The reference levels are intended to be spatially averaged values over the entire body of the exposed individual, but with the important proviso *that the basic restrictions on localized exposure are not exceeded*“.

Gerade bei Mittelungsgeometrien, die mit sehr wenigen Punktzahlen operieren, ist die Gefahr eines „Übersehens“ des Maximalwertes innerhalb eines dem menschlichen Körper äquivalenten Volumens möglich. Schon aus diesem Grunde wird eine zumindest begleitende Maximalwertsuche immer unumgänglich sein.

Es wird erwartet, dass die internationalen Forschungen auf diesem Gebiet noch eine Zeitlang fortgesetzt werden. Die Untersuchungen sind sehr aufwändig sowie zeit- und kostenintensiv und nehmen schon die Form von Grundlagenforschung an: Es muss eine Vielzahl von repräsentativen Expositionsszenarien gebildet werden, mehrere Beispielorte pro Szenario festgelegt werden, und an diesen Orten eine möglichst feine punktweise, kleinskalige (im Zentimeterbereich) Abtastung der Feldstärken vorgenommen werden. Es entsteht eine Fülle von Datenmaterial, das dann auf die Sinnhaftigkeit von verschiedenen, möglichst einfachen, dabei aber doch den menschlichen Körper nachbildenden Mittelungsgeometrien zu überprüfen ist.

Nach dem oben Gesagten steht aber zu vermuten, dass eine einfache und für alle Szenarien einheitliche Geometrie schwer zu finden sein wird, da die Feldverhältnisse in realen Umgebungen äußerst komplex sind. Das gilt insbesondere auch für den Fall, dass sich, z.B. bei mehrkanaligen Anlagen oder Standortmehrfachnutzung, Felder unterschiedlicher Frequenzen zu einem komplexen Gesamtverlauf überlagern. Ganz unabhängig von praktischen Erwägungen (Aufwand einer Messung) und der Fragestellung, ob solch eine Volumenmittelung überhaupt durch die jeweilige nationale Personenschutznorm gedeckt wird, muss deswegen an dieser Stelle kritisch überprüft werden, ob die *Maximalwertermittlung* nicht ohnehin der einfachere und sichere Weg einer mess- und berechnungstechnischen Expositionsermittlung ist.

3.3 Zusammenfassung

Auch innerhalb eines räumlich eng begrenzten Volumens, dessen Immission und die beeinflussenden Faktoren prinzipiell im vorangegangenen Kapitel untersucht wurden, existieren in der Regel Immissionsverteilungen, die kleinskalig schwanken. Dieser als „Fast Fading“ bezeichnete Effekt tritt dann auf, wenn die Funkwellen von der Basisstation zum Empfängerort aufgrund von Reflexionen über mehrere Ausbreitungspfade gelangen und die einzelnen Teilwellen dabei interferieren. In Abhängigkeit vom Ort treten dabei unterschiedliche Gangunterschiede der Teilwellen auf, so dass die daraus resultierende konstruktive oder destruktive Überlagerung zu örtlich kleinskaligen Schwankungen im Zentimeterbereich führen kann.

Die Häufigkeit der Schwankungen ist besonders groß in derjenigen Richtung, in der ein Hindernis (z.B. eine Wand oder der Boden) senkrecht von der Funkwelle getroffen wird. Die Schwankungsamplitude kann dabei mehr als 20 dB (Faktor 100 bezüglich der Leistungsflussdichte) umfassen.

Numerisch wurden einige Basisszenarien untersucht, um ein Verständnis über die Größenordnung und die dem Fading zugrunde liegenden Wirkungsmechanismen zu erlangen. In der Realität führt vor allem das Vorhandensein von multiplen Reflexionsstellen, z.B. im innerstädtischen Bereich ohne direkte Sicht zur Sendeantenne (d.h. ohne dominanten Ausbreitungspfad) zu deutlichen Verkomplizierungen der Interferenzbilder. Allerdings ist hier auch zu beachten, dass bei Anlagen mit mehreren Mobilfunksystemen (GSM 900, GSM 1800, UMTS) eine Abschwächung der Schwankungsamplitude zu erwarten ist, da sich die Interferenzbilder der einzelnen Frequenzen überlagern und somit Extremalwerte, z.B. tiefe Einbrüche, abgemildert werden können. Eine messtechnische Überprüfung anhand eines Scanner-systems bestätigt die rechentechnisch abgeleiteten Ergebnisse bezüglich Schwankungsintensität und Schwankungshäufigkeit.

Eine veränderte Position von Mobiliar in Innenräumen sowie eine Anwesenheit von Personen führt zu einem deutlich veränderten Feldbild nicht nur in unmittelbarer Umgebung dieser „Störstellen“.

Als praktische Konsequenz der kleinskaligen räumlichen Schwankung lässt sich ableiten, dass mit einer punktwisen Ermittlung die Immission sehr stark unterschätzt werden kann. Ist die Ermittlung von *Extremalwerten* (in der Regel das Maximum) der Immission an einem Ort das Ziel, ist eine geeignete Messmethodik anzuwenden, die einen größeren Raumbereich abtastet und aus dem Interferenzbild das Maximum protokolliert. Hierbei ist zu beachten, dass Interferenzen nicht nur in Innenräumen auftreten.

Die Ermittlung einer „über den Körper gemittelten Immission“ hingegen führt zu einer deutlichen Verkomplizierung der Messung. Unabhängig von Praktikabilitätsbetrachtungen ist es den hieran arbeitenden Forschergruppen bislang noch nicht gelungen, eine geeignete „Mittelungsgeometrie“ zu finden, die die tatsächliche körpermittelte Immission adäquat und mit kleinstmöglichem Fehler beschreibt. Es hat sich vielmehr herausgestellt, dass unterschiedliche Mittelungsgeometrien einen größeren Einfluss auf das Ergebnis haben als unterschiedliche Expositionsszenarien. Außerdem steht zu vermuten, dass unter Umständen für jedes Expositionsszenario eine separate Mittelungsgeometrie die besten Ergebnisse erbringen wird, was eine subjektive Komponente in die Messungen bringt und der Normierungsidee zuwider läuft. Unabhängig davon, dass sich diesbezügliche Untersuchungen noch im Anfangsstadium befinden, und der Fragestellung, ob solch eine Volumenmittelung überhaupt durch die jeweilige nationale Personenschutznorm gedeckt wird, muss deswegen an dieser Stelle kritisch überprüft werden, ob die *Maximalwertermittlung* nicht ohnehin der einfachere und sichere Weg einer mess- und berechnungstechnischen Expositionsermittlung ist.

4 Zeitliche Verteilung der Immission

Zusätzlich zu den in den letzten beiden Kapiteln beschriebenen großräumigen und kleinskali- gen, örtlichen Schwankungen ist die Immission auch *zeitlichen* Schwankungen unterworfen. Ursache hierfür sind z.B. zeitliche Veränderungen der Ausgangsleistung der Mobilfunk- Basisstation (anlagenseitige Schwankungen) oder zeitliche Veränderungen des Ausbreitungs- weges (ausbreitungswegseitige Schwankungen). Diese beiden Ursachen werden im folgenden näher untersucht. Da seitens der anlagenseitigen Schwankungen ein grundlegender Unter- schied zwischen ein- und mehrkanaligen Anlagen besteht, werden diese getrennt behandelt.

Die Erläuterungen in diesem Kapitel beziehen sich primär auf Basisstationen des GSM Mobilfunksystems. Sendeanlagen des neuen UMTS Standards befinden sich derzeit gerade im Aufbau; an einigen Orten sind sie bereits im Probebetrieb. Obschon bei den im ersten Kapitel vorgestellten Messungen UMTS Anlagen bereits in die Erfassung eingegangen sind, ist der derzeitige Probebetrieb (ohne standardgemäße Nutzer) bezüglich der zeitlichen Schwankun- gen nicht repräsentativ für den späteren Normalbetrieb. Deswegen werden UMTS Anlagen in diesem Kapitel vorerst ausgeklammert; definitive Aussagen hierzu sind erst möglich, wenn das UMTS Netz im Normalbetrieb arbeitet und dementsprechende Erfahrungen gesammelt werden konnten.

4.1 Zeitliche Schwankungen seitens der Basisstation

4.1.1 Einkanalige Basisstationen

Unter einkanaligen Basisstationen werden in diesem Abschnitt Anlagen verstanden, die pro Sektor nur über einen Kanal verfügen. Dies ist bei GSM Anlagen der sogenannte Sende Kontrollkanal (BCCH, Broadcast Control Channel). Der BCCH sendet

- konstant mit maximaler Leistung und
- mit voll belegten Zeitschlitzten, auch wenn kein Gespräch über diesen Kanal läuft.

Er bestimmt durch sein permanentes Vorhandensein die minimale Immission der Funkzelle.

Aufgrund des permanenten Sendebetriebs mit maximaler Leistung sind hier prinzipiell kurzzeitige Schwankungen der Sendeleistung nicht zu erwarten.

Laut Aussagen der Netzbetreiber wird die Leistung des BCCH kurzzeitig *nicht* verändert. Es ist lediglich für Optimierungen des Sendernetzes möglich, testweise die Sendeleistung des BCCH zu reduzieren, z.B. auf die Hälfte. Außerdem ist auch möglich, den Downtilt oder die Ausrichtung der Antennen zu verändern. Allerdings haben diese Änderungen längerfristigen Charakter (Tage-, Wochen- oder Monatsbereich); kurzzeitige Schwankungen werden dadurch nicht verursacht.

Trotzdem gibt es Hinweise aus der Literatur, in denen kurzzeitige Immissionsänderungen beobachtet wurden. So wird z.B. in [NEU 03] über kurzzeitige Immissionsschwankungen des BCCH während einer sechstägigen Periode von +4,85 dB bis -5,65 dB bezüglich des Mittelwertes berichtet. Dies ist in Bild 4.1.1 dargestellt. Auch die Schwankungen innerhalb eines Tages, z.B. während Tag 2 ca. 0,00004 bis 0,00008 μV , entsprechen einer Schwankungsbreite von 6 dB. An anderen Tagen, wie z.B. der zweiten Hälfte von Tag 3 oder auch innerhalb von

Tag 4, sind die Schwankungen wesentlich geringer. Leider liegen hier keine weiteren Erkenntnisse über die näheren Messbedingungen vor. Es wird lediglich berichtet, dass keine Objekte in der Umgebung der (Empfangs-) Antenne bewegt wurden.

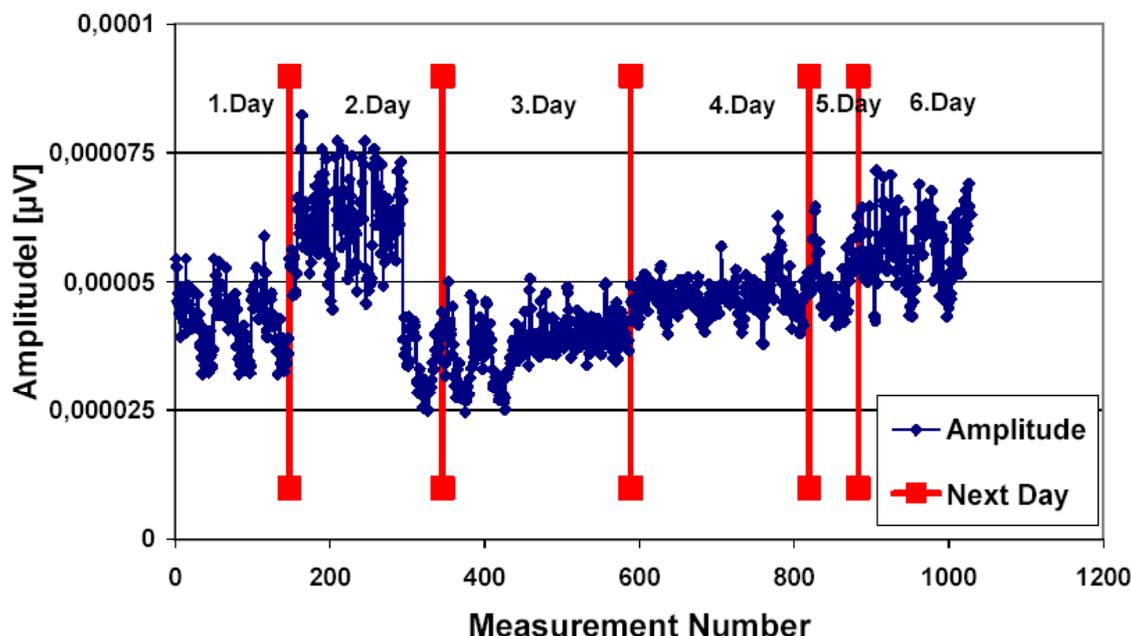


Bild 4.1.1 Dokumentierte Immissionsschwankungen eines BCCH Kanals, aus [NEU 03]

Besonders gravierend ist der „Einbruch“ am Ende des zweiten Tages. Da der Übergang zu den „Normalwerten“ nicht ebenso abrupt, sondern eher „schleichend“ erfolgt, können kontrollierte Leistungs- oder Antennenveränderungen seitens der Basisstation als Ursache ausgeschlossen werden. Über die Ursache dieser Schwankungen lässt sich hier nur spekulieren. Unter Umständen waren die Umgebungsbedingungen so gestaltet, dass zusätzlich zum dominierenden Ausbreitungsweg auch Mehrwegeausbreitung vorlag und sich die entsprechenden Ausbreitungsbedingungen, z.B. durch Witterung, verändert haben. Außerdem wird aufgrund der sehr geringen gemessenen Intensitäten vermutet, dass die Messwertaufnahme nicht mit einem *isotropen* Breitbandmessgerät, sondern mit einem frequenzselektiven Gerät und angeschlossener *nichtisotroper* Antenne erfolgte. Steht diese „ungünstig“ zur Polarisationsrichtung der Basisstationsantenne (z.B. kreuzpolar), könnten minimale Änderungen im Ausbreitungsweg schon zu erheblichen Schwankungen der aufgenommenen Immission in den hier dokumentierten Größenordnungen führen. Dies ist aber nicht mehr als Veränderung der anlagenseitigen Parameter anzusehen, sondern fällt unter die ausbreitungswegabhängigen Schwankungen.

In eigenen Untersuchungen und auch nach den Erfahrungen anderer auf diesem Arbeitsgebiet tätigen Institutionen hat sich der BCCH immer als extrem stabil erwiesen. So zeigt Bild 4.1.3 ein Beispiel einer Messung, bei der in Abständen von einer Minute die Immission des BCCH für den dem Messpunkt zugewandten Sektor bei GSM 900 gemessen wurde. Die Messungen wurden innerhalb eines Gebäudes mit direkter Sicht zur Mobilfunkanlage durchgeführt, die sich in ca. 300 m Entfernung befindet. Zwischen dem Messort in einem Gewerbegebiet und der Basisstation befindet sich eine Straße, auf der unregelmäßig schwacher Autoverkehr herrscht. Bild 4.1.2 zeigt einen Blick vom Messort auf die Basisstation.



Bild 4.1.2 Blick vom Messpunkt auf die Basisstation für die Langzeitmessung in Bild 4.1.3. Die Basisstation, deren BCCH gemessen wurde, ist hervorgehoben

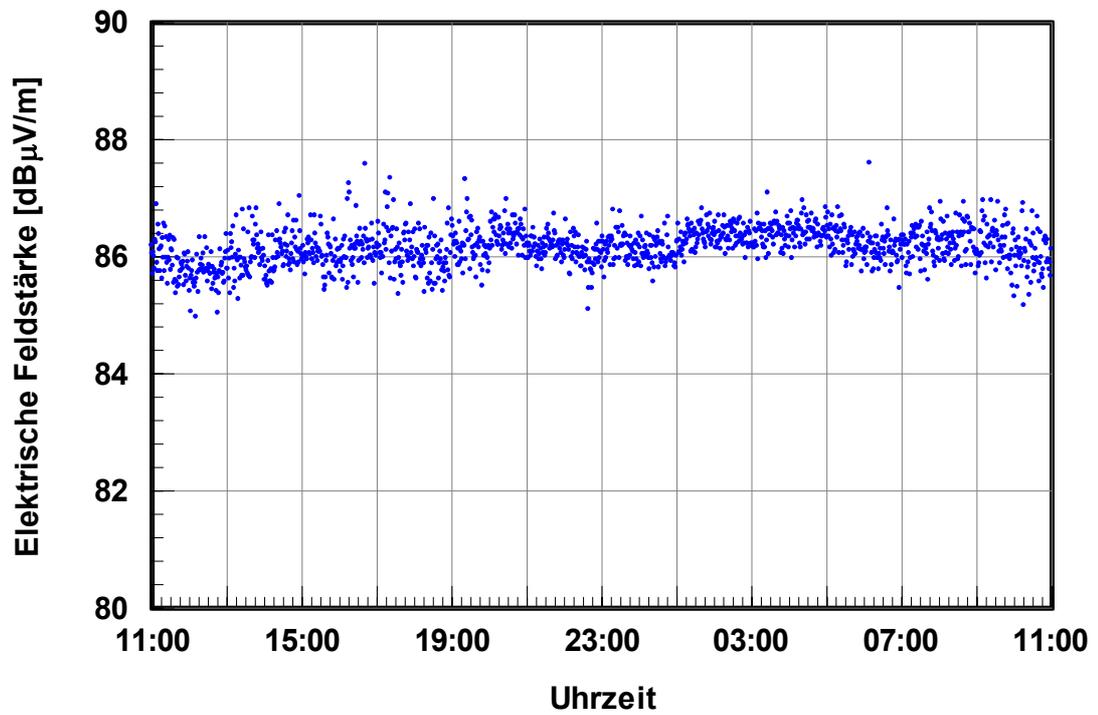


Bild 4.1.3 Ergebnis der Langzeitmessung für die Konfiguration nach Bild 4.1.2

Die Messungen wurden über ein 24 Stunden Intervall von Samstag auf Sonntag durchgeführt, d.h. in der näheren Umgebung der Empfangsantenne befanden sich keine Personen, die durch Bewegungen o.ä. Einfluss auf die Messwerte hätten. Während der Messungen änderten sich die Witterungsbedingungen; es war windig (Bewegungen der in Bild 4.1.2 zu sehenden Bäume) und es regnete zeitweise.

Trotz dieser die Mehrwegeausbreitungsbedingungen möglicherweise beeinflussenden Faktoren ist die Immission vergleichsweise konstant. Über Nacht ist die Schwankungsbreite geringer als am Tage; dies ist auf nicht vorhandenen Autoverkehr auf der Straße zurückzuführen. Trotz großer Entfernung von der Basisstation, Wechsel der Witterungsverhältnisse und Autoverkehr liegen die Schwankungen der Immission im Bereich von 2 dB, während der Nacht sogar unter 1 dB. Ähnliche Schwankungen wie in [NEU 03] konnten nicht beobachtet werden.

4.1.2 Mehrkanalige Basisstationen

Im Gegensatz zu den einkanaligen Basisstationen kommt bei mehrkanaligen Anlagen ein Phänomen hinzu, dass anlagenseitig sehr wohl die abgestrahlte Leistung beeinflusst: Die Leistungsregelung. Die Leistungsregelung sorgt dafür, dass ab dem zweiten Kanal

- nur dann gesendet wird, wenn Gespräche zu übertragen sind,
- in Gesprächspausen das Sendesignal ausgetastet wird (sofern DTX = Discontinuous Transmission aktiviert),
- nur in denjenigen Zeitschlitz gesendet wird, in denen ein Gespräch läuft, und
- die Sendeleistung von Zeitschlitz zu Zeitschlitz unterschiedlich sein kann entsprechend der Verbindungsqualität zwischen Handy und Basisstation (intelligente Leistungsregelung).

UMTS Anlagen verfügen ebenfalls über eine Leistungsregelung, hier liegen aber aufgrund des derzeitigen Probetriebs der Anlagen noch keine Möglichkeiten zu deren messtechnischen Erfassung vor. Es ist aber abzusehen, dass die Leistungsregelung bei UMTS in Vergleich zu GSM wesentlich schneller und feiner abgestuft arbeitet.

Bild 4.1.4 zeigt einen charakteristischen Ausschnitt eines Basisstationssignals über der Zeit, aufgelöst in den 8 Zeitschlitz. Bei Kanal 1 (BCCH) wird als Sendeleistung in allen 8 Zeitschlitz die maximal mögliche Sendeleistung pro Frequenzkanal abgestrahlt, unabhängig davon, ob und wie viele Teilnehmer in diesem Kanal telefonieren und wie weit sie von der Basisstation entfernt sind. Bei Kanal 1 sind die Zeitschlitz 2-7 für mobile Teilnehmer belegbar; die ersten beiden sind für Signalisierungszwecke reserviert.

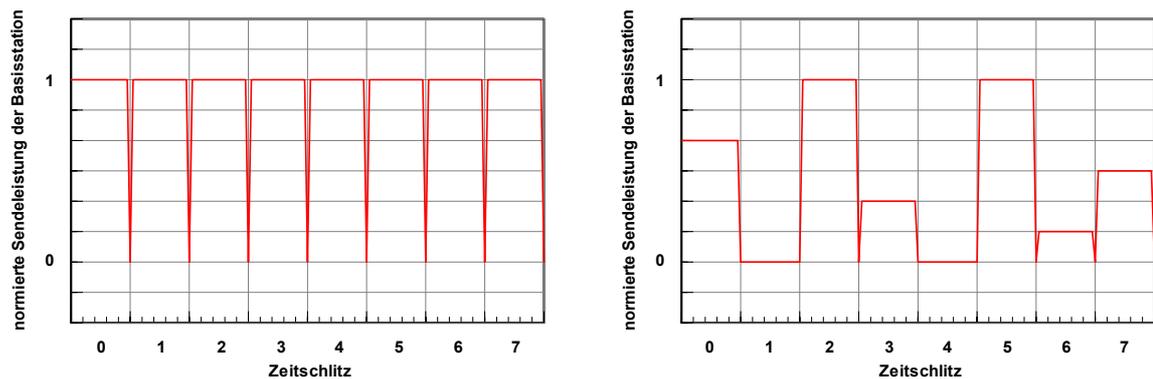


Bild 4.1.4 Funktionsweise der GSM Leistungsregelung als Abhängigkeit der normierten Sendeleistung der Basisstation über der Zeitschlitznummer: Kanal 1 (links), Kanal 2 und Folgekanäle (rechts)

Ab Kanal 2 ist das abgestrahlte Sendesignal abhängig von der Zahl der Telefonierenden und ihrem Abstand zur Basisstation. Die Abstandsabhängigkeit ist in der Realität eher eine Abhängigkeit von der Qualität der Funkverbindung, d.h. die Basisstation regelt ihre Sendeleistung dahingehend ein, dass am Handy eine ausreichende Empfangsleistung vorliegt. So kann es in der Praxis vorkommen, dass zu einem nahe der BS befindlichen Teilnehmer, der innerhalb eines Gebäudes telefoniert, eine höhere Sendeleistung im Zeitschlitz zur Verfügung gestellt (z.B. Zeitschlitz 2 oder 5) wird als zu einem Teilnehmer, der sich weiter weg befindet, aber freie Sicht und damit gute Funkverbindung zum Sender hat (z.B. Zeitschlitz 3). In den Zeitschlitzen 1 und 4 des zweiten Kanals läuft kein Gespräch, hier wird auch keine Leistung gesendet.

Die Leistungsregelung führt zu einer zeitlich schwankenden Immission; hier sind deutliche tageszeitliche Unterschiede auszumachen.

Bild 4.1.5 zeigt als typisches Beispiel für eine tageszeitliche Schwankung in der Nähe einer mehrkanaligen Anordnung eine eigene Messung. Hier waren drei Netzbetreiber mit 2 bis 3 Sektoren und zwei bis vier Kanälen pro Sektor vertreten. Die Messwerte wurden mit einem isotropen Breitbandmessgerät durchgeführt. In Abständen von einer Minute wurde jeweils ein aktueller Messwert aufgenommen und abgespeichert. Die Messwerte sind durch einzelne Punkte dargestellt. Folgende Trends lassen sich ablesen:

- Es kann eine deutliche tageszeitliche Schwankung nachgewiesen werden. In der Zeit zwischen etwa 2 Uhr nachts und 6 Uhr morgens ist die Immission auf einem gleichbleibend niedrigen Pegel. Sie scheint als eine Art „Grundimmission“ nur durch die Aussendungen der BCCH Kanäle bestimmt zu sein. Starke Schwankungen gibt es in dieser „Ruhezeit“ nicht (siehe Abschnitt 4.1.1 zur Konstanz der BCCH-Kanäle).
- Insgesamt sind die Immissionen zwischen 10 Uhr vormittags und 22 Uhr abends auf einem wesentlich höheren Niveau. Die höchsten Immissionen wurden in der Zeit zwischen 16 Uhr und 18 Uhr am Nachmittag gemessen. In der gesamten Zeit zwischen 10 Uhr und 22 Uhr schwankt die Immission zeitlich sehr stark, was auf eine aktive Leistungsregelung und unter Umständen auch auf Fadingeffekte hinweist.

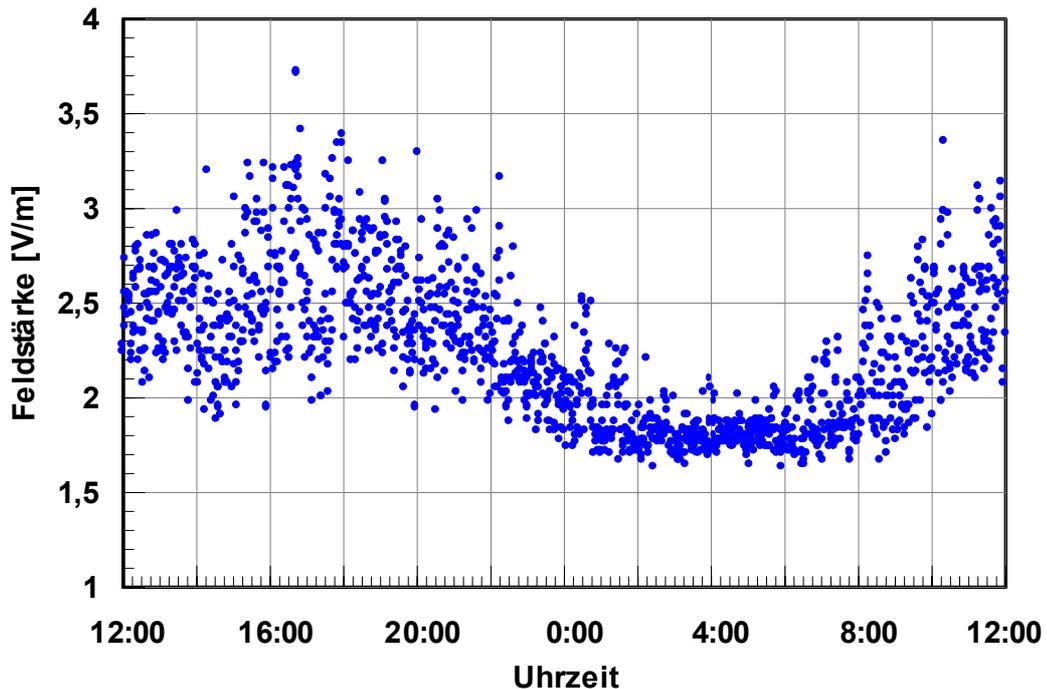


Bild 4.1.5 Ergebnis einer 24 Stunden Messung an einem fixen Messpunkt in der Umgebung einer mehrkanaligen Anlage

Darüber hinaus ist es auch interessant, die Immission über einen noch längeren Zeitpunkt als 24 Stunden zu untersuchen, so z.B. über eine gesamte Woche. Auch hierfür werden im folgenden eigene Messergebnisse präsentiert: Im Umfeld einer mehrkanaligen Anlage wurde wiederum ein isotropes Breitbandmessgerät aufgestellt. Durch vorherige frequenzselektive Messungen wurde sichergestellt, dass die Gesamtimmission am Messpunkt von der nahegelegenen Mobilfunkanlage dominiert wurde.

Hierbei wurde alle zwei Minuten ein Messwert aufgenommen. Die Messungen wurden an einem Dienstag um 10 Uhr gestartet und eine Woche später am Dienstag um 10 Uhr beendet. Die durchgezogenen Linien auf der Tagesachse kennzeichnen die 0 Uhr Markierungen.

Der bereits in Bild 4.1.5 gezeigte tageszeitliche Verlauf wird wiederum gut abgebildet. Bemerkenswert sind folgende Punkte:

- Am Samstag und Sonntag ist die höchste Immission im Tagesverlauf kleiner als an den anderen Wochentagen. Dies ist insbesondere deswegen bemerkenswert, da eine belebte Fußgängerzone an der Nähe des Messortes vorbeiführt, wo vor allem im Verlauf des Samstags mit zahlreichen mobilen Nutzern zu rechnen wäre. Offensichtlich ist dies aber nicht entscheidend, die Basisstation wird eher wochentags durch umliegende „berufstätige“ Nutzer in den Maximalbetrieb gefahren.
- Vor allem in der Nacht vom Freitag auf Samstag sind gegenüber den anderen Nächten höhere Immissionen messbar. Das lässt auf einen vermehrten Handygebrauch in diesem Zeitraum schließen.
- Am Montag Vormittag ist ein „Sprung“ in der Immission erkennbar. Dies kann begründet sein durch einen Aufenthalt von Personen im Raum, in dem die Messanlage installiert war

(Besprechungsraum). Dafür spricht auch der in diesem Zeitraum auftretende besonders niedrige Wert von unter 1,2 V/m, der sogar tiefer liegt als die Grundimmission durch die BCCH. Für den „Sprung“ kommen aber auch eine leichte Positionsänderung der Messanlage oder veränderte Witterungsbedingungen in Frage.

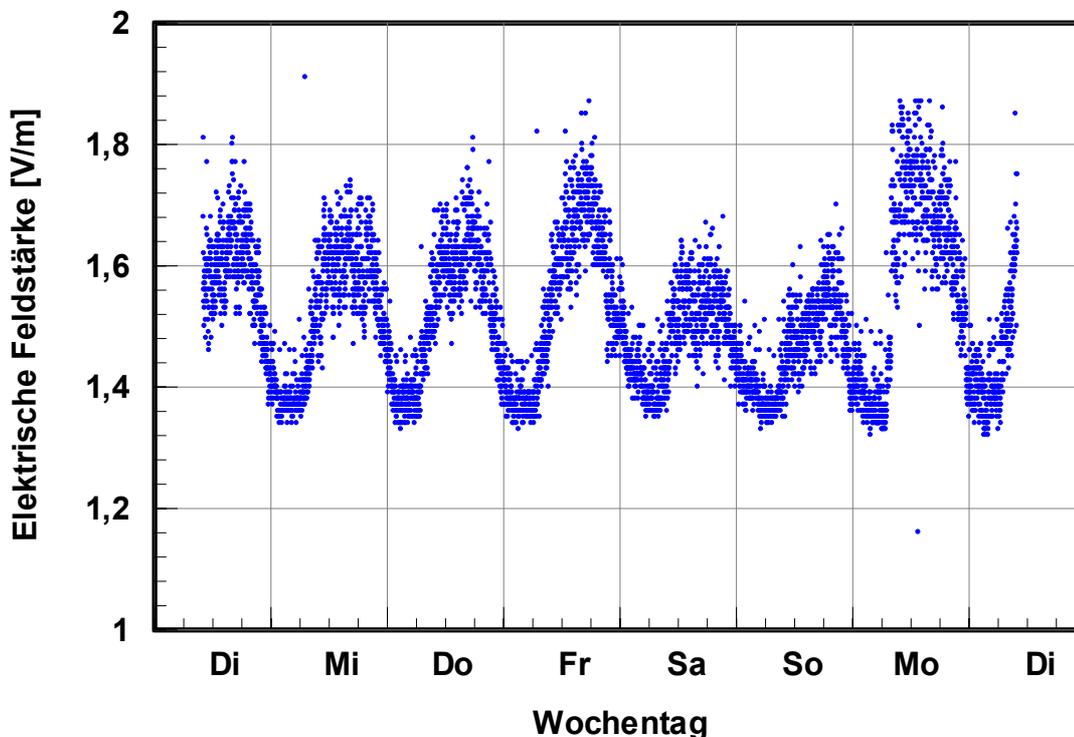


Bild 4.1.6 Ergebnis einer 7 Tage Messung an einem fixen Messpunkt in der Umgebung einer mehrkanaligen Anlage

4.2 Zeitliche Schwankungen seitens des Ausbreitungsweges

Oftmals, vor allem im Falle einer Mehrwegeausbreitung bei Nichtvorhandensein eines dominanten Ausbreitungsweges, sind die Umgebungsbedingungen von Basisstation und Immissionsort und insbesondere deren zeitliche Veränderungen von entscheidender Bedeutung für die Immission an einem festen Immissionsort. Inwieweit dies für den hier betrachteten Spezialfall der „unmittelbaren“ Umgebung der Basisstation (Sicherheitsabstand bis etwa 200 m) relevant ist, hängt von der Situation ab:

Die Immission an Orten mit direkter Sicht zur Sendeantenne (Dominanz eines Ausbreitungsweges) wird von Veränderungen im Ausbreitungsweg, wie z.B. vorbeifahrenden Autos, sich bewegenden Menschen usw. sicherlich weniger beeinflusst als an Orten, bei denen die Energie der Basisstation hauptsächlich durch Reflexionen an (sich verändernden) Objekten oder Subjekten vom Sender zum Immissionsort gelangt. Letzterer Fall wird vorrangig dann vorhanden sein, wenn keine direkten Sichtbedingungen vorhanden sind und der Empfangsort nicht unmittelbar an die Mobilfunkstation angrenzt.

Um eine Vorstellung von der Größenordnung möglicher Immissionsschwankungen zu erlangen, wurden diverse Messungen durchgeführt:

Bereits in Bild 4.1.3 ist gezeigt, wie sich die Immission bei direkter Sicht zur Sendeantenne verhält: Obwohl ein relativ großer Abstand vorhanden war, die Witterungsverhältnisse nicht konstant waren und sich die Ausbreitungsbedingungen durch vorbeifahrende Autos änderten, war die Immission zeitlich vergleichsweise konstant. Dies unterstreicht die Vermutung, dass bei Vorhandensein eines zeitlich konstanten dominierenden Ausbreitungspfades die Immissionsänderung eher gering ausfällt. Lediglich für den Fall, dass sich direkt am Empfangsort die Verhältnisse ändern, z.B. durch die Bewegung von Personen am Empfangsort, kann es zu Immissionsunterschieden kommen (siehe hierzu die Berechnungsergebnisse von Bild 3.1.5 im Vergleich zu Bild 3.1.4).

Für den Fall nichtdirekter Sichtverhältnisse wurden Messungen in einem Laborbereich gemacht, der keine Sicht auf die in Bild 4.1.2 dargestellte Basisstation hat. Der Abstand zur Antenne beträgt hier etwa 250 m.

Der Laborbereich ist in Bild 4.2.1 gezeigt. Auf dem Stativ befindet sich in der weißen Schutzhülle die Empfangsantenne. Als Besonderheit wurde in die Untersuchungen einbezogen, dass eine metallische Schirmkammertür in unmittelbarer Nähe des Messpunktes geöffnet bzw. geschlossen werden konnte. Welche Auswirkungen dies auf die Messungen hatte, wird im folgenden gezeigt.



Bild 4.2.1 Untersuchter Laborbereich mit geschlossener und geöffneter Schirmkammertür ohne direkte Sicht zur Basisstation

Wiederum wurde nur die Immission durch den (zeitlich konstanten) BCCH (GSM 900) gemessen, um die Ergebnisse nicht mit den anlagebedingten tageszeitlichen Schwankungen zu überlagern. Die Messwertaufnahme erfolgte in Abständen von einer Minute.

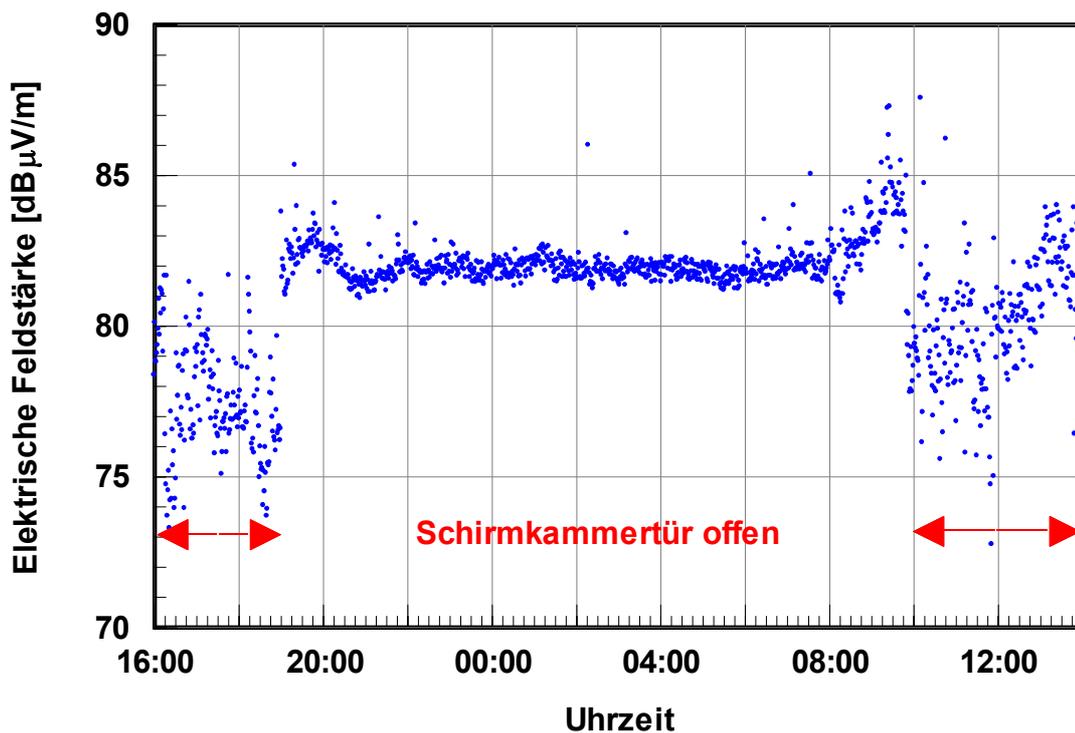


Bild 4.2.2 Langzeitmessung der Immission in der Laborumgebung nach Bild 4.2.1; Schirmkammertür tagsüber permanent geöffnet

Bild 4.2.2 zeigt eine 22 Stunden Messung, bei der von ca. 16 Uhr bis 19 Uhr des ersten Tages und ab 10 Uhr des Folgetages die Schirmkammertür offen stand. Während der Nachtstunden ist die Immissionsschwankungsbreite relativ gering, ca. 1 dB. Dieses Ergebnis entspricht demjenigen von Bild 4.1.3 (freie Sicht) und unterstreicht die zeitliche Konstanz des BCCH. Während der Tagstunden ist die Schwankungsbreite enorm. Die Schwankungen werden verursacht durch

- das Öffnen der Schirmkammertür ab ca. 10 Uhr,
- vor dem Gebäude vorbeifahrende Fahrzeuge,
- Bewegung von Personen im Laborbereich.

Die insgesamt Schwankungsbreite über dem gesamten beobachteten Zeitraum beträgt etwa 15 dB und bewegt sich damit in derselben Größenordnung wie im Beispiel nach Bild 3.1.10 im vorangegangenen Kapitel für GSM 900 simuliert.

Ursache für die beobachteten starken zeitlichen Schwankungen sind durch die Bewegung von Personen oder Objekten hervorgerufene Änderungen der Ausbreitungsbedingungen und damit der im vorigen Kapitel gezeigten Interferenzmuster. Geringfügigste Veränderungen der Umgebungsbedingungen können an einem festen Messpunkt erhebliche Immissionsschwankungen hervorrufen. Dies ist bei einer Ausarbeitung von diesbezüglichen Messvorschriften geeignet zu berücksichtigen.

4.3 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Mobilfunkimmissionen an einem festen Messpunkt unterliegen großskaligen und kleinskaligen zeitlichen Schwankungen. Die Ursachen hierfür können in anlagenbezogene und ausbreitungswegbezogene Ursachen untergliedert werden.

Anlagenbezogene zeitliche Immissionsschwankungen treten vorrangig bei Anlagen mit mehreren Sendekanälen pro Sektor auf. Ursache hierfür ist die Leistungsregelung, die dafür sorgt, dass ab dem zweiten Kanal

- nur dann gesendet wird, wenn Gespräche zu übertragen sind,
- in Gesprächspausen das Sendesignal ausgetastet wird (sofern DTX = Discontinuous Transmission aktiviert),
- nur in denjenigen Zeitschlitz gesendet wird, in denen ein Gespräch läuft, und
- die Sendeleistung von Zeitschlitz zu Zeitschlitz unterschiedlich sein kann entsprechend der Verbindungsqualität zwischen Handy und Basisstation (intelligente Leistungsregelung).

Dies führt zu einer großskaligen Schwankung im Tagesverlauf, d.h. in Zeiten niedriger Auslastung (nachts) ist die Immission vergleichsweise niedrig und auf die Immission der BCCH Kanäle beschränkt, wohingegen vor allem am Nachmittag Auslastungsspitzen auftreten. Auch im Wochenverlauf sind großskalige Schwankungen zu beobachten; am Samstag und Sonntag (und Feiertagen) sind die nachmittäglichen Spitzenwerte kleiner als an Arbeitstagen.

Über dieser großskaligen Schwankung liegt aber noch eine kleinskalige Schwankung, die durch die augenblickliche Netzauslastung, die verbindungsqualitätsabhängige Leistungsregelung und durch DTX bestimmt wird.

Dies führt dazu, dass vor allem in der Nähe von mehrkanaligen Anlagen eine *Augenblicksmessung* die „worst case“ Immissionssituation bei maximal möglicher Anlagenauslastung nur unzureichend beschreibt bzw. unterbewertet. Als Konsequenz hierfür sind während der Messung und in der Auswertung Techniken einzusetzen, die es ermöglichen, die gemessenen Augenblickswerte auf die maximal mögliche Anlagenauslastung zu extrapolieren. Dies ist bei GSM unter Verwendung von frequenzselektiven Messgeräten und mit der Mitarbeit der Betreiber möglich; bei UMTS existieren erste vielversprechende Ansätze. Für nähere Informationen hierzu wird auf den Abschlussbericht zum dritten Arbeitspaket dieses Forschungsvorhabens, der sich mit den konkreten Messverfahren auseinandersetzt, verwiesen.

Ein Beispiel für typische Größenunterschiede zwischen Momentanimmissionen und den Immissionen bei maximaler Anlagenauslastung ist in Bild 4.3.1 exemplarisch dargestellt [aus WUSCH 03_2]: Die blauen Balken bezeichnen die Immission (Prozent vom Feldstärkegrenzwert) einer Augenblicksmessung am Messpunkt, bei der innerhalb einer Maxhold Messung alle Immissionen leistungsmäßig aufaddiert wurden (hier sogar teilweise Überbewertung durch Frequency Hopping). Die orangen Balken bezeichnen die auf maximale Anlagenauslastung hochgerechneten Immissionen unter korrekter Einbeziehung des Frequency Hopping.

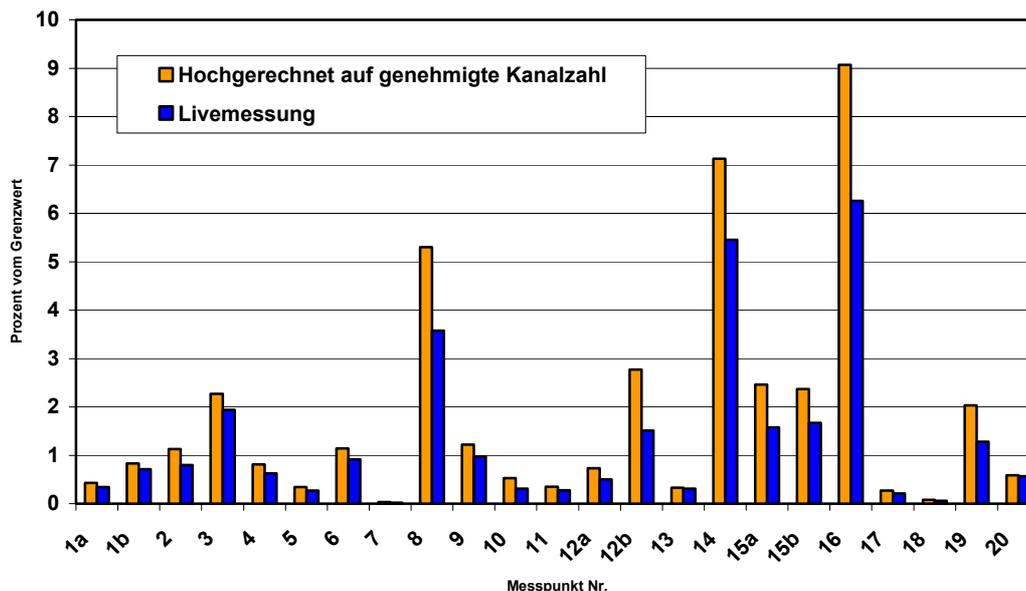


Bild 4.3.1 Unterschied zwischen den Ergebnissen einer Momentanmessung (Livemessung) und dem Zustand bei maximaler Anlagenauslastung (hochgerechnet auf genehmigte Kanalzahl), aus [WUSCH 03_2]

Bei einkanaligen Anlagen hingegen ist die Immission allein durch den nach Erfahrung der Verfasser sehr konstanten BCCH bestimmt. Ausnahmen bilden lediglich Anlagenveränderungen durch die Netzbetreiber im Rahmen von Netzoptimierungen; diese können aber im Rahmen der Messung vom Betreiber erfragt und entsprechend berücksichtigt werden.

Anlagenseitig können auch zukünftig eingesetzte dynamische Veränderungen des Downtiltwinkels sowie der Einsatz von adaptiven Antennen zu einer zeitlich stark wechselnden Immissionssituation führen. Es existieren zur Zeit noch keine Erfassungsmethoden, die die dadurch verursachten Immissionsschwankungen geeignet berücksichtigen. Hierzu ist in den nächsten Jahren Forschungsbedarf absehbar.

Ausbreitungswegbezogene zeitliche Immissionsschwankungen werden von sich verändernden Eigenschaften des Ausbreitungsweges verursacht. Hier sind vor allem dann große Schwankungen zu erwarten, wenn die Energie von der Basisstation zum Immissionsort nicht nur über einen dominierenden Pfad, sondern über mehrere gleichberechtigte Ausbreitungspfade gelangt. Verändern sich Reflexions- oder Transmissionsstellen zeitlich (sich bewegende Personen oder Gegenstände, auch Witterungseinflüsse wie windbewegte Bäume oder Wechsel der Reflexionseigenschaften einer Straße bei Regen), dann verändern sich die Intensitäten und Phasenlagen der einzelnen Teilwellen. Es handelt sich hierbei prinzipiell um eine zeitliche Veränderung des schon im vorigen Kapitel untersuchten Interferenzbildes (Fast Fading). Deswegen ist hier zur exakten Berücksichtigung dieser Effekte im Sinne einer Extremalwertsuche das dort empfohlene Verfahren, d.h. die volumenbezogene Maximalwertsuche, unter Verwendung einer zeitlichen Maxhold Funktion des Messwertaufnahmegerätes, einzusetzen.

4.4 Diskussion der Erfassung einer „aktuell vorliegenden“ Immission

In Unterscheidung zu den im vorliegenden Bericht vor allem im Kapitel 1 präsentierten Immissionen (ortsbezogen maximiert und auf maximale Anlagenauslastung extrapoliert, d.h. zeitlich maximiert) wird oftmals die Angabe einer „realen“ oder „aktuell vorliegenden“ Immission als Vergleichswert für einen Messpunkt gefordert. Dieser Wunsch ist uneingeschränkt nachvollziehbar, stößt dabei aber an folgende technische Grenzen:

1. Wie in den vorangegangenen Abschnitten gezeigt, ist die Feldverteilung an einem Messort sehr komplex und unterliegt erheblichen örtlichen und zeitlichen Schwankungen. Die örtliche Feldverteilung schwankt vor allem in Innenräumen kleinskalig im Zentimeterbereich um bis zu 20 dB, wie Kapitel 3 zeigt. Insofern würde eine „aktuelle“ Immission aus diesem Grunde nur für ein räumlich sehr begrenztes Areal (maximal Zentimeterbereich) gelten. Die Immission in einigen Zentimetern Abstand kann gänzlich anders aussehen. Von daher ist eine Immissionsangabe für einen solchermaßen kleinräumigen Bereich von begrenzter Aussagekraft.
2. Den örtlichen Schwankungen sind zeitliche Schwankungen überlagert, die sich aus anlagenbezogenen Schwankungen (Verkehrslast) sowie aus den ausbreitungswegbezogenen Schwankungen zusammensetzen. An einem festen Messort kann durch auslastungsabhängige Schwankungen der Immissionswert in Bruchteilen von Sekunden um den Faktor der Kanalzahl schwanken (siehe Bild 4.1.5). Durch ausbreitungswegbezogene Effekte sind Immissionsänderungen ebenfalls in Sekundenbruchteilen möglich, die durchaus 15 dB betragen können (siehe Bild 4.2.2). Deswegen ist genau genommen eine „aktuelle“ Immission nur für einen fixen Immissionsort zu einem fixen Zeitpunkt gültig. Wenige Zentimeter daneben bzw. wenige Sekundenbruchteile später kann die Immissionsituation komplett anders aussehen.

Insofern hat ein Immissionswert, der an einem festen Ort zu einem festen Zeitpunkt ermittelt wurde, nur sehr begrenzte Aussagekraft.

Aufgrund dieser spezifischen Charakteristika der örtlichen und zeitlichen Immissionsverteilung ist man gezwungen, zur Angabe eines verlässlichen Immissionswertes entweder die örtlichen Schwankungen oder die zeitlichen Schwankungen oder beide zu eliminieren. Dies kann durch Maximierungs- oder Mittelungstechniken erfolgen.

Maximierungstechniken ergeben einen definierten „worst case“ Wert, der relevant für eine Grenzwertaussage ist und darüber hinaus durch die weitgehende Unabhängigkeit von Zeit und Ort vom Ansatz her reproduzierbar ist.

Mittelungstechniken haben ihre Berechtigung für epidemiologische Fragestellungen, stoßen dabei aber auf erhebliche technische Probleme. Bei den Mittelungstechniken wird das Ergebnis davon abhängig sein, welche zeitlichen Intervalle und örtlichen Volumina in die Mittelung einbezogen werden (insbesondere auf die Abhängigkeit von der Lage der Mittelungsebene wurde bereits in Abschnitt 3.2 eingegangen). Hierbei kommt erschwerend hinzu, dass streng genommen zeitliche und örtliche Mittelungsmessungen *parallel* erfolgen müssten. Bei einer sequenziellen Messung an verschiedenen, örtlich getrennten Mittelungspunkten stimmen die Zeitpunkte der Einzelmessungen an den Mittelungspunkten nicht mehr überein. Die Messung müsste zeitgleich mit einem Cluster von Messensoren erfolgen, die örtlich verteilt sind. Ein solches Sensorencluster erscheint extrem aufwändig und im Hinblick auf den geringen

Erkenntnisgewinn nicht gerechtfertigt. Insgesamt erlauben Mittelungsergebnisse aufgrund ihrer starken Abhängigkeit vom Mittelungsvolumen und Mittelungsintervall keine umfassende Analyse der großskaligen räumlichen Verteilung der Immission.

Mess- und auswertetechnisch können Maximierung und Mittelung wie folgt realisiert werden:

- Örtliche Maximierung und zeitliche Hochrechnung auf den maximalen Anlagezustand: Dies ergibt einen reproduzierbaren „worst case“ Zustand, der für eine Grenzwertaussage relevant ist. Nach diesem Prinzip wurde bei den Messungen in Kapitel 1 verfahren.
- Örtliche Maximierung und Eliminierung der zeitlichen Schwankungen durch Angabe einer „minimalen Immission“ (nur durch Signalisierung wie z.B. BCCH bestimmt, in der Regel nachts erreicht) und einer „maximalen Immission“, die sich aus einer auf maximale Anlagenauslastung extrapolierten Immission ergibt. Insofern wird eine zeitliche Schwankungsbreite für die Immission definiert.
- Örtliche und zeitliche Mittelungen: Die zeitliche Mittelung wird durch eine Mittelwertbildung des Messgerätes im Beobachtungszeitraum erreicht. Die örtliche Mittelung erfolgt durch den o.g. Sensorencluster (aufwändig) oder einfacher durch sequenzielle Verschiebung der Sonde durch den Raum, wobei dabei die Zeitbasis für die Messwertaufnahme an den verschiedenen Punkten nicht dieselbe ist. Ein solches Verfahren ist für einen Grenzwertvergleich nicht relevant, wohl aber für eine Feststellung von durchschnittlichen Immissionen im Rahmen von epidemiologischen Studien. Hierzu sind allerdings spezielle Betrachtungen zu Art und Anzahl der Sensorpositionen anzustellen. Es ist z.B. zu prüfen, wie viele Abtastpositionen in Bezug zur Wellenlänge innerhalb eines Raumes notwendig sind, damit der solchermaßen ortsgemittelte Wert auch das tatsächliche Raummittel darstellt. Gerade für den Bereich der epidemiologischen Studien ist diesbezüglich ein Personendosimeter eine vielversprechende Alternative.

Bei Spektrogrammen, die mit einem Spektrumanalysator im Maxhold Betrieb ermittelt wurden, ist eine zeitliche Mittelwertbildung im Nachhinein nicht mehr möglich, da nicht mehr rekonstruiert werden kann, wann, wie oft und mit welcher Immission die auslastungsabhängigen Transportkanäle zur Gesamtimmission beigetragen haben. Zudem führt eine einfache Aufsummierung aller Einzelimmissionen durch den Umstand des Frequency Hoppings in der Regel zu einer Überschätzung der tatsächlichen Immission, wie bereits in Abschnitt 2.1.6 erläutert. Insofern ist beispielsweise die in Bild 4.3.1 gezeigte „Livemessung“ keine echte Mittelung.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass vor dem Hintergrund der Grenzwertbetrachtung eine örtliche Maximierung und zeitliche Hochrechnung auf den maximalen Auslastungszustand notwendig ist.

Die Angabe einer „aktuell vorliegenden“, realen Immission ist aufgrund der enormen zeitlichen und örtlichen Schwankungen der Immission nicht sinnvoll möglich. Vor dem Hintergrund epidemiologischer Studien sind zeitliche und örtliche Mittelungen durchzuführen, wobei hier vor allem bezüglich der örtlichen Abtastung noch erheblicher Forschungsbedarf besteht. Eine Alternative bilden Personendosimeter.

Literaturverzeichnis

- [26. BImSchV] **26. BImSchV**, *Sechszwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV)*, BGBl. Jg. 1996 Teil I Nr. 66, (20.12.1996).
- [ANFR/DR-15] **Protocole de mesure in situ**, *Visant à vérifier pour les stations émettrices fixes, le respect des limitations, en terme de niveaux de référence, de l'exposition du public aux champs électromagnétiques prévues par la recommandation du Conseil de l'Union Européenne du 12 juillet 1999 (1999/519/CE)*, Agence Nationale des Frequences, Republique Francaise, Edition (2001).
- [BAL 03] **M. Baldauf, A. Herschlein und W. Wiesbeck**, *Exposition in Penthauswohnungen verursacht durch Mobilfunkbasisstationen*, Frequenz, vol. 57, S. 104-111, (2003).
- [BOCH 03-1] **U. Bochtler, R. Eidher und M. Wuschek**, *Großräumige Ermittlung von Funkwellen in Baden-Württemberg, Beschreibung und wissenschaftliche Bewertung des Messvorhabens*, Ergebnisbericht botronic gmbh Stuttgart, Aschaffenburg/Stuttgart/Regensburg, (06. Juli 2003).
- [BOCH 03-2] **U. Bochtler, R. Eidher und M. Wuschek**, *Großräumige Ermittlung von Funkwellen in Baden-Württemberg, Ergebnisse des Funkwellenmessprojektes 2001-2003*, Ergebnisbericht botronic gmbh Stuttgart, Aschaffenburg/Stuttgart/Regensburg, (06. Juli 2003).
- [BOCH 03-3] **U. Bochtler, R. Eidher und M. Wuschek**, *Großräumige Ermittlung von Funkwellen in Baden-Württemberg, Messergebnisse Untersuchungsgebiet Stuttgart*, Ergebnisbericht botronic gmbh Stuttgart, Aschaffenburg/Stuttgart/Regensburg, (06. Juli 2003).
- [BOR 98] **Chr. Bornkessel, U. Kullnick, H.-P. Neitzke und H. Voigt**, *Maßnahmenkatalog zur Verminderung der elektromagnetischen Umweltbelastung*, Studie im Auftrag des MURL NRW, IMST GmbH, Kamp-Lintfort, (1998).
- [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, Literaturstudie zu bestehenden Mess- und Berechnungsverfahren*, Zwischenbericht zum BfS-Projekt, Kamp-Lintfort, (2002).
- [CEPT 02] **Draft CEPT/ERC/Recommendation xxx**, *Measuring Non-ionising Radiation (9 kHz – 300 GHz)*, PT22/rad(01) 26 rev 2, Maisons Alfort, 2002.
- [EMPIRE] **www.empire.de**
- [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).
- [INSITE] **www.remcom.com**
- [KUN 01] **J. Kunisch, E. Zollinger, S. Weitz, J. Simons und J. Pamp**, *Wideband Directional Channel Measurements within the IST ASILUM Project*, DVE ITG Diskussionssitzung "Systeme mit intelligenten Antennen, TU Ilmenau, Ilmenau, (16.03.2001).
- [LEH 03] **H. Lehmann, P. Fritschi und B. Eicher**, *The Variability of the Electric Field in Rooms Near Mobile Phone Base Stations*, 15th. Intl. Zurich Symposium and Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility, Zürich, S. 161-166, (Februar 2003).
- [LFU 03] **Bayerisches Landesamt für Umweltschutz**, *Schirmung elektromagnetischer Wellen im persönlichen Umfeld*, Bay. LFU, (2003).
- [MÖN 03] **G. Mönich und P. O. Ntongmo**, *Dämpfung von Mobilfunkfrequenzen bei Durchstrahlung belaubter Bäume*, Proceedings INICA 2003 Intl. ITG-Conference on Antennas, S. 81-84, VDE-Verlag Berlin, (2003).
- [NEU 03] **G. Neubauer, H. Haider, K. Lamedschwandner, M. Riederer und R. Coray**, *Measurement Methods and Legal Requirements for Exposure Assessment Next to GSM Base Stations*, 15th. Intl. Zurich Symposium and Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility, Zürich, S. 143-148, (Februar 2003).
- [NISV] **NISV**, *Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung*, Schweizerischer Bundesrat, (23. Dezember 1999).
- [OLI 03] **C. Olivier und L. Martens**, *Exposure Assessment around UMTS Base Stations: Extension of Existing Measuring Procedures*, 15th. Intl. Zurich Symposium and Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility, Zürich, S. 167-170, (Februar 2003).
- [PAR 92] **J. D. Parsons**, *The Mobile Radio Propagation Channel*, PENTECH PRESS Publishers, London, (1992).
- [PAU 00] **P. Pauli und D. Moldan**, *Reduzierung hochfrequenter Strahlung im Bauwesen*, Broschüre, Neubiberg, (2000).
- [PAU 03] **P. Pauli und D. Moldan**, *Reduzierung hochfrequenter Strahlung – Baustoffe und Abschirmmaterialien*, 2. Auflage, Neubiberg, (2003).
- [prEN 50400] **prEN 50400 Draft**, *Basic Standard for the Calculation and Measurement of Electromagnetic Fields Related to Human Exposure from Radio Base Stations and Fixed Terminal Stations for Wireless Telecommunication Systems (110 MHz - 40 GHz), When Put into Service*, Draft basic standard, CENELEC TC 106X, (February 2003).
- [SCHÜ 01] **T. M. Schüller**, *Stellungnahme auf den gemeinsamen Fragenkatalog zur öffentlichen Anhörung „Mobilfunk“*, Deutscher Bundestag, Ausschuss für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin, (02.07.2001).

- [SICTA 01] **SICTA**, *Ermittlung der Immissionen und Überprüfung der NISV-Grenzwerte bei Mobilfunknetzen*, Vorschlag der 4 Mobilfunkbetreiber zum BUWAL-Entwurf vom 20. März 2001, Schweiz, Bern, (2001).
- [TÜV 03_1] **E. Sauer und J. Plambeck**, *Immissionsschutz-Messungen (Mobilfunk) in Nordrhein Westfalen, Großraum Essen*, Messbericht und gutachterliche Stellungnahme Nr. 03/3111-3-1, Hamburg, (20.10.2003).
- [TÜV 03_2] **E. Sauer und H. Meisel**, *Immissionsschutz-Messungen (Mobilfunk) in Nordrhein Westfalen, Großraum Köln*, Messbericht und gutachterliche Stellungnahme Nr. 03/3111-3-2, Hamburg, (20.10.2003).
- [TÜV 03_3] **E. Sauer und H. Meisel**, *Immissionsschutz-Messungen (Mobilfunk) in Nordrhein Westfalen, Großraum Bielefeld*, Messbericht und gutachterliche Stellungnahme Nr. 03/3111-3-3, Hamburg, (03.11.2003).
- [TÜV 03_4] **E. Sauer und H. Meisel**, *Immissionsschutz-Messungen (Mobilfunk) in Nordrhein Westfalen, Großraum Wuppertal*, Messbericht und gutachterliche Stellungnahme Nr. 03/3111-3-4, Hamburg, (12.11.2003).
- [WUSCH 02] **M. Wuschek**, *Elektromagnetische Felder in der Umgebung von Mobilfunksendeanlagen im Stadtgebiet von Nürnberg*, Messbericht, Regensburg, (11.03.2002).
- [WUSCH 03_1] **M. Wuschek**, *Ergebnisbericht über die Messung elektromagnetischer Felder in der Umgebung von Mobilfunksendeanlagen*, Messbericht, Regensburg, (14.07.2003).
- [WUSCH 03_2] **M. Wuschek**, *Auswirkung verschiedener Messverfahren auf das Ergebnis von Immissionsmessungen in der Umgebung von GSM-Mobilfunksendeanlagen*, Untersuchung im Auftrag des bayerischen Landesamtes für Umweltschutz im Rahmen einer Messkampagne in Landshut (Niederbayern), Regensburg, (2003).

Abkürzungsverzeichnis

AGW	Anlagengrenzwert
BImSchV	Bundes-Immissionsschutzverordnung
BCCH	Broadcast Control Channel (engl.) → Sende Kontrollkanal
BS	Basisstation
COST	European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research (engl.) → Europäische Zusammenarbeit auf dem Gebiet der wissenschaftlichen und technischen Forschung
DTX	Discontinuous Transmission (engl.) → Sprachtaustattung in Sprechpausen
GSM	Global System for Mobile Communications (engl.) → Globales System für Mobilkommunikation
LMK	Lang-, Mittel- und Kurzwelle
LOS	Line of Sight (engl.) → Sichtverbindung
MS	Mobilstation
MU	Messunsicherheit
NLOS	Non Line of Sight (engl.) → keine Sichtverbindung
RegTP	Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post
SAR	Spezifische Absorptionsrate
SFH	Synthesizer Frequency Hopping
TCH	Traffic Channel (engl.) → Gesprächs- bzw. Nutzkanal
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System (engl.) → Universelles Mobiltelekommunikationssystem

Verzeichnis häufig verwendeter Symbole

d	(lateraler) Abstand
f	Frequenz
h	Höhe
r	(radialer) Abstand
E	Elektrische Feldstärke
H	Magnetische Feldstärke
P	Leistung
S	elektrische Leistungsflussdichte
Z_{F0}	Feldwellenwiderstand des freien Raumes
$\lambda_{(0)}$	(Freiraum-) Wellenlänge

Anhang

Im folgenden sind die Messpunkte der in Abschnitt 2.1 vorgestellten Messreihen beschrieben.

Messreihe IMST 1

Messpunkt	Ort	Höhe	Sicht zur HSA*?	Entfernung zur HSA [m]	Innen/Außen	Immission Mobilfunk gesamt [W/m^2]
AC 1.1	Raafstraße, Aachen	1. OG	ja	ca. 10	innen	$1,8 \cdot 10^{-2}$
AC 1.2	Raafstraße, Aachen	EG	ja	ca. 10	innen	$5,1 \cdot 10^{-4}$
AC 1.3	Raafstraße, Aachen	1. OG	nein	ca. 20	innen	$2,0 \cdot 10^{-4}$
AC 2.1	Bayernallee, Aachen	11. OG	nein	unter der Anlage	innen	$7,3 \cdot 10^{-4}$
AC 2.2	Bayernallee, Aachen	12. OG	nein	unter der Anlage	innen	$1,4 \cdot 10^{-2}$
AC 2.3	Bayernallee, Aachen, Hochhausdach	vor Anl.	ja	ca. 5	außen	$1,4 \cdot 10^{-1}$
AC 2.4	Bayernallee, Aachen	Boden	nein	ca. 160	innen	$2,3 \cdot 10^{-3}$
AC 2.5	Bayernallee, Aachen	Boden	ja	ca. 180	außen	$9,1 \cdot 10^{-3}$
AC 2.6	Bayernallee, Aachen	3. OG	ja	ca. 60	außen	$8,3 \cdot 10^{-3}$
AC 3.1	Kleinmarschierstraße, Aachen	5. OG	nein	unter der Anlage	innen	$1,2 \cdot 10^{-2}$
AC 3.2	Kleinmarschierstraße, Aachen	4. OG	nein	ca. 10	innen	$1,2 \cdot 10^{-2}$
BI 1.1	Dornbergerstraße, Bielefeld	1. OG	nein	unter der Anlage	innen	$1,5 \cdot 10^{-4}$
BI 1.2	Dornbergerstraße, Bielefeld	Boden	ja	ca. 30	außen	$8,3 \cdot 10^{-4}$
BI 1.3	Schäferdreesch, Bielefeld	EG	nein	ca. 20	innen	$1,6 \cdot 10^{-4}$
BI 2.1	Deckertstraße, Bielefeld	12. OG	nein	unter der Anlage	innen	$5,2 \cdot 10^{-3}$
BI 2.2	Deckertstraße, Bielefeld	7. OG	nein	unter der Anlage	innen	$1,1 \cdot 10^{-2}$

BI 2.3	Deckertstraße, Bielefeld	EG	nein	unter der Anlage	innen	$2,6 \cdot 10^{-4}$
BI 3.1	Lüneburger Straße, Bielefeld	EG	ja	ca. 125	innen	$7,5 \cdot 10^{-5}$
BI 3.2	Lüneburger Straße, Bielefeld	EG	ja	ca. 125	außen	$1,7 \cdot 10^{-4}$
BI 3.3	Lüneburger Straße, Bielefeld	5. OG	nein	unter der Anlage	innen	$1,0 \cdot 10^{-3}$
BN 1.1	Meerhausener Straße, Bonn	1. OG	ja	ca. 25	außen	$6,4 \cdot 10^{-4}$
BN 1.2	Meerhausener Straße, Bonn	1. OG	ja	ca. 50	innen	$1,2 \cdot 10^{-4}$
BN 2.1	Wehrhausweg, Bonn	4. OG	ja	ca. 25	innen	$5,6 \cdot 10^{-3}$
BN 2.2	Wehrhausweg, Bonn	EG	nein	ca. 105	innen	$1,8 \cdot 10^{-4}$
BN 2.3	Pützchenweg, Bonn	EG	nein	ca. 140	innen	$3,1 \cdot 10^{-5}$
BN 2.4	Kirchstraße, Bonn	1. OG	ja	ca. 45	innen	$5,8 \cdot 10^{-3}$
BN 2.5	Kirchstraße, Bonn	4. OG	nein	unter der Anlage	innen	$1,3 \cdot 10^{-3}$
BN 3.1	Siegburger Straße, Bonn	1. OG	ja	ca. 90	innen	$3,2 \cdot 10^{-4}$
BN 3.2	Siegburger Straße, Bonn	Boden	ja	ca. 55	außen	$3,0 \cdot 10^{-4}$
BN 3.3	Siegburger Straße, Bonn	2. OG	ja	ca. 20	innen	$1,1 \cdot 10^{-3}$
BN 3.4	Siegburger Straße, Bonn	1. OG	ja	ca. 185	innen	$3,2 \cdot 10^{-4}$
DO 1.1	Wambeler Hellweg, Dortmund	3. OG	nein	unter der Anlage	innen	$9,0 \cdot 10^{-5}$
DO 1.2	Wambeler Hellweg, Dortmund	4. OG	ja	ca. 40	außen	$8,0 \cdot 10^{-4}$
DO 1.3	Dorfstraße, Dortmund	2. OG	ja	ca. 90	innen	$2,3 \cdot 10^{-4}$
DO 1.4	Hubertusweg, Dortmund	2. OG	nein	ca. 165	innen	$1,0 \cdot 10^{-3}$
DO 1.5	Akazienstraße, Dortmund	2. OG	nein	ca. 230	innen	$4,8 \cdot 10^{-4}$
DO 2.1	Wipfelweg, Dortmund	3. OG	ja	ca. 40	außen	$2,8 \cdot 10^{-3}$
DO 2.2	Wipfelweg, Dortmund	EG	ja	ca. 40	außen	$1,8 \cdot 10^{-3}$
DO 2.3	Markhege, Dortmund	EG	ja	ca. 80	innen	$7,0 \cdot 10^{-3}$
DO 3.1	Lange Fuhr, Dortmund	7. OG	nein	unter der Anlage	innen	$6,5 \cdot 10^{-4}$
DO 3.2	Lange Fuhr, Dortmund	7. OG	nein	unter der Anlage	innen	$4,9 \cdot 10^{-3}$

DO 3.3	Lange Fuhr, Dortmund	4. OG	nein	unter der Anlage	innen	$6,9 \cdot 10^{-5}$
DO 3.4	Lange Fuhr, Dortmund	EG	nein	unter der Anlage	innen	$1,4 \cdot 10^{-5}$
D 1.1	Bingener Weg, Düsseldorf	EG	nein	ca. 190	innen	$2,5 \cdot 10^{-4}$
D 1.2	Bingener Weg, Düsseldorf	2. OG	ja	ca. 105	innen	$1,0 \cdot 10^{-4}$
D 1.3	Bingener Weg, Düsseldorf	7. OG	nein	unter der Anlage	innen	$9,2 \cdot 10^{-3}$
D 1.4	Bingener Weg, Düsseldorf	7. OG	nein	unter der Anlage	innen	$2,0 \cdot 10^{-2}$
D 1.5	Bingener Weg, Düsseldorf	EG	nein	unter der Anlage	innen	$3,3 \cdot 10^{-5}$
D 1.6	Bingener Weg, Düsseldorf	EG	nein	ca. 240	innen	$1,9 \cdot 10^{-5}$
D 2.1	Kronprinzenstraße, Düsseldorf	2. OG	ja	ca. 35	innen	$4,2 \cdot 10^{-3}$
D 2.2	Kronprinzenstraße, Düsseldorf	2. OG	nein	ca. 45	innen	$8,8 \cdot 10^{-4}$
KR 1.1	Hochstraße, Krefeld	4. OG	nein	unter der Anlage	innen	$3,3 \cdot 10^{-2}$
KR 1.2	Königsstraße, Krefeld	5. OG	ja	ca. 50	innen	$2,6 \cdot 10^{-2}$
KR 1.3	Königsstraße, Krefeld	4. OG	ja	ca. 20	innen	$8,5 \cdot 10^{-3}$
KR 1.4	Hochstraße, Krefeld	3. OG	nein	ca. 80	innen	$3,5 \cdot 10^{-2}$
KR 2.1	Girmesdyk, Krefeld	EG	nein	ca. 120	innen	$1,0 \cdot 10^{-3}$
KR 2.2	Girmesdyk, Krefeld	Boden	nein	ca. 110	außen	$5,0 \cdot 10^{-3}$
KR 2.3	Girmesdyk, Krefeld	2. OG	ja	ca. 90	innen	$5,4 \cdot 10^{-3}$
KR 2.4	Inrather Straße, Krefeld	3. OG	nein	unter der Anlage	innen	$4,6 \cdot 10^{-4}$
KR 2.5	Hülser Straße, Krefeld	DG	ja	ca. 75	innen	$1,3 \cdot 10^{-2}$
MS 1.1	Ludgeriplatz, Münster	4. OG	nein	unter der Anlage	innen	$5,2 \cdot 10^{-3}$
MS 1.2	Graelstraße, Münster	7. OG	ja	ca. 110	innen	$1,2 \cdot 10^{-2}$
MS 1.3	Hafenstraße, Münster	4. OG	nein	ca. 30	innen	$4,3 \cdot 10^{-4}$
MS 1.4	Ludgeriplatz, Münster	6. OG	nein	ca. 60	innen	$8,3 \cdot 10^{-4}$
MS 1.5	Ludgeriplatz, Münster	6. OG	ja	ca. 60	innen	$1,3 \cdot 10^{-3}$
MS 2.1	Klemensstraße, Münster	12. OG	nein	unter der Anlage	innen	$1,5 \cdot 10^{-2}$

MS 2.2	Klemensstraße, Münster	10. OG	nein	unter der Anlage	innen	$7,0 \cdot 10^{-4}$
MS 2.3	Klosterstraße, Münster	5. OG	ja	ca. 220	innen	$4,9 \cdot 10^{-3}$
OB 1.1	Bismarckstraße, Oberhausen	Boden	ja	ca. 60	außen	$7,4 \cdot 10^{-3}$
OB 1.2	Bismarckstraße, Oberhausen	1. OG	nein	ca. 100	innen	$2,1 \cdot 10^{-3}$
OB 2.1	Egelsfothstraße, Oberhausen	Boden	ja	ca. 65	außen	$1,6 \cdot 10^{-2}$
OB 2.2	Egelsfothstraße, Oberhausen	1. OG	ja	ca. 60	innen	$6,1 \cdot 10^{-4}$
SI 1.1	Schweriner Straße, Siegen	13. OG	ja	ca. 40	innen	$3,2 \cdot 10^{-3}$
SI 1.2	Schweriner Straße, Siegen	Boden	ja	ca. 50	außen	$8,1 \cdot 10^{-4}$
W 1.1	Hansastraße, Wuppertal	2. OG	ja	ca. 65	außen	$2,9 \cdot 10^{-3}$
W 1.2	Frankfurter Straße, Wuppertal	2. OG	nein	unter der Anlage	innen	$1,0 \cdot 10^{-3}$
W 1.3	Frankfurter Straße, Wuppertal	3. OG	nein	ca. 7	innen	$4,6 \cdot 10^{-2}$
W 2.1	Platz der Republik, Wuppertal	3. OG	nein	ca. 210	innen	$5,9 \cdot 10^{-3}$
W 2.2	Platz der Republik, Wuppertal	Boden	nein	ca. 180	außen	$8,3 \cdot 10^{-5}$
W 2.3	Lohsgasse, Wuppertal	Boden	ja	ca. 115	außen	$8,6 \cdot 10^{-3}$
W 2.4	Oberstraße, Wuppertal	EG	ja	ca. 55	innen	$1,0 \cdot 10^{-3}$
W 2.5	Else-Lasker-Schüler-Straße	3. OG	ja	ca. 6	innen	$1,0 \cdot 10^{-3}$
W 2.6	Else-Lasker-Schüler-Straße	EG	nein	ca. 40	innen	$1,8 \cdot 10^{-4}$
W 3.1	Bahnstraße, Wuppertal	Boden	ja	ca. 20	außen	$2,0 \cdot 10^{-3}$
W 3.2	Bahnstraße, Wuppertal	3. OG	nein	ca. 15	innen	$8,5 \cdot 10^{-4}$
W 3.3	Bahnstraße, Wuppertal	1. OG	nein	ca. 5	innen	$9,0 \cdot 10^{-5}$
W 3.4	Bahnstraße, Wuppertal	3. OG	nein	unter der Anlage	innen	$2,4 \cdot 10^{-4}$
W 3.5	Kerntener Straße, Wuppertal	EG	ja	ca. 50	innen	$3,5 \cdot 10^{-4}$

*HSA = Hauptsendeanlage

Messreihe IMST 2

Messpunkt	Ort	Höhe	Sicht zur HSA?	Entfernung zur HSA [m]	Innen/Außen	Immission Mobilfunk gesamt [W/m ²]
D 3.1	Bahlenstraße, Düsseldorf	2. OG	nein	ca. 50	innen	$1,3 \cdot 10^{-2}$
D 3.2	Am Massenberger Kamp, Düsseldorf	2. OG	ja	ca. 145	innen	$7,8 \cdot 10^{-3}$
D 3.3	Bahlenstraße, Düsseldorf	3. OG	ja	ca. 125	innen	$1,9 \cdot 10^{-2}$
D 3.4	Am Massenberger Kamp, Düsseldorf	Boden	nein	ca. 175	außen	$8,4 \cdot 10^{-4}$
D 3.5	Am Massenberger Kamp, Düsseldorf	2. OG	ja	ca. 115	innen	$4,0 \cdot 10^{-2}$
D 4.1	Carlo-Schmid-Straße, Düsseldorf	2. OG	ja	ca. 40	innen	$4,3 \cdot 10^{-5}$
D 4.2	Carlo-Schmid-Straße, Düsseldorf	EG	nein	ca. 70	innen	$6,8 \cdot 10^{-5}$
D 4.3	Ingeborg-Bachmann-Straße, Düsseldorf	EG	nein	ca. 165	innen	$4,2 \cdot 10^{-4}$
D 4.4	Ernst-Lemmer-Straße, Düsseldorf	2. OG	ja	ca. 210	innen	$7,5 \cdot 10^{-4}$
D 5.1	Eiskellerstraße, Düsseldorf	Boden	ja	ca. 80	außen	$6,0 \cdot 10^{-3}$
D 5.2	Eiskellerstraße, Düsseldorf	EG	ja	ca. 60	innen	$3,0 \cdot 10^{-4}$
D 5.3	Eiskellerstraße, Düsseldorf	EG	nein	ca. 80	innen	$2,4 \cdot 10^{-4}$
D 5.4	Eiskellerstraße, Düsseldorf	4. OG	ja	ca. 150	innen	$1,6 \cdot 10^{-2}$
D 5.5	Rathinger Straße, Düsseldorf	4. OG	ja	ca. 150	innen	$3,0 \cdot 10^{-2}$
D 6.1	Joseph-Gockeln-Straße, Düsseldorf	EG	nein	ca. 250	innen	$1,2 \cdot 10^{-4}$
D 6.2	Joseph-Gockeln-Straße, Düsseldorf	Boden	nein	ca. 250	außen	$4,4 \cdot 10^{-4}$
D 6.3	Uerdingerstraße, Düsseldorf	6. OG	nein	ca. 215	innen	$2,9 \cdot 10^{-2}$
D 7.1	Brehmstraße, Düsseldorf	3. OG	ja	ca. 80	innen	$5,5 \cdot 10^{-3}$
D 7.2	Brehmstraße, Düsseldorf	Boden	ja	ca. 150	außen	$1,3 \cdot 10^{-3}$
D 7.3	Brehmstraße Ecke Weseler Str., Düsseldorf	Boden	nein	ca. 530	außen	$9,6 \cdot 10^{-3}$

D 8.1	Morper Straße, Düsseldorf	1. OG	ja	ca. 85	innen	$3,9 \cdot 10^{-3}$
D 8.2	Morper Straße, Düsseldorf	Boden	ja	ca. 110	außen	$3,8 \cdot 10^{-2}$
D 8.3	Nachtigallstraße, Düsseldorf	EG	ja	ca. 55	innen	$7,0 \cdot 10^{-4}$
D 8.4	Büdingenstraße, Düsseldorf	Boden	ja	ca. 95	außen	$1,3 \cdot 10^{-2}$
D 8.5	Nachtigallstraße, Düsseldorf	3. OG	ja	ca. 70	innen	$2,8 \cdot 10^{-3}$
D 9.1	Schwerin Straße, Düsseldorf	Boden	ja	ca. 95	außen	$8,7 \cdot 10^{-5}$
D 9.2	Kaiserswerther Straße, Düsseldorf	3. OG	ja	ca. 140	innen	$4,1 \cdot 10^{-5}$
D 9.3	Kaiserswerther Straße, Düsseldorf	Boden	nein	ca. 120	außen	$1,4 \cdot 10^{-3}$
D 9.4	Kaiserswerther Straße, Düsseldorf	3. OG	ja	ca. 120	innen	$1,1 \cdot 10^{-3}$
D 9.5	Kleverstraße, Düsseldorf	4. OG	ja	ca. 10	innen	$5,8 \cdot 10^{-4}$
D 9.6	Kleverstraße, Düsseldorf	4. OG	nein	ca. 15	innen	$1,4 \cdot 10^{-4}$
D 10.1	Hülsmeier Straße, Düsseldorf	Boden	ja	ca. 170	außen	$6,8 \cdot 10^{-5}$
D 10.2	Am Mergelsberg, Düsseldorf	Boden	nein	ca. 1350	außen	$1,1 \cdot 10^{-4}$
D 10.3	Luckemeyer Straße, Düsseldorf	3. OG	ja	ca. 85	innen	$4,3 \cdot 10^{-4}$
D 10.4	Luckemeyer Straße, Düsseldorf	7. OG	nein	unter der Anlage	innen	$5,3 \cdot 10^{-5}$
D 10.5	Am Geisterberg 93, Düsseldorf	1. OG	ja	ca. 170	innen	$5,8 \cdot 10^{-5}$
D 11.1	Bender Straße, Düsseldorf	1. OG	ja	ca. 55	innen	$2,6 \cdot 10^{-5}$
D 11.2	Bender Straße, Düsseldorf	1. OG	nein	ca. 60	innen	$1,6 \cdot 10^{-6}$
D 11.3	Metzkauser Straße, Düsseldorf	EG	ja	ca. 50	innen	$2,0 \cdot 10^{-5}$
D 11.4	Metzkauser Straße, Düsseldorf	Boden	ja	ca. 75	außen	$3,1 \cdot 10^{-4}$
D 11.5	Metzkauser Straße, Düsseldorf	EG	ja	ca. 30	innen	$7,0 \cdot 10^{-6}$
D 11.6	Bender Straße, Düsseldorf	1. OG	ja	ca. 120	innen	$4,2 \cdot 10^{-5}$
D 11.7	Bender Straße, Düsseldorf	3. OG	ja	ca. 80	innen	$2,4 \cdot 10^{-4}$
D 12.1	Alt Niederkassel, Düsseldorf	1. OG	ja	ca. 25	innen	$1,2 \cdot 10^{-2}$
D 12.2	Alt Niederkassel, Düsseldorf	EG	ja	ca. 25	innen	$2,8 \cdot 10^{-3}$

D 12.3	Alt Niederkassel, Düsseldorf	1. OG	ja	ca. 25	innen	$4,1 \cdot 10^{-3}$
D 12.4	Niederkasseler Straße, Düsseldorf	3. OG	ja	ca. 500	außen	$1,9 \cdot 10^{-4}$
D 12.5	Bürgener Weg, Düsseldorf	Boden	nein	ca. 500	außen	$5,0 \cdot 10^{-5}$
D 13.1	Südallee, Düsseldorf	2. OG	nein	ca. 105	innen	$4,7 \cdot 10^{-3}$
D 13.2	Südallee, Düsseldorf	EG	ja	ca. 60	innen	$2,4 \cdot 10^{-4}$
D 14.1	Richardstraße, Düsseldorf	1. OG	ja	ca. 65	innen	$1,5 \cdot 10^{-3}$
D 14.2	Richardstraße, Düsseldorf	Boden	ja	ca. 115	außen	$1,4 \cdot 10^{-3}$

Messreihe IMST 3

Messpunkt	Ort*	Höhe	Sicht zur HSA?	Entfernung zur HSA [m]	Innen/Außen	Immission Mobilfunk gesamt [W/m^2]
PE 1	Witten	1. OG	ja	ca. 30	innen	$2,1 \cdot 10^{-5}$
PE 2	Witten	EG	ja	ca. 30	innen	$1,9 \cdot 10^{-6}$
PE 3	Witten	EG	ja	ca. 25	innen	$1,6 \cdot 10^{-6}$
PE 4	Witten	Boden	ja	ca. 25	außen	$1,5 \cdot 10^{-5}$
PE 5	Witten	Boden	ja	ca. 50	außen	$1,3 \cdot 10^{-4}$
DU 1	Duisburg	3. OG		ca. 20	innen	$2,0 \cdot 10^{-4}$
DU 2	Duisburg	3. OG		ca. 30	innen	$3,0 \cdot 10^{-4}$
DU 3	Duisburg	3. OG	ja	ca. 100	innen	$2,7 \cdot 10^{-5}$
DU 4	Duisburg	7. OG	ja	ca. 130	innen	$5,3 \cdot 10^{-4}$
DU 5	Duisburg	7. OG	ja	ca. 130	innen	$5,1 \cdot 10^{-4}$
V 7.1	Lorch	EG	nein	unter der Anlage	innen	$6,7 \cdot 10^{-5}$
V 7.2	Lorch	EG	nein	unter der Anlage	innen	$6,9 \cdot 10^{-6}$
V 7.3	Lorch	Boden	ja	ca. 20	außen	$4,5 \cdot 10^{-4}$
V 7.4	Lorch	Boden	ja	ca. 30	außen	$4,9 \cdot 10^{-4}$
D 1	Düsseldorf	10. OG	nein	unter der Anlage	innen	$3,3 \cdot 10^{-6}$
D 2	Düsseldorf	9. OG	nein	unter der Anlage	innen	$2,0 \cdot 10^{-4}$
D 3	Düsseldorf	3. OG	nein	unter der Anlage	innen	$7,1 \cdot 10^{-6}$
D 4	Düsseldorf	EG	nein	unter der Anlage	innen	$4,1 \cdot 10^{-5}$
D 5	Düsseldorf	EG	nein	ca. 100	innen	$3,0 \cdot 10^{-6}$
D 6	Düsseldorf	EG	ja	ca. 30	innen	$5,1 \cdot 10^{-3}$

AL 1	Velbert	4. OG	nein	unter der Anlage	innen	$8,1 \cdot 10^{-4}$
AL 2	Velbert	4. OG	nein	unter der Anlage	innen	$7,9 \cdot 10^{-4}$
AL 3	Velbert	4. OG	nein	unter der Anlage	innen	$4,7 \cdot 10^{-4}$
AL 4	Velbert	3. OG	nein	unter der Anlage	innen	$9,9 \cdot 10^{-5}$
AL 5	Velbert	3. OG	nein	unter der Anlage	innen	$5,5 \cdot 10^{-5}$
V 12.2	Birkenfeld	2. OG	ja	ca. 30	innen	$1,0 \cdot 10^{-4}$
V 12.3	Birkenfeld	3. OG	ja	ca. 40	innen	$2,9 \cdot 10^{-4}$
V 12.4	Birkenfeld	2. OG	ja	ca. 100	innen	$3,2 \cdot 10^{-4}$
V 12.5	Birkenfeld	4. OG	ja	ca. 50	innen	$4,2 \cdot 10^{-5}$
V 13.2	Nussloch	EG	nein	unter der Anlage	innen	$7,3 \cdot 10^{-7}$
V 13.3	Nussloch	2. OG	ja	ca. 70	innen	$4,6 \cdot 10^{-5}$
V 13.4	Nussloch	1. OG	ja	ca. 70	innen	$1,3 \cdot 10^{-4}$
V 14.1	Saarlouis, Dach vor den Antennen	Dach	ja	ca. 5	außen	$5,0 \cdot 10^{-2}$
V 14.2	Saarlouis	22. OG	nein	unter der Anlage	innen	$1,7 \cdot 10^{-5}$
V 14.3	Saarlouis	22. OG	nein	unter der Anlage	innen	$3,5 \cdot 10^{-5}$
V 14.4	Saarlouis	Boden	ja	ca. 50	außen	$7,5 \cdot 10^{-6}$
V 15.2	Heidelberg	Boden	nein	ca. 10	außen	$7,0 \cdot 10^{-4}$
V 15.3	Heidelberg	6. OG	ja	ca. 80	innen	$3,3 \cdot 10^{-6}$
V 15.4	Heidelberg	4. OG	ja	ca. 30	innen	$2,1 \cdot 10^{-4}$
PL 1	Witten	5. OG	ja	ca. 20	innen	$3,8 \cdot 10^{-4}$
PL 2	Witten	Boden	ja	ca. 220	außen	$1,7 \cdot 10^{-4}$
PL 3	Witten	Boden	ja	ca. 140	außen	$7,0 \cdot 10^{-5}$
PL 4	Witten	Boden	ja	ca. 75	außen	$9,6 \cdot 10^{-5}$
PL 5	Witten	Boden	ja	ca. 40	außen	$2,1 \cdot 10^{-4}$

* Aus Datenschutzgründen erfolgt keine detaillierte Angabe des Messortes

Messreihe Nürnberg [WUSCH 02, WUSCH 03_1]

Messpunkt	Ort	Höhe	Sicht zur HSA?	Entfernung zur HSA [m]	Innen/Außen	Immission Mobilfunk gesamt [W/m ²]*
N 02.1a	Fischbacher Hauptstraße, Nürnberg	Boden	ja	keine Angabe	außen	$7,4 \cdot 10^{-5}$
N 02.1b	Fischbacher Hauptstraße, Nürnberg	?	ja	keine Angabe	innen	$5,0 \cdot 10^{-4}$
N 02.1c	Fischbacher Hauptstraße, Nürnberg	Boden	ja	keine Angabe	außen	$8,4 \cdot 10^{-5}$
N 02.2a	Paniersplatz, Nürnberg	?	ja	keine Angabe	innen	$1,8 \cdot 10^{-2}$
N 02.2b	Schwanhäuserstraße, Nürnberg	?	ja	keine Angabe	innen	$2,8 \cdot 10^{-2}$
N 02.3a	Röthenbacher Hauptstraße, Nürnberg	Boden	ja	keine Angabe	außen	$1,5 \cdot 10^{-4}$
N 02.3b	Stuttgarter Straße, Nürnberg	Boden	ja	keine Angabe	außen	$1,3 \cdot 10^{-3}$
N 02.4a	Schleichstraße, Nürnberg	1. OG	teilw.	keine Angabe	innen	$8,3 \cdot 10^{-4}$
N 02.4b	Weißburger Straße, Nürnberg	1. OG	teilw.	keine Angabe	innen	$2,7 \cdot 10^{-4}$
N 02.4c	Schussleitenwer, Nürnberg	8. OG	teilw.	keine Angabe	innen	$1,2 \cdot 10^{-2}$
N 02.5a	Edmund-Rumpler-Weg, Nürnberg	Boden	ja	keine Angabe	außen	$2,4 \cdot 10^{-3}$
N 02.6a	Rennweg, Nürnberg	4. OG	nein	keine Angabe	innen	$2,2 \cdot 10^{-3}$
N 02.6b	Rennweg, Nürnberg	4. OG	ja	keine Angabe	außen	$2,8 \cdot 10^{-1}$
N 02.6c	Rennweg, Nürnberg	4. OG	ja	keine Angabe	innen	$7,8 \cdot 10^{-2}$
N 02.6d	Fenitzer Straße/Rennweg, Nürnberg	Boden	ja	keine Angabe	außen	$1,9 \cdot 10^{-3}$
N 02.7a	Nibelungenstraße, Nürnberg	5. OG	ja	keine Angabe	innen	$1,9 \cdot 10^{-2}$
N 02.7b	Nibelungenstraße, Nürnberg	5. OG	ja	keine Angabe	außen	$7,6 \cdot 10^{-2}$
N 02.7c	Nibelungenplatz, Nürnberg	4. OG	ja	keine Angabe	innen	$4,9 \cdot 10^{-2}$
N 02.8a	Friedrich-Ebert-Platz, Nürnberg	Boden	ja	keine Angabe	außen	$4,5 \cdot 10^{-3}$
N 02.9a	Ludwigsplatz, Nürnberg	Boden	ja	keine Angabe	außen	$1,2 \cdot 10^{-3}$

N 02.10a	U-Bahnstation „Weißer Turm“, Nürnberg	Boden	ja	keine Angabe	außen	$2,5 \cdot 10^{-5}$
N 02.10b	Zwischengeschoss zu N 02.10a		ja	keine Angabe	?	$1,4 \cdot 10^{-2}$
N 03.1a	Steinplattenweg, Nürnberg	Boden	ja	ca. 300	außen	$2,3 \cdot 10^{-4}$
N 03.1b	Steinplattenweg, Nürnberg	2. OG	nein	ca. 300	innen	$6,3 \cdot 10^{-5}$
N 03.2a	Kesslerplatz, Nürnberg	4. OG	ja	ca. 165	innen	$2,2 \cdot 10^{-2}$
N 03.2b	Kesslerplatz, Nürnberg	4. OG	ja	ca. 150	innen	$1,2 \cdot 10^{-2}$
N 03.3a	Herschelplatz, Nürnberg	1. OG	ja	ca. 110	innen	$4,0 \cdot 10^{-3}$
N 03.3b	Herschelplatz, Nürnberg	2. OG	ja	ca. 110	innen	$4,2 \cdot 10^{-3}$
N 03.4a	Wilhelm-Marx-Straße, Nürnberg	Boden	ja	ca. 5	außen	$1,8 \cdot 10^{-3}$
N 03.4b	Wilhelm-Marx-Straße, Nürnberg	3. OG	ja	ca. 40	innen	$1,7 \cdot 10^{-3}$
N 03.4c	Amalienstraße, Nürnberg	Boden	ja	ca. 45	außen	$2,2 \cdot 10^{-4}$
N 03.5a	Höfleser Hauptstraße, Nürnberg	Boden	ja	ca. 75	außen	$8,8 \cdot 10^{-3}$
N 03.5b	Höfleser Hauptstraße, Nürnberg	1. OG	ja	ca. 80	innen	$2,8 \cdot 10^{-2}$
N 03.6a	Bahndamm südlich Aischweg, Nürnberg	Boden	ja	ca. 100	außen	$1,3 \cdot 10^{-2}$
N 03.6b	Dambacher Weg, Nürnberg	1. OG	ja	ca. 150	außen	$2,3 \cdot 10^{-3}$
N 03.6c	Flexdorfer Weg, Nürnberg	Boden	ja	ca. 205	außen	$3,5 \cdot 10^{-3}$
N 03.7a	Im Steinlach, Nürnberg	Boden	ja	ca. 90	außen	$8,9 \cdot 10^{-4}$
N 03.7b	Beim Wahlbaum, Nürnberg	Boden	ja	ca. 55	außen	$3,1 \cdot 10^{-3}$
N 03.7c	Beim Wahlbaum, Nürnberg	1. OG	ja	ca. 60	außen	$4,0 \cdot 10^{-3}$
N 03.8	Saarbrückener Straße, Nürnberg	Boden	ja	ca. 195	außen	$1,4 \cdot 10^{-4}$
N 03.9	Wichernstraße, Nürnberg	Boden	ja	ca. 105	außen	$1,0 \cdot 10^{-3}$
N 03.10a	Joh.-Sebsatian-Bach-Straße, Nürnberg	Dach OG	ja	ca. 25	innen	$1,4 \cdot 10^{-1}$
N 03.10b	Joh.-Sebsatian-Bach-Straße, Nürnberg	4. OG	nein	ca. 30	innen	$3,3 \cdot 10^{-4}$

* Im Unterschied zur Originalquelle wurde für die Immissionswerte in dieser Tabelle die Messunsicherheit herausgerechnet

Messreihe TÜV [TÜV 03_1 bis TÜV 03_4]

Messpunkt	Ort	Höhe	Sicht zur HSA?	Entfernung zur HSA [m]	Innen/Außen	Immission Mobilfunk gesamt [W/m ²]
T-E 1.1	Rellinghauser Str./Von-Einem-Str., Essen	Boden	ja	ca. 150	außen	$6,3 \cdot 10^{-4}$
T-E 1.2	Richard-Wagner-Straße, Essen	7. OG	nein	unter der Anlage	innen	$7,2 \cdot 10^{-5}$
T-E 1.3	Richard-Wagner-Straße, Essen	5. OG	nein	unter der Anlage	innen	$5,3 \cdot 10^{-5}$
T-E 1.4	Richard-Wagner-Straße, Essen	EG	nein	unter der Anlage	innen	$4,5 \cdot 10^{-5}$
T-E 2.1	Bocholder Straße, Essen	5. OG	ja	Anlagengebäude	innen	$1,6 \cdot 10^{-4}$
T-E 2.2	Bocholder Straße, Essen	3. OG	ja	Anlagengebäude	innen	$1,3 \cdot 10^{-4}$
T-E 2.3	Bocholder Straße, Essen	1. OG	nein	Anlagengebäude	innen	$2,8 \cdot 10^{-5}$
T-E 2.4	Bocholder Straße, Essen				innen	$6,0 \cdot 10^{-4}$
T-KEV3.1	Basilikastraße, Kevelaer	Boden	ja	ca. 50	außen	$2,2 \cdot 10^{-4}$
T-KEV3.2	Bleichstraße, Kevelaer	Boden	nein	ca. 50	außen	$9,3 \cdot 10^{-5}$
T-KEV3.3	Basilikastraße, Kevelaer	2. OG	ja	Anlagengebäude	innen	$3,4 \cdot 10^{-5}$
T-KEV3.4	Basilikastraße, Kevelaer	2. OG	nein	unter der Anlage	innen	$1,3 \cdot 10^{-4}$
T-BOT4.1	An Sankt Johannes, Bottrop	Boden	ja	ca. 150	außen	$5,6 \cdot 10^{-4}$
T-BOT4.2	An Sankt Johannes, Bottrop	Boden	ja	ca. 100	außen	$5,9 \cdot 10^{-4}$
T-BOT4.3	An Sankt Johannes, Bottrop	Boden	ja	ca. 50	außen	$3,3 \cdot 10^{-4}$
T-BOT4.4	An Sankt Johannes, Bottrop	EG	teilw.		innen	$6,4 \cdot 10^{-5}$
T-OB 5.1	Sanderstraße, Oberhausen	2. OG	nein	unter der Anlage	innen	$9,1 \cdot 10^{-4}$
T-OB 5.2	Sanderstraße, Oberhausen	1. OG	nein	unter der Anlage	innen	$1,9 \cdot 10^{-4}$
T-OB 5.3	Sanderstraße, Oberhausen	EG	ja	ca. 30	innen	$3,5 \cdot 10^{-3}$
T-OB 5.4	Sanderstraße, Oberhausen	2. OG	ja	ca. 30	innen	$8,5 \cdot 10^{-4}$

T-DU 6.1	Walther-Rathenau-Straße, Duisburg	Boden	ja	ca. 100	außen	$1,2 \cdot 10^{-5}$
T-DU 6.2	Walther-Rathenau-Straße, Duisburg	Boden	nein	ca. 10	außen	$2 \cdot 10^{-6}$
T-DU 6.3	Walther-Rathenau-Straße, Duisburg	6. OG	nein	unter der Anlage	innen	$1 \cdot 10^{-6}$
T-DU 6.4	Walther-Rathenau-Straße, Duisburg	3. OG	nein	unter der Anlage	innen	$4 \cdot 10^{-8}$
T-K 1.1	Fröbelplatz, Köln	EG	nein	ca. 70	innen	$1,0 \cdot 10^{-5}$
T-K 1.2	Fröbelplatz, Köln	Boden	teilw.	ca. 70	außen	$5,5 \cdot 10^{-5}$
T-K 1.3	Vogelsangerstraße, Köln	1. OG	ja	ca. 40	innen	$8 \cdot 10^{-6}$
T-K 1.4	Geisselstraße, Köln	2. OG	ja	ca. 60	innen	$3 \cdot 10^{-6}$
T-K 2.1	Hammerschmidtstraße, Köln	2. OG	nein	ca. 70	innen	$1,0 \cdot 10^{-3}$
T-K 2.2	Hammerschmidtstraße, Köln	Boden	ja	ca. 70	außen	$1,5 \cdot 10^{-3}$
T-K 2.3	Rudolf-Buch-Straße, Köln	2. OG	ja	ca. 70	innen	$6,2 \cdot 10^{-4}$
T-K 2.4	Rudolf-Buch-Straße, Köln	Boden	ja	ca. 70	außen	$1,5 \cdot 10^{-3}$
T-DN 3.1	Olefstraße, Düren	5. OG	ja	ca. 50	innen	$5,1 \cdot 10^{-4}$
T-DN 3.2	Olefstraße, Düren	5. OG	ja	ca. 50	außen	$5,8 \cdot 10^{-4}$
T-DN 3.3	Olefstraße, Düren	1. OG	teilw.	ca. 50	innen	$3,9 \cdot 10^{-5}$
T-DN 3.4	Olefstraße, Düren	Boden	nein	ca. 50	außen	$6,9 \cdot 10^{-4}$
T-DN 3.5	Olefstraße, Düren	2. OG	nein	ca. 50	innen	$1,3 \cdot 10^{-4}$
T-SBG4.1	Hochstraße, Siegburg	Boden	nein	direkt an HSA	außen	$1,3 \cdot 10^{-4}$
T-SBG4.2	Hochstraße, Siegburg	Boden	ja	ca. 50	außen	$1,3 \cdot 10^{-3}$
T-SBG4.3	Ludwigstraße, Siegburg	Boden	ja	ca. 100	außen	$5,5 \cdot 10^{-4}$
T-SBG4.4	Ludwigstraße, Siegburg	Boden	ja	ca. 150	außen	$6,2 \cdot 10^{-4}$
T-BGL5.1	Baumgarten, Bergisch-Gladbach	EG	nein	ca. 70	innen	$7,3 \cdot 10^{-5}$
T-BGL5.2	Friedhofsweg, Bergisch-Gladbach	Boden	ja	ca. 100	außen	$2,8 \cdot 10^{-3}$
T-BGL5.3	Gladbacher Straße, Bergisch-Gladbach	5. OG	nein	unter der Anlage	innen	$1,8 \cdot 10^{-4}$
T-BGL5.4	Gladbacher Straße, Bergisch-Gladbach	5. OG	nein	unter der Anlage	innen	$1,1 \cdot 10^{-3}$

T-BGL5.5	Gladbacher Straße, Bergisch-Gladbach	4. OG	nein	unter der Anlage	innen	$2,5 \cdot 10^{-5}$
T-BGL5.6	Gladbacher Straße, Bergisch-Gladbach	2. OG	nein	unter der Anlage	innen	$1,4 \cdot 10^{-5}$
T-BGL5.7	Gladbacher Straße, Bergisch-Gladbach	2. OG	nein	unter der Anlage	innen	$9,2 \cdot 10^{-5}$
T-BGL5.8	Gladbacher Straße, Bergisch-Gladbach	EG	nein	unter der Anlage	innen	$8,5 \cdot 10^{-4}$
T-BGL6.1	Herkenrather Straße, Bergisch-Gladbach	EG	nein	ca. 60	innen	$8 \cdot 10^{-6}$
T-BGL6.2	Schulstraße, Bergisch-Gladbach	2. OG	nein	ca. 80	innen	$2,1 \cdot 10^{-5}$
T-LEV7.1	An St. Andreas, Leverkusen	Boden	ja	ca. 25	außen	$1,9 \cdot 10^{-4}$
T-LEV7.2	An St. Andreas, Leverkusen	4. OG	nein	unter der Anlage	innen	$3,2 \cdot 10^{-4}$
T-LEV7.3	An St. Andreas, Leverkusen	EG	nein	unter der Anlage	innen	$2 \cdot 10^{-6}$
T-LEV7.4	Thomas von Aquin-Straße, Leverkusen	2. OG	ja	ca. 60	innen	$2,6 \cdot 10^{-5}$
T-LEV7.5	Thomas von Aquin-Straße, Leverkusen	4. OG	ja	ca. 60	innen	$6,7 \cdot 10^{-5}$
T-LEV7.6	Gregor-Mendel-Straße, Leverkusen	4. OG	ja	ca. 30	innen	$6,2 \cdot 10^{-5}$
T-LEV7.7	Dechant Fein Straße, Leverkusen	3. OG	ja	ca. 35	innen	$2,8 \cdot 10^{-5}$
T-BI 1.1	Am Pfarracker, Bielefeld	8. OG	nein	unter der Anlage	innen	$7,1 \cdot 10^{-4}$
T-BI 1.2	Meier-Zu-Eissen-Weg, Bielefeld	Boden	ja	ca. 120	außen	$1,2 \cdot 10^{-3}$
T-BI 1.3	Meier-Zu-Eissen-Weg, Bielefeld	Boden	ja	ca. 200	außen	$1,6 \cdot 10^{-3}$
T-BI 1.4	Meier-Zu-Eissen-Weg, Bielefeld		ja	ca. 220	innen	$8,9 \cdot 10^{-4}$
T-BI 2.1	Teutoburger Straße, Bielefeld	13. OG	ja	ca. 10-15	außen	$8,6 \cdot 10^{-4}$
T-BI 2.2	Teutoburger Straße, Bielefeld	12. OG	nein	unter der Anlage	innen	$1,8 \cdot 10^{-4}$
T-BI 2.3	Teutoburger Straße, Bielefeld	12. OG	nein	unter der Anlage	innen	$1,8 \cdot 10^{-4}$
T-BI 2.4	Teutoburger Straße, Bielefeld	12. OG	nein	unter der Anlage	innen	$5,7 \cdot 10^{-5}$
T-BI 2.5	Bielsteinstraße/Rohrteichstraße, Bielefeld	Boden	ja	ca. 250	außen	$1,0 \cdot 10^{-4}$
T-PB 3.1	Leuschnerstraße, Paderborn	7. OG	nein	unter der Anlage	innen	$5,7 \cdot 10^{-4}$
T-PB 3.2	Leuschnerstraße, Paderborn	5. OG	nein	unter der Anlage	innen	$5 \cdot 10^{-6}$
T-PB 3.3	Leuschnerstraße, Paderborn	3. OG	nein	unter der Anlage	innen	$2 \cdot 10^{-6}$

T-PB 3.4	Leuschnerstraße, Paderborn	1. OG	nein	unter der Anlage	innen	$1 \cdot 10^{-6}$
T-GT 4.1	Eickhoffstraße, Gütersloh	Boden	ja	ca. 70	außen	$1,4 \cdot 10^{-3}$
T-GT 4.2	Eickhoffstraße, Gütersloh	Boden	ja	ca. 140	außen	$8,8 \cdot 10^{-4}$
T-GT 4.3	Eickhoffstraße, Gütersloh	Boden	ja	ca. 210	außen	$1,4 \cdot 10^{-3}$
T-GT 4.4	Eickhoffstraße, Gütersloh	Boden	ja	ca. 280	außen	$8,1 \cdot 10^{-4}$
T-DET5.1	Felix-Fechenbach-Kolleg, Detmold	Boden	nein	ca. 200	außen	$2,2 \cdot 10^{-4}$
T-DET5.2	Saganer Straße, Detmold	2. OG	ja	ca. 50	innen	$4,2 \cdot 10^{-5}$
T-DET5.3	Saganer Straße, Detmold	11. OG	nein	unter der Anlage	innen	$1,0 \cdot 10^{-3}$
T-DET5.4	Saganer Straße, Detmold	6. OG	nein	unter der Anlage	innen	$3,1 \cdot 10^{-5}$
T-DET5.5	Saganer Straße, Detmold	1. OG	nein	unter der Anlage	innen	$1,0 \cdot 10^{-5}$
T-HF 6.1	Amselweg/Höhenstraße, Herford	Boden	ja	ca. 200 m	außen	$5,6 \cdot 10^{-4}$
T-HF 6.2	Amselweg, Herford	Boden	ja	ca. 200 m	außen	$5,6 \cdot 10^{-5}$
T-HF 6.3	Amselweg, Herford	Boden	ja	ca. 200 m	außen	$5,2 \cdot 10^{-5}$
T-HF 6.4	Höhenstraße, Herford	Boden	ja	ca. 200 m	außen	$1,6 \cdot 10^{-4}$
T-W 1.1	Sternenberg, Wuppertal	Boden		direkt an HSA	außen	$8,1 \cdot 10^{-4}$
T-W 1.2	Straße Dellbusch, Wuppertal	Boden	ja	ca. 80 m	außen	$5,7 \cdot 10^{-4}$
T-W 1.3	Straße Dellbusch, Wuppertal	Boden	ja	ca. 160 m	außen	$1,5 \cdot 10^{-3}$
T-W 1.4	Straße Dellbusch, Wuppertal	Boden	ja	ca. 240 m	außen	$5,9 \cdot 10^{-4}$
T-W 2.1	Konrad-Adenauer-Straße, Wuppertal	EG	teilw.		innen	$1,3 \cdot 10^{-4}$
T-W 2.2	Konrad-Adenauer-Straße, Wuppertal	1. OG	nein		innen	$7,4 \cdot 10^{-5}$
T-W 2.3	Konrad-Adenauer-Straße, Wuppertal	3. OG	ja	ca. 50	innen	$7,2 \cdot 10^{-3}$
T-W 2.4	Hans-Böckler-Straße, Wuppertal	2. OG	ja	ca. 50	innen	$2,3 \cdot 10^{-4}$
T-MG 3.1	Mühlenwallstraße, Mönchengladbach	6. OG	nein	unter der Anlage	innen	$3,6 \cdot 10^{-5}$
T-MG 3.2	Helenastraße, Mönchengladbach	Boden	ja	ca. 100	außen	$4,3 \cdot 10^{-5}$
T-MG 3.3	Helenastraße, Mönchengladbach	EG	nein	ca. 100	innen	$1,8 \cdot 10^{-5}$

T-MG 3.4	Helenastraße, Mönchengladbach	1. OG	nein	ca. 100	innen	$2,9 \cdot 10^{-5}$
T-KR 4.1	von-Bremt-Straße, Krefeld	Boden		direkt an HSA	außen	$2,4 \cdot 10^{-4}$
T-KR 4.2	Wehrstraße, Krefeld	Boden	ja	ca. 100	außen	$1,1 \cdot 10^{-3}$
T-KR 4.3	Wehrstraße, Krefeld	1. OG	ja	ca. 100	innen	$3,1 \cdot 10^{-4}$
T-KR 4.4	von-Bremt-Straße, Krefeld	2. OG	ja	ca. 50	innen	$3,6 \cdot 10^{-4}$
T-NE 5.1	Am Hasenberg, Neuss	6. OG	ja	unter der Anlage	außen	$5,7 \cdot 10^{-4}$
T-NE 5.2	Am Hasenberg, Neuss	6. OG	ja	unter der Anlage	innen	$8,2 \cdot 10^{-4}$
T-NE 5.3	Am Hasenberg, Neuss	3. OG	ja	unter der Anlage	innen	$8,3 \cdot 10^{-5}$
T-NE 5.4	Am Hasenberg, Neuss	1. OG	ja	unter der Anlage	innen	$8 \cdot 10^{-6}$
T-ERK6.1	Rankestraße, Erkrath	Boden	ja	ca. 200	außen	$2,4 \cdot 10^{-4}$
T-ERK6.2	Rankestraße, Erkrath	Boden	teilw.	ca. 200	außen	$1,7 \cdot 10^{-4}$
T-ERK6.3	Rankestraße, Erkrath	5. OG	ja		innen	$2,8 \cdot 10^{-4}$
T-ERK6.4	Rankestraße, Erkrath	5. OG			innen	$1,1 \cdot 10^{-3}$
T-ME 7.1	Bahnstraße, Mettmann	3. OG	ja	ca. 40	innen	$7,6 \cdot 10^{-4}$
T-ME 7.2	Bahnstraße, Mettmann	EG	nein	ca. 40	innen	$5,1 \cdot 10^{-5}$
T-ME 7.3	Bahnstraße, Mettmann	Boden	nein	ca. 40	außen	$1,6 \cdot 10^{-4}$
T-ME 7.4	Bahnstraße, Mettmann	Boden	ja	ca. 100	außen	$2,2 \cdot 10^{-4}$