



---

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

**Abschlussbericht  
„Entwicklung geeigneter Mess- und  
Berechnungsverfahren“**

**erstellt für das  
Bundesamt für Strahlenschutz**

17. März 2005

**IMST GmbH**  
Carl-Friedrich-Gauß-Str. 2  
47475 Kamp-Lintfort

## **Projektleitung beim Auftragnehmer**

Dr. Christian Bornkessel  
IMST GmbH  
Prüfzentrum EMV  
Carl-Friedrich-Gauß-Straße 2  
47475 Kamp-Lintfort  
Tel: 02842/981-383  
Fax: 02842/981-399  
E-Mail: bornkessel@imst.de

## **Autoren**

Dr. Christian Bornkessel, IMST GmbH  
Markus Schubert, IMST GmbH

## **Projektleitung beim Auftraggeber**

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

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

## 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

<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>3</b>
<b>Summary</b> .....	<b>7</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>15</b>
1.1 Zielsetzung des Forschungsvorhabens.....	15
1.2 Hintergrund des Forschungsvorhabens .....	15
1.3 Einordnung des vorliegenden Abschlussberichtes .....	16
<b>2 Messverfahren</b> .....	<b>18</b>
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
<b>2.5.7</b>	<b>Auswertung .....</b>	<b>66</b>
2.5.7.1	Umrechnung der Messwerte auf Leistungsflussdichten bzw. Feldstärken.....	66
2.5.7.2	Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung (Spektrumanalysator) .....	67
<b>2.5.8</b>	<b>Dokumentation .....</b>	<b>75</b>
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
<b>2.6</b>	<b>Katasteransätze.....</b>	<b>83</b>
<b>3</b>	<b>Berechnungsverfahren .....</b>	<b>87</b>
<b>3.1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>87</b>
<b>3.2</b>	<b>Wellenausbreitungsmodelle.....</b>	<b>87</b>
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
<b>3.3</b>	<b>Verwendete Software.....</b>	<b>90</b>
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
<b>3.4</b>	<b>Detailbetrachtung der Mobilfunkantennen .....</b>	<b>93</b>

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	<b>Simulationsparameter</b> .....	109
3.5.1	<i>Geodaten</i> .....	109
3.5.2	<i>Standortparameter der Mobilfunksendeanlage</i> .....	110
3.6	<b>Anwendung der Softwarepakete auf reale Konfigurationen</b> .....	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	<b>Beurteilung der Programme und Zusammenfassung</b> .....	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	<b>Flächendeckendes Kataster</b> .....	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
	<b>Danksagung</b> .....	<b>180</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>181</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>186</b>
	<b>Verzeichnis häufig verwendeter Symbole</b> .....	<b>187</b>
	<b>Anhang: Vorgaben für eine Messnorm</b> .....	<b>A1-A6</b>
1.	<b>Zweck</b> .....	<b>A1</b>
2.	<b>Geltungsbereich</b> .....	<b>A1</b>
3.	<b>Begriffe</b> .....	<b>A1</b>
4.	<b>Vorgehensweise</b> .....	<b>A2</b>
4.1	Auswahl der Messpunkte.....	A2
4.2	Messgeräte und Hilfsmittel.....	A2
4.3	Messparameter.....	A3
4.2	Messdurchführung.....	A3
5.	<b>Auswertung</b> .....	<b>A4</b>
6.	<b>Dokumentation</b> .....	<b>A5</b>

# 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).

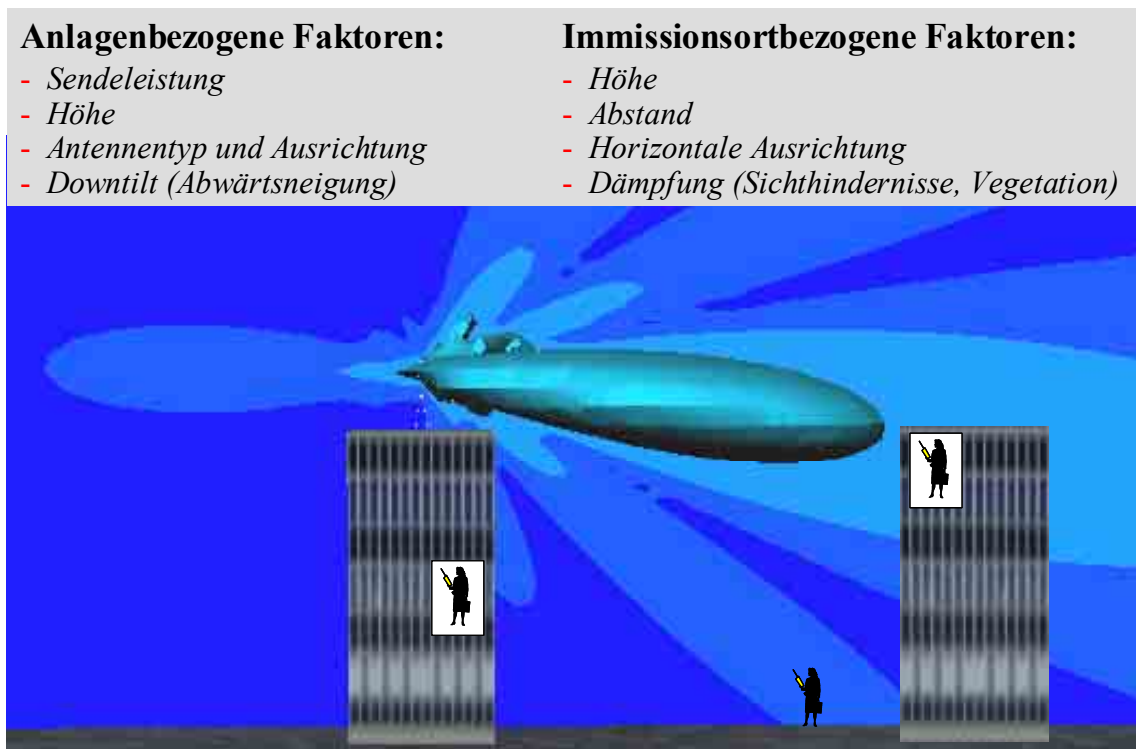


Bild 2.2.1 Einflussfaktoren für die Immission durch Mobilfunk Basisstationen

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.

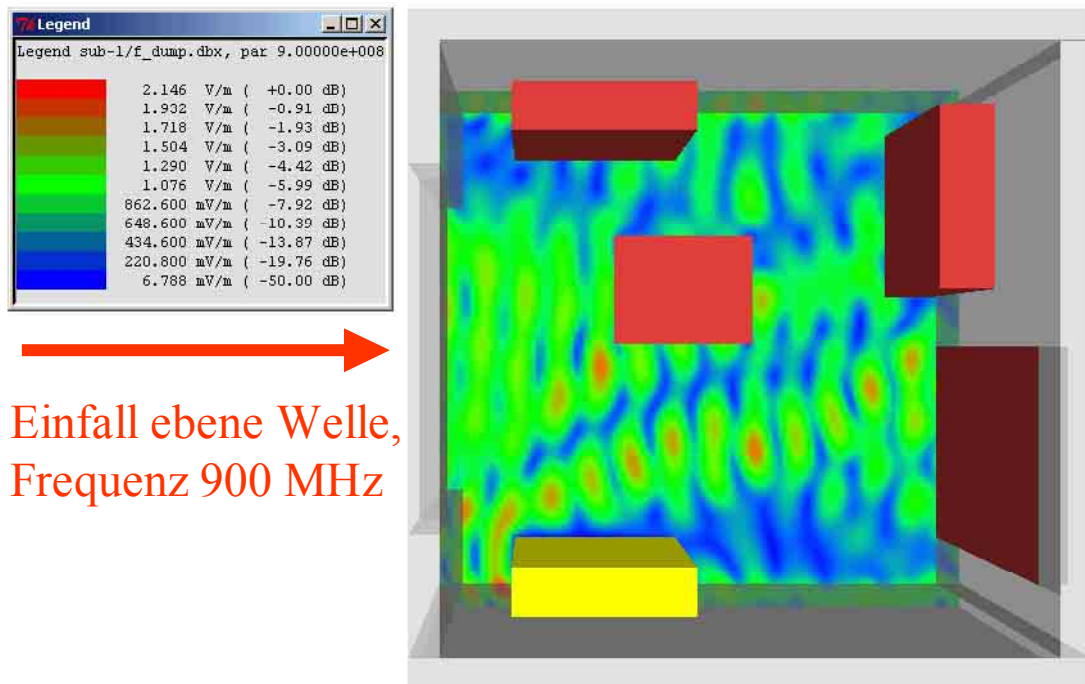


Bild 2.2.2 Verteilung der elektrischen Feldstärke in einem Innenraum, Draufsicht. Durch das linke Fenster fällt eine ebene Welle mit der Frequenz 900 MHz ein. Rot dargestellt sind Holzschränke und eine Holztischplatte, gelb ein Metallschrank.

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.

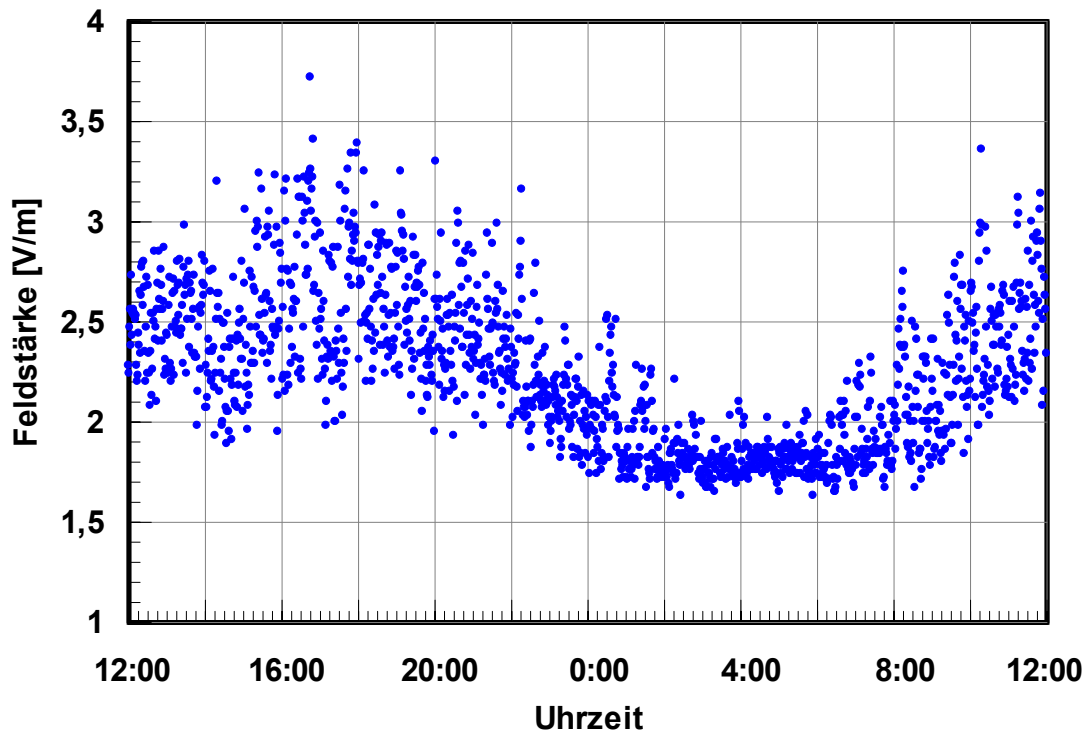


Bild 2.2.3 Ergebnis einer 24 Stunden Messung an einem festen Messpunkt in der Umgebung einer mehrkanaligen GSM Anlage

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.

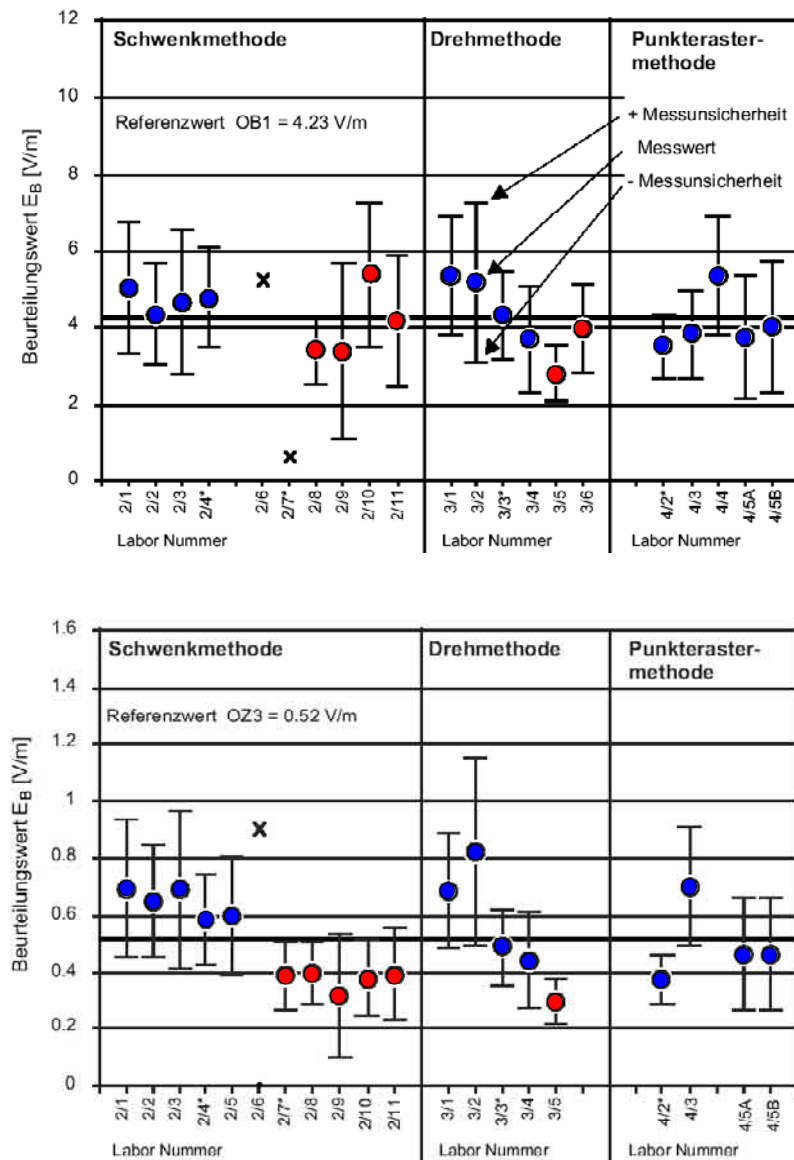


Bild 2.5.2 Ergebnisse von Vergleichsmessungen an Mobilfunk Basisstationen, aus [RYS 02].  
 a) oben: Raum mit direkter Sicht zu den die Immission am Messort dominierenden Antennen  
 b) unten: Raum ohne Sicht zu den Mobilfunk Basisstationsantennen  
 blau gekennzeichnet: Messungen mit bikonischen oder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



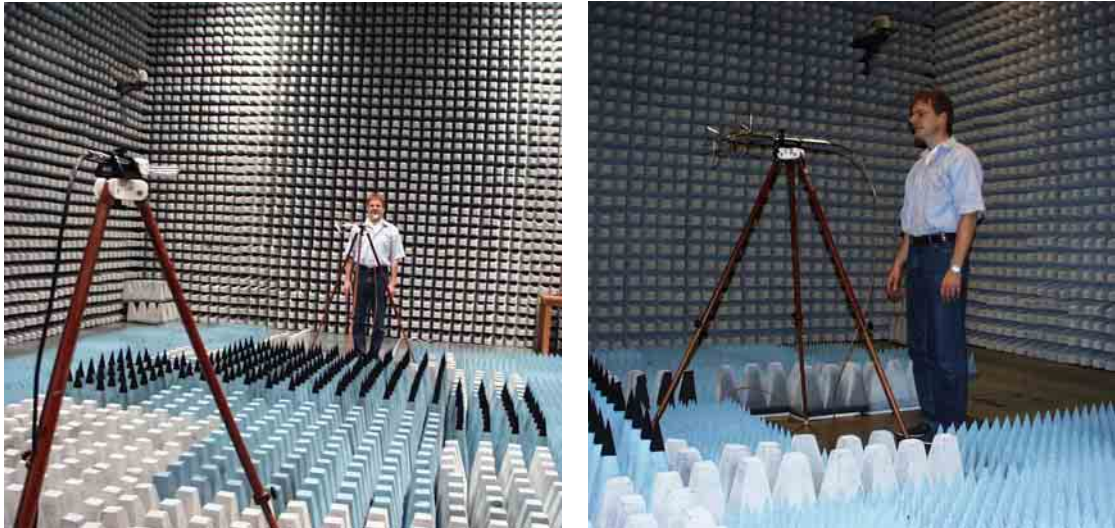


Bild 2.5.3 Versuchsaufbau zur Ermittlung des Einflusses des Messenden auf die Messergebnisse bei unterschiedlichen Antennentypen. Links: Gesamte Messstrecke mit Sendeantenne im Vordergrund und Empfangsantenne im Hintergrund. Rechts: Empfangsantenne.

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.

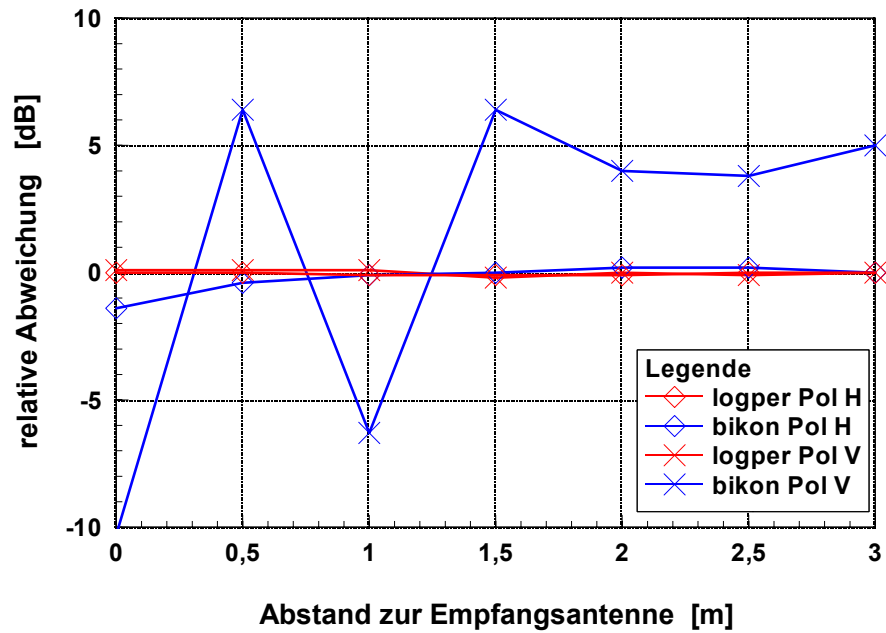


Bild 2.5.4 Relative Abweichung der Messwerte bei Anwesenheit des Messenden in Relation zum ungestörten Fall in Abhängigkeit des Abstands des Messenden zur Empfangsantenne. 945 MHz, ohne Bodenabsorber.

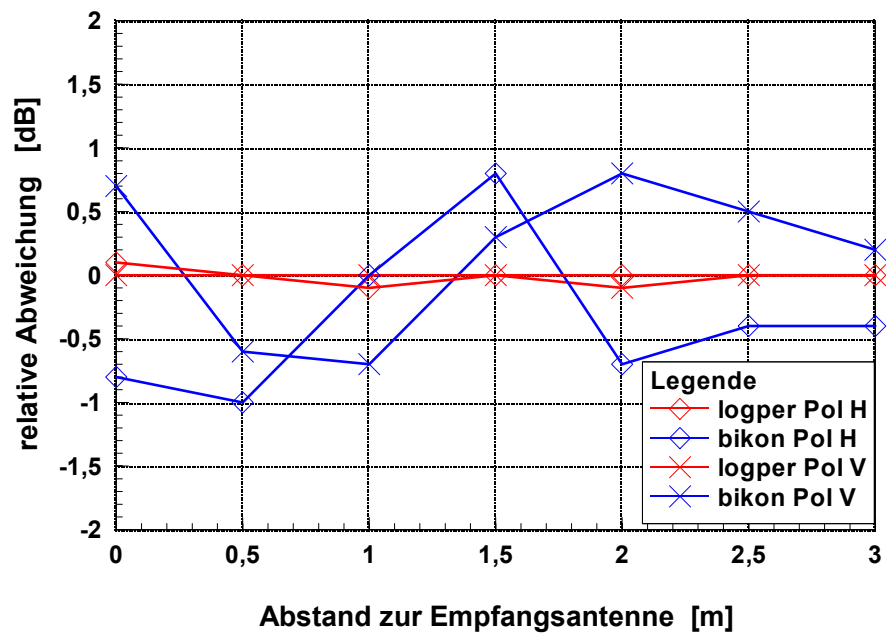


Bild 2.5.5 Relative Abweichung der Messwerte bei Anwesenheit des Messenden in Relation zum ungestörten Fall in Abhängigkeit des Abstands des Messenden zur Empfangsantenne. 945 MHz, mit Bodenabsorbern.

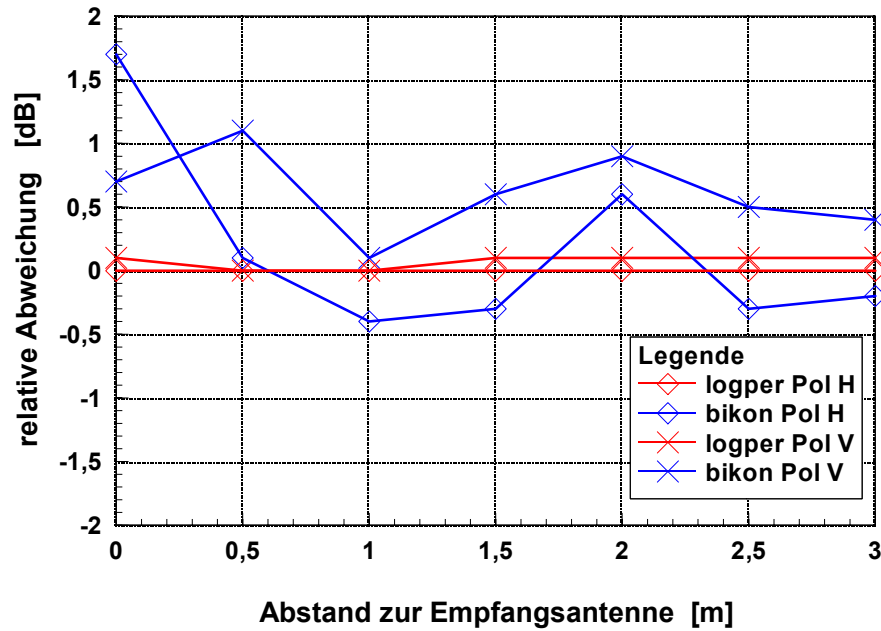


Bild 2.5.6 Relative Abweichung der Messwerte bei Anwesenheit des Messenden in Relation zum ungestörten Fall in Abhängigkeit des Abstands des Messenden zur Empfangsantenne. 1840 MHz, ohne Bodenabsorber.

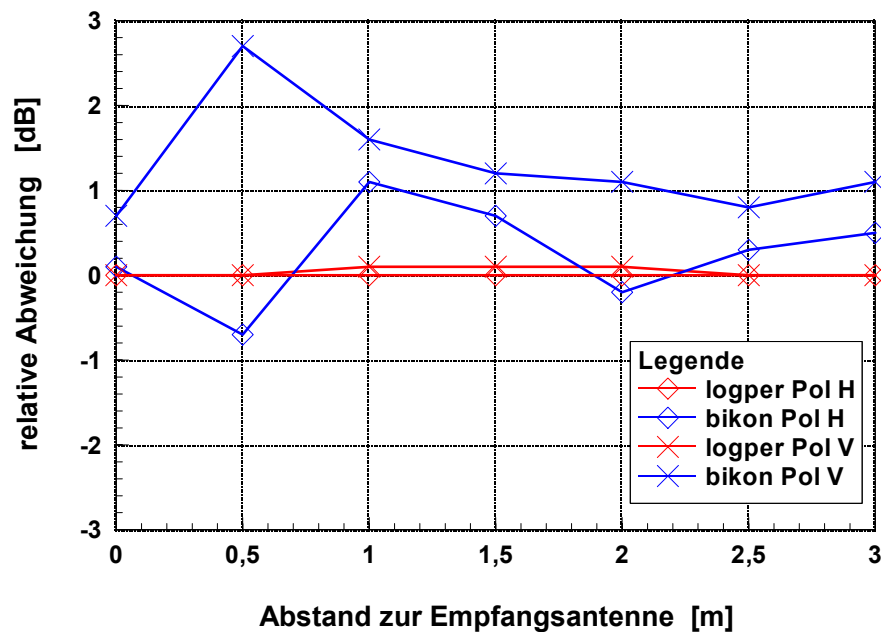


Bild 2.5.7 Relative Abweichung der Messwerte bei Anwesenheit des Messenden in Relation zum ungestörten Fall in Abhängigkeit des Abstands des Messenden zur Empfangsantenne. 1840 MHz, mit Bodenabsorbern.

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 Hertschen Dipol die radialen Komponenten gegenüber den senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der abgestrahlten Welle stehenden Feldkomponenten vernachlässigt werden.  $\lambda_0$  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

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

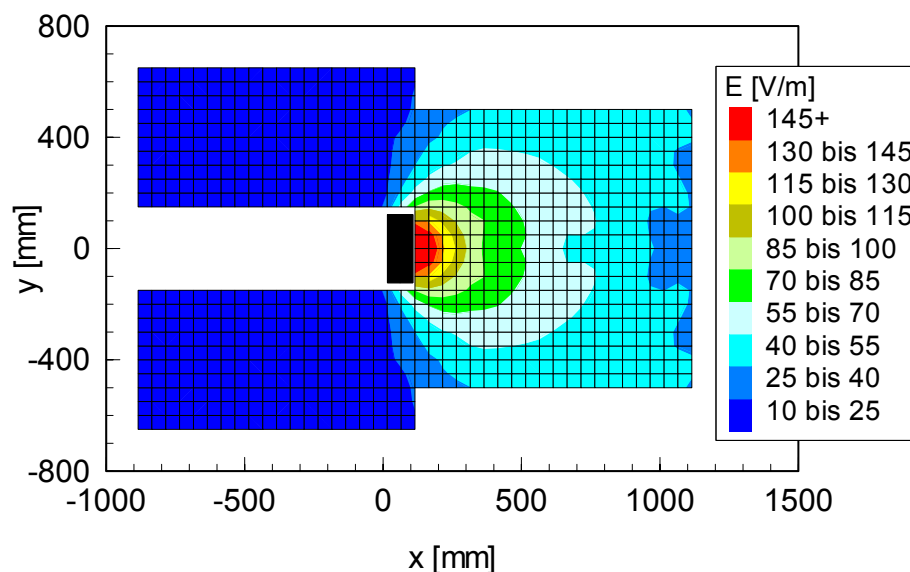
hinzu, wobei D die maximale geometrische Ausdehnung der Antenne beschreibt. Diese Fernfeldbedingung zielt allerdings darauf ab, dass der Phasenfehler über der gesamten Antenne kleiner als  $\pi/8$  bleibt, d.h. dass am Messpunkt von einer genügend ebenen Welle ausgegangen werden kann. Ab diesem Abstand 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.

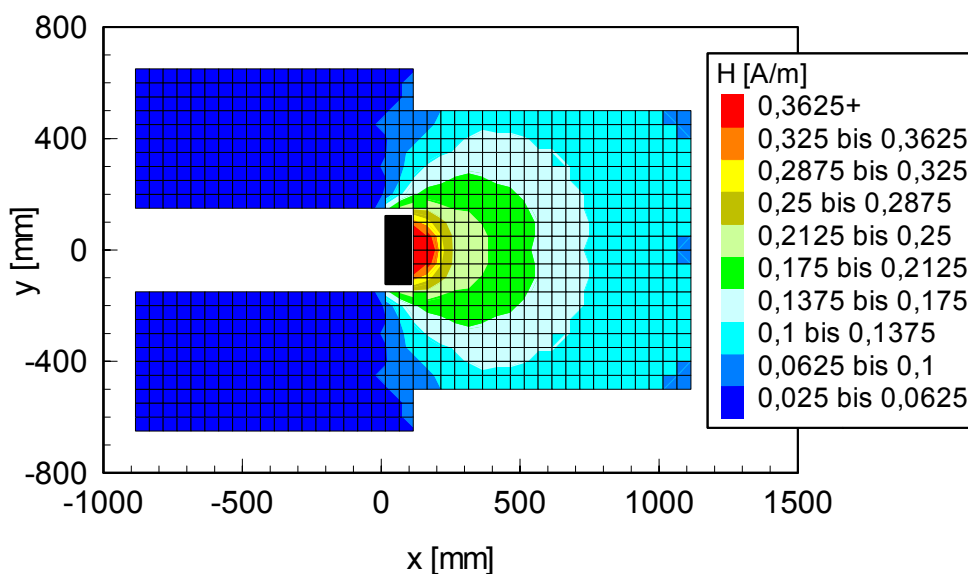
Nur bei wenigen Situationen ist die Notwendigkeit gegeben, in kürzeren Abständen von der Antenne zu messen. Nach Gleichung (2.5.6) wären dann die Komponenten des elektrischen und magnetischen Feldes getrennt zu erfassen. Allerdings ist kritisch zu hinterfragen, ob das Fernfeld für diesen Messzweck tatsächlich 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  $377 \Omega$  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  $377 \Omega$  bei größeren Entfernungen resultieren aus Dynamikproblemen der Nahfeldsonden bei geringeren Feldstärken bzw. aus geringfügigen Positioniergenauigkeiten (beachte:  $x = 0$  mm bezeichnet die Rückseite der Antenne).

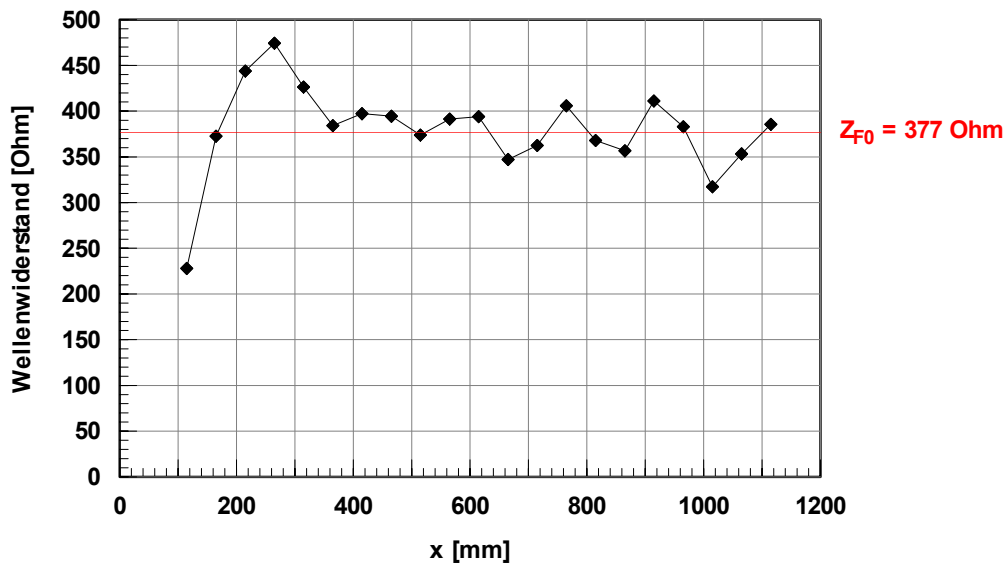


Bild 2.5.10 Wellenwiderstand E/H aus den aufgenommenen Nahfeldern der Antenne K 736 078, abgeleitet bei  $y=0$

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.

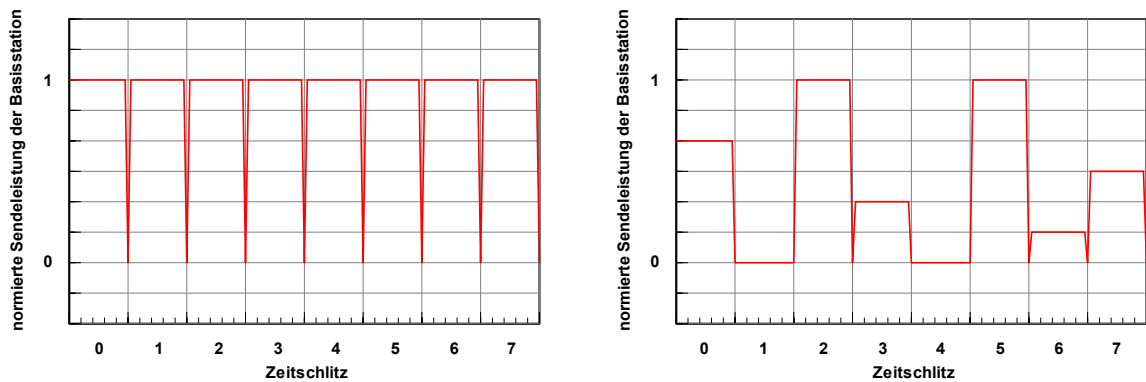


Bild 2.5.11 Signalstruktur bei GSM: BCCH Kanal (links), Kanal 2 und Folgekanäle (rechts)

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 <sup>1)</sup>	100-300 <sup>2)</sup>	Peak oder RMS	100 <sup>3)</sup>
GSM-R	921	960	100-300 <sup>1)</sup>	100-300 <sup>2)</sup>	Peak oder RMS	100 <sup>3)</sup>
GSM 1800	1805	1880	100-300 <sup>1)</sup>	100-300 <sup>2)</sup>	Peak oder RMS	100 <sup>3)</sup>
UMTS <sup>4)</sup>	2110	2170	5000 <sup>5)</sup>	5000 <sup>2)</sup>	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.

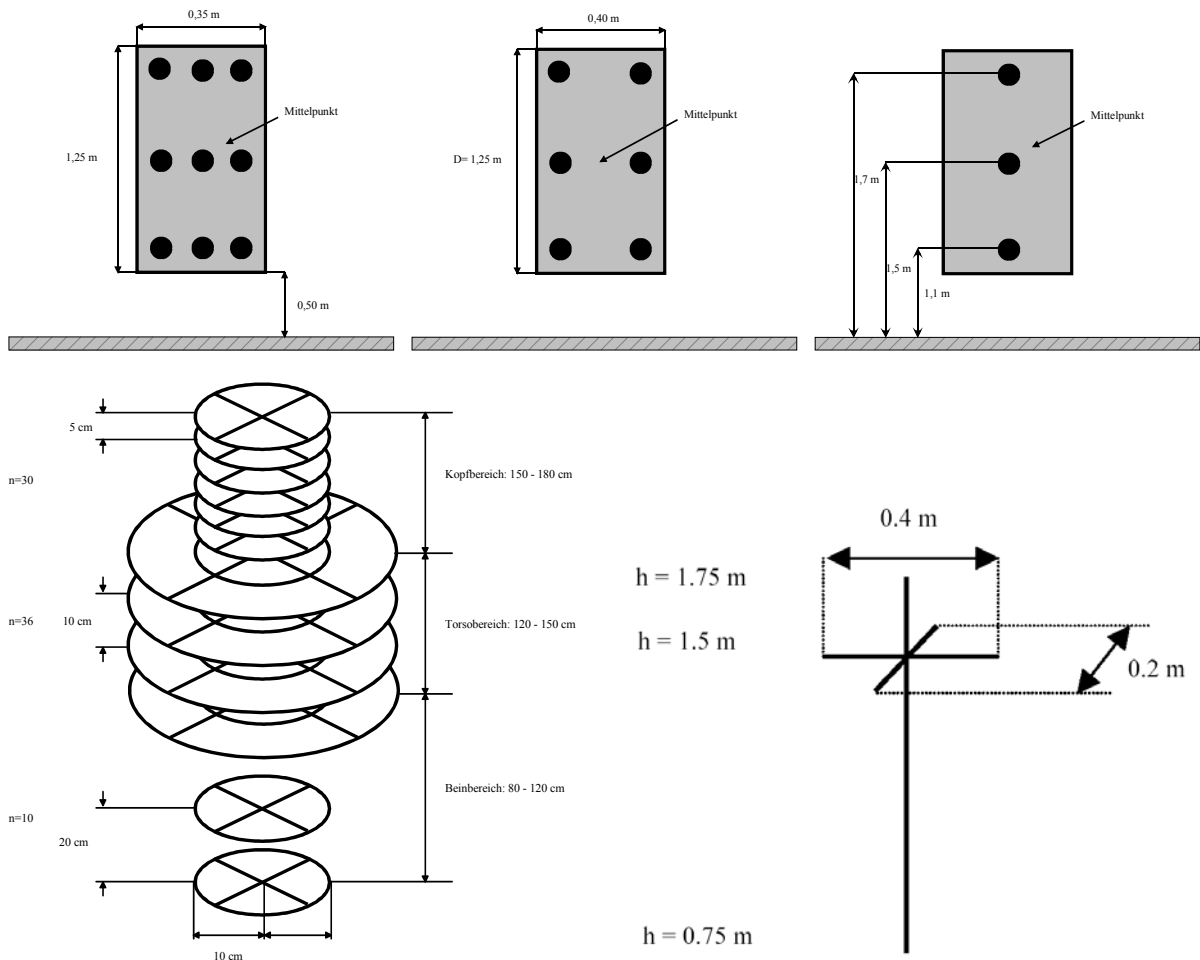


Bild 2.5.14 Verschiedene vorgeschlagene Messraster für eine Mittelung der Messwerte. Oben links: [ANFR/DR-15]; oben Mitte: [prEN 50400]; oben rechts: [CEPT 04]; unten links: [SICTA 01] (76 Messpunkte auf den Schnittpunkten der Linien mit den Kreisen sowie im Zentrum der Kreise), unten rechts: [LEH 03]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

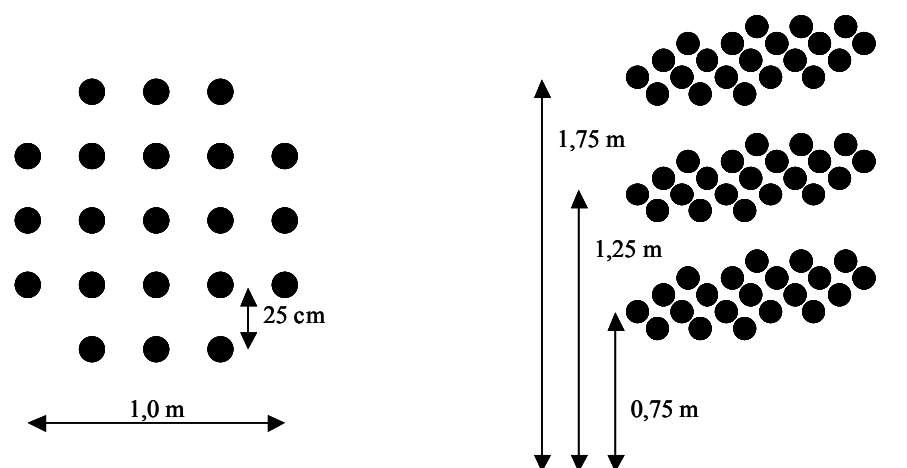


Bild 2.5.15 Wahl des Punktrasters: Draufsicht (links) und Anordnung der Ebenen im Raum (rechts)

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 $\mu$ V/m	-	87,1 dB $\mu$ V/m	-
Drehmethode	86,7 dB $\mu$ V/m	-	86,4 dB $\mu$ V/m	-
Punktrastermethode	87,9 dB $\mu$ V/m	84,7 dB $\mu$ V/m	87,6 dB $\mu$ V/m	84,8 dB $\mu$ 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.

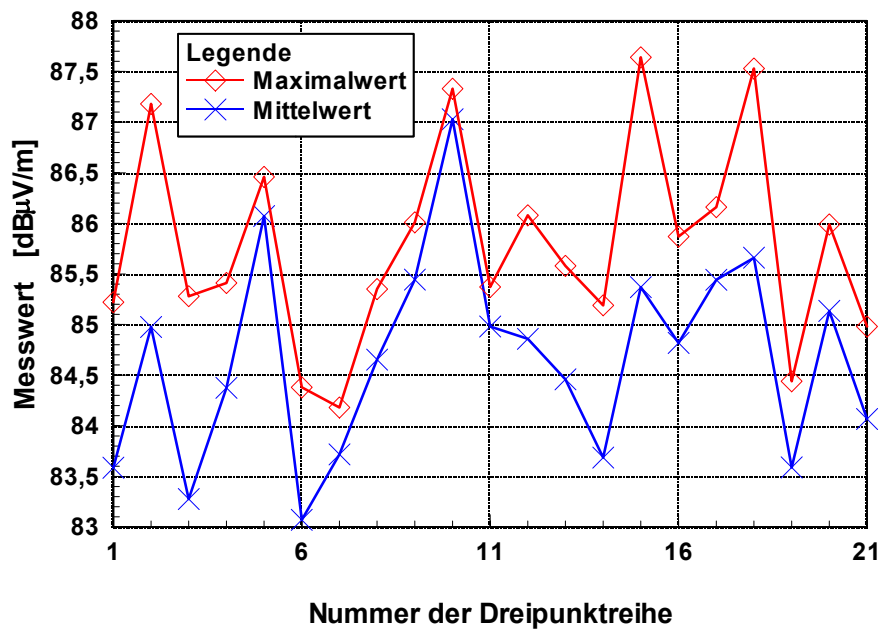
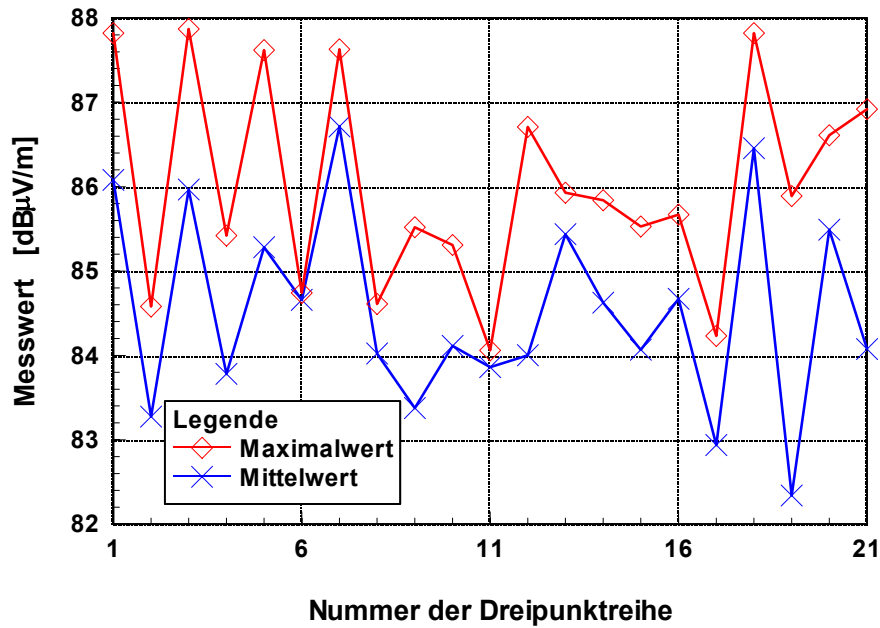


Bild 2.5.16 Mittel- und Maximalwerte für die Messungen mit Punkrastermethode nach Geometrie Bild 2.5.15. Es wurden 21 Punktreihen mit drei übereinander stehenden Punkten gebildet. Szenario mit direkter Sicht (oben) und ohne Sicht (unten) zur Basisstationsantenne

### 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.

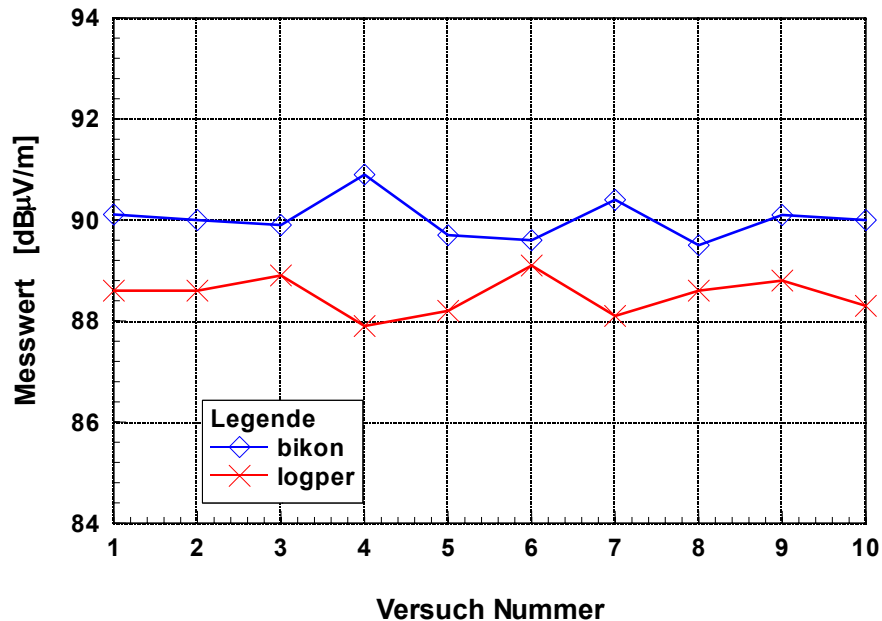


Bild 2.5.17 Reproduzierbarkeit der Schwenkmethode; 10 Messungen mit unterschiedlichem Messpersonal

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 Forschungsanstrebungen 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 Einfallrichtungen 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 Herstelleraussage 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 einstrahlfest 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 $\mu$ V] betrieben, so kann nach dem Aktivieren der Korrekturfaktoren das Messergebnis direkt als elektrische Feldstärke in [dB $\mu$ 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 <sup>2</sup> ,
E	für Grenzwertaussage benötigte elektrische Feldstärke in V/m,
Z <sub>F0</sub>	Freiraumwellenwiderstand,
A <sub>w</sub>	Antennenwirkfläche der an den Spektrumanalysator angeschlossenen Empfangsantenne in m <sup>2</sup> ,
$\lambda_0$	Wellenlänge des mit der Antenne gemessenen Feldes in m,
G <sub>i</sub>	isotroper Gewinn der Empfangsantenne, ohne Einheit,
f	Frequenz des mit der Antenne gemessenen Feldes in Hz,
c <sub>0</sub>	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum, c <sub>0</sub> $\approx$ 3·10 <sup>8</sup> 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<sub>i</sub> der Empfangsantenne wird der frequenzabhängige isotrope Antennengewinn abzüglich der frequenzabhängigen Dämpfung des jeweils verwendeten Kabels eingesetzt. G<sub>i</sub> 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 Zeitschlitzbelegungen 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 Zeitschlitzbelegungen 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.

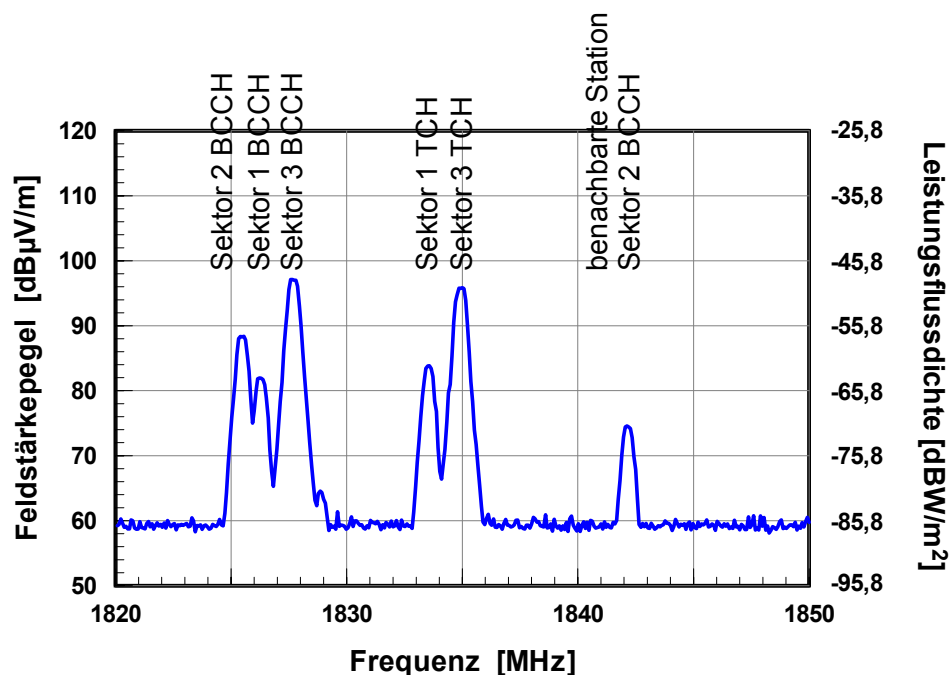


Bild 2.5.18 Kanalzuordnung einer Basisstationsmessung bei GSM 1800

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.

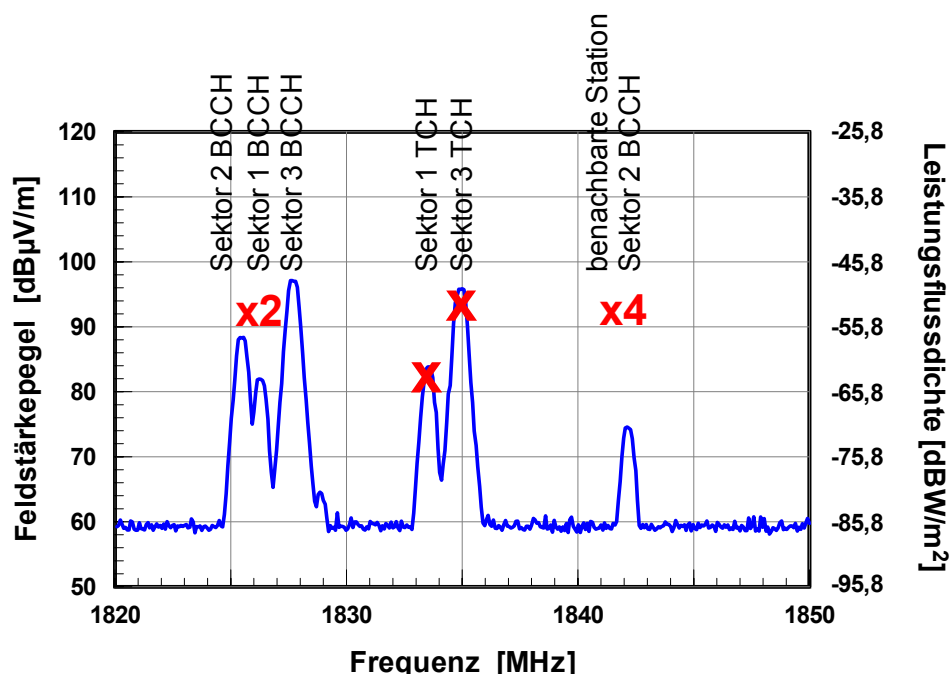


Bild 2.5.19 Ermittlung der maximalen Gesamtimmission für das Spektrum aus Bild 2.5.18

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 $\mu$ V/m	88,4 dB $\mu$ V/m	97,1 dB $\mu$ V/m	74,6 dB $\mu$ V/m	-63,8 dBW/m <sup>2</sup>	-57,4 dBW/m <sup>2</sup>	-48,7 dBW/m <sup>2</sup>	-71,2 dBW/m <sup>2</sup>
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 <sup>2</sup>	$1,8 \cdot 10^{-6}$ W/m <sup>2</sup>	$1,4 \cdot 10^{-5}$ W/m <sup>2</sup>	$7,6 \cdot 10^{-8}$ W/m <sup>2</sup>
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 <sup>2</sup>	$3,7 \cdot 10^{-6}$ W/m <sup>2</sup>	$2,7 \cdot 10^{-5}$ W/m <sup>2</sup>	$3,1 \cdot 10^{-7}$ W/m <sup>2</sup>
Gesamtimmission	0,1099 V/m				$3,2 \cdot 10^{-5}$ W/m <sup>2</sup>			

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 Sendeantenne 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
<b>Erweiterte Messunsicherheit (k=2)</b>					<b>3,47</b>

Tabelle 2.5.5 Beispiel für Messunsicherheitsbudget bei frequenzselektiven Messungen

Messunsicherheiten in dieser Größenordnung mögen auf dem ersten Blick sehr groß erscheinen. So bedeuten  $\pm 3$  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.  $\pm 4$  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](http://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 km<sup>2</sup> 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.

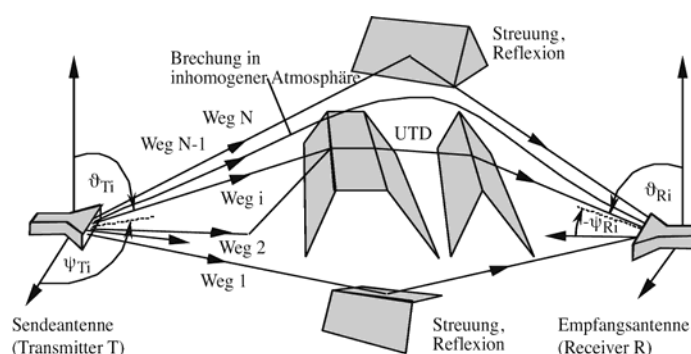


Bild 3.2.1: Mehrwegeausbreitung und Deutung einzelner Übertragungswege als Strahlenbahnen

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 Empfangsanenne 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	<a href="http://www.fgeu.de">www.fgeu.de</a>
EMF-Visual	strahlenoptisch		Antennessa	<a href="http://www.antennessa.com">www.antennessa.com</a>
Wireless Insite	strahlenoptisch		Remcom	<a href="http://www.remcom.com">www.remcom.com</a>
Empire	feldtheoretisch	FDTD	IMST	<a href="http://www.imst.de">www.imst.de</a>
Feko	Hybrid	Momentenmethode, UTD, Geometrische Optik	EM Software & Systems	<a href="http://www.Feko.co.za">www.Feko.co.za</a>
Quickplan	strahlenoptisch		TeS	<a href="http://www.t-e-s.it">www.t-e-s.it</a>

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.

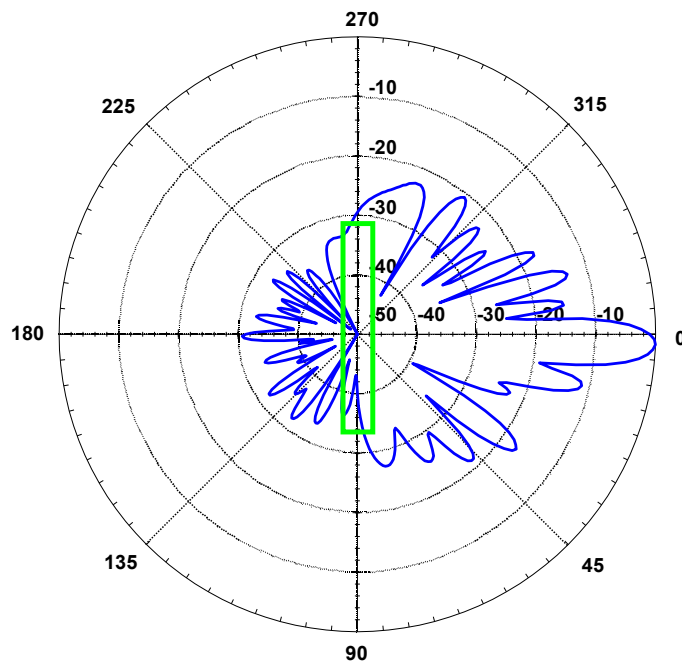


Bild 3.4.1: Vertikaler Schnitt der dreidimensionalen Abstrahlcharakteristik der Antenne K 735 147 (Elevationsdiagramm)

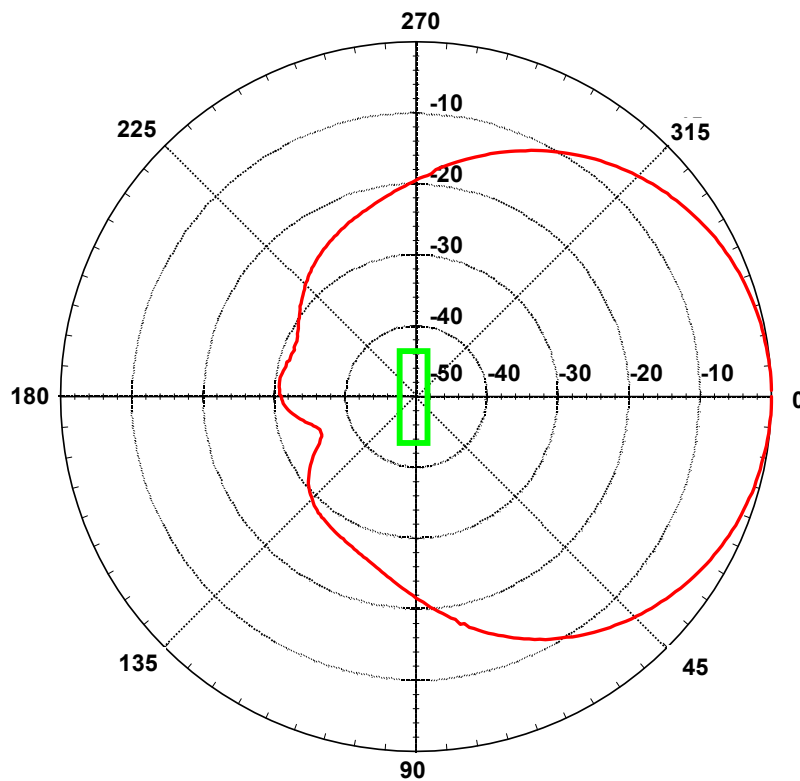


Bild 3.4.2: Horizontaler Schnitt der dreidimensionalen Abstrahlcharakteristik der Antenne K 735 147 (Azimutdiagramm)

Um die Abhängigkeit vom elektrischen Downtilt näher untersuchen zu können, werden die vertikalen Abstrahlcharakteristiken einer Mobilfunkantenne bei verschiedenen elektrischen Downtilts im Winkelbereich von  $-90^\circ$  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  $0^\circ$ -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  $0^\circ$  und  $10^\circ$  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.

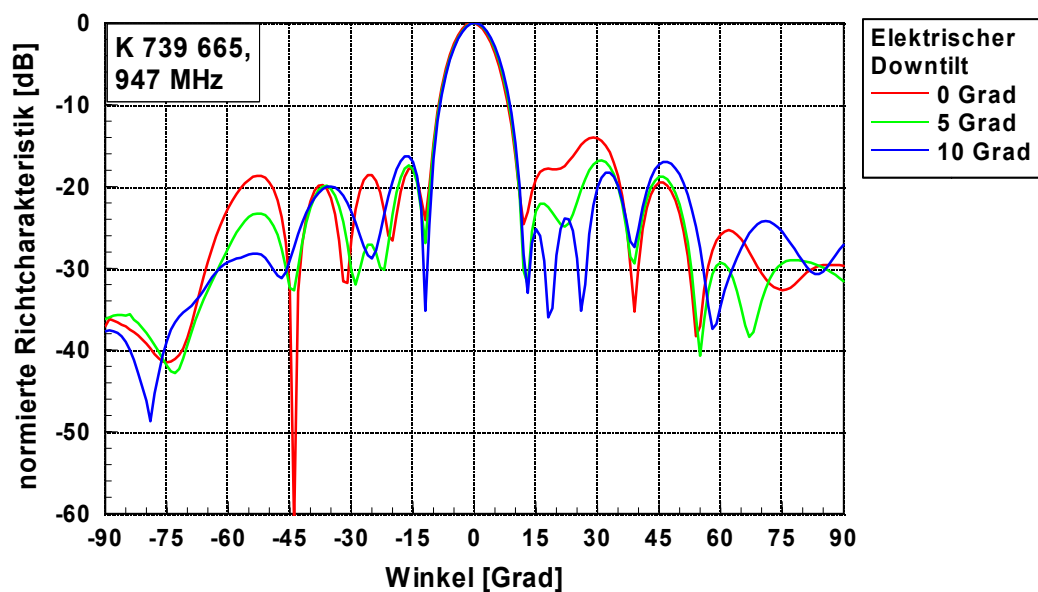


Bild 3.4.3: Vergleich der auf die Hauptstrahlrichtung normierten Abstrahlcharakteristik der Mobilfunkantenne K 739 665 bei einer Frequenz von 947 MHz und verschiedenen elektrischen Downtilts.

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).



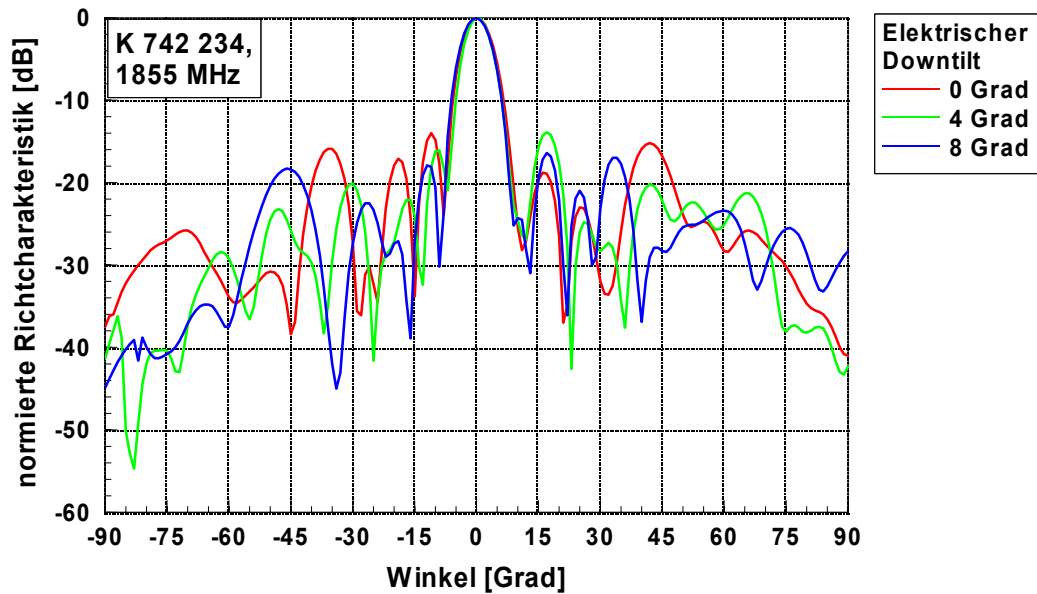


Bild 3.4.4: Vergleich der auf die Hauptstrahlrichtung normierten Abstrahlcharakteristik der Mobilfunkantenne K 742 234 bei einer Frequenz von 1855 MHz und verschiedenen elektrischen Downtilts.

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).

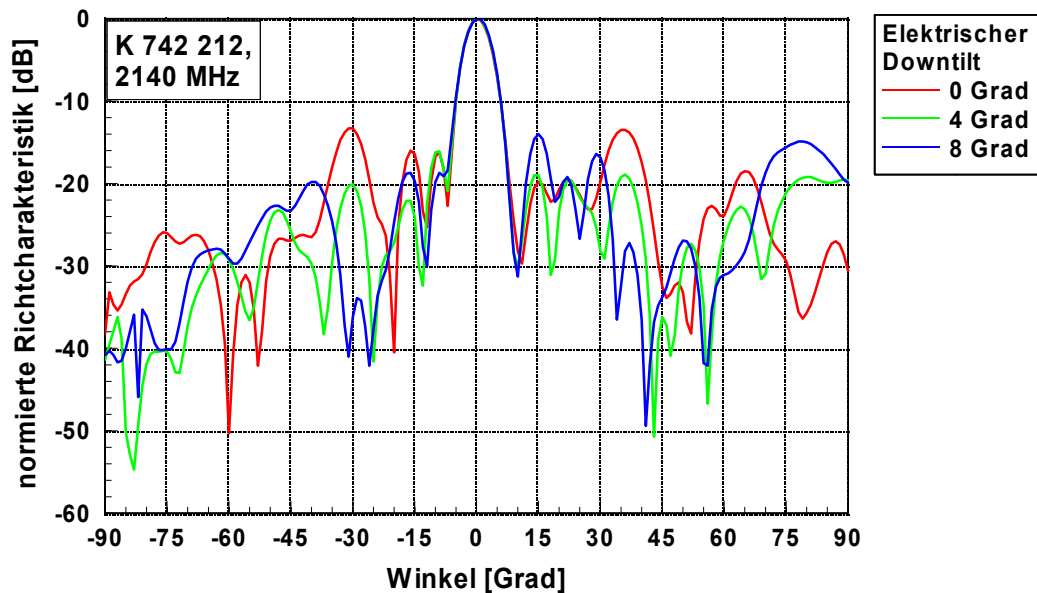


Bild 3.4.5: Vergleich der auf die Hauptstrahlrichtung normierten Abstrahlcharakteristik der Mobilfunkantenne K 742 212 bei einer Frequenz von 2140 MHz und verschiedenen elektrischen Downtilts.

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  $0^\circ$ -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  $2^\circ$  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.

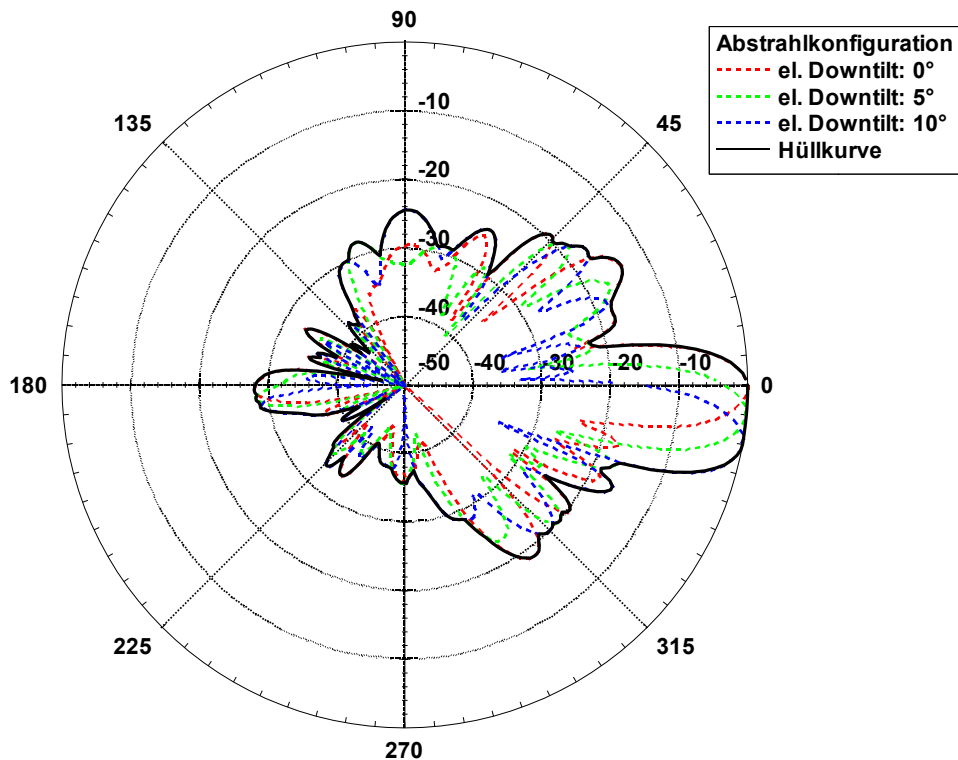


Bild 3.4.6: Synthese eines neuen Antennendiagramms, das alle Betriebszustände bezüglich des elektrischen Downtilts beinhaltet

### 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.

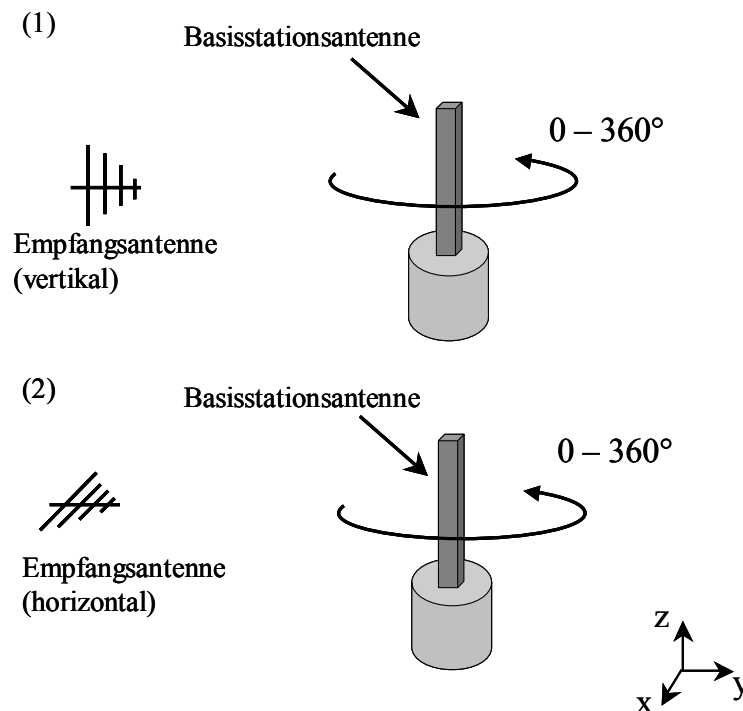


Bild 3.4.7: Schematische Darstellung des Messaufbaus zur Bestimmung der horizontalen Abstrahlcharakteristik einer Mobilfunkantenne  
 (1) Empfangsantenne vertikal  
 (2) Empfangsantenne horizontal

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  $90^\circ$  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  $-90^\circ$  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.

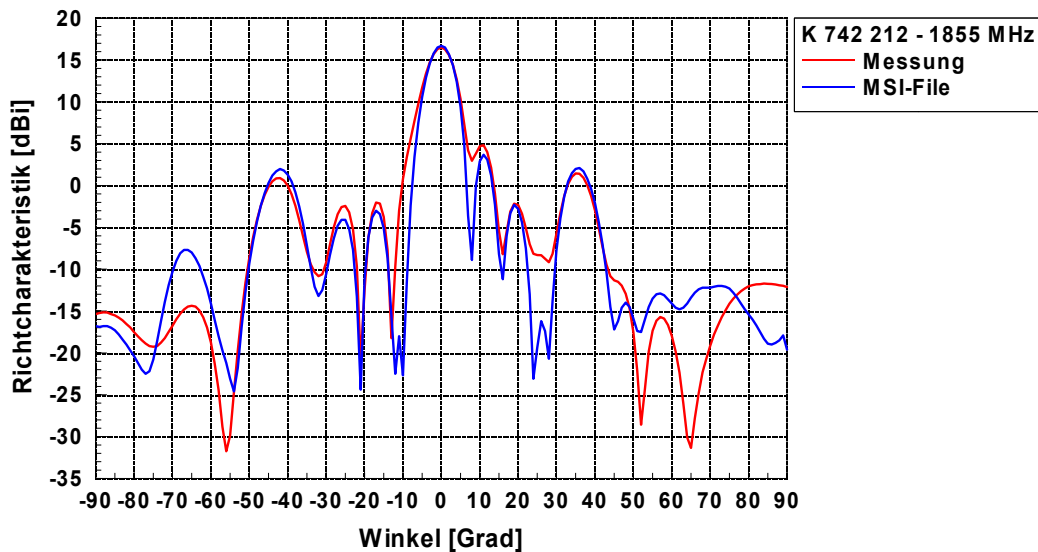


Bild 3.4.8: Vergleich des Abstrahlendiagramms aus der Messung mit den Daten aus dem MSI-File

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.

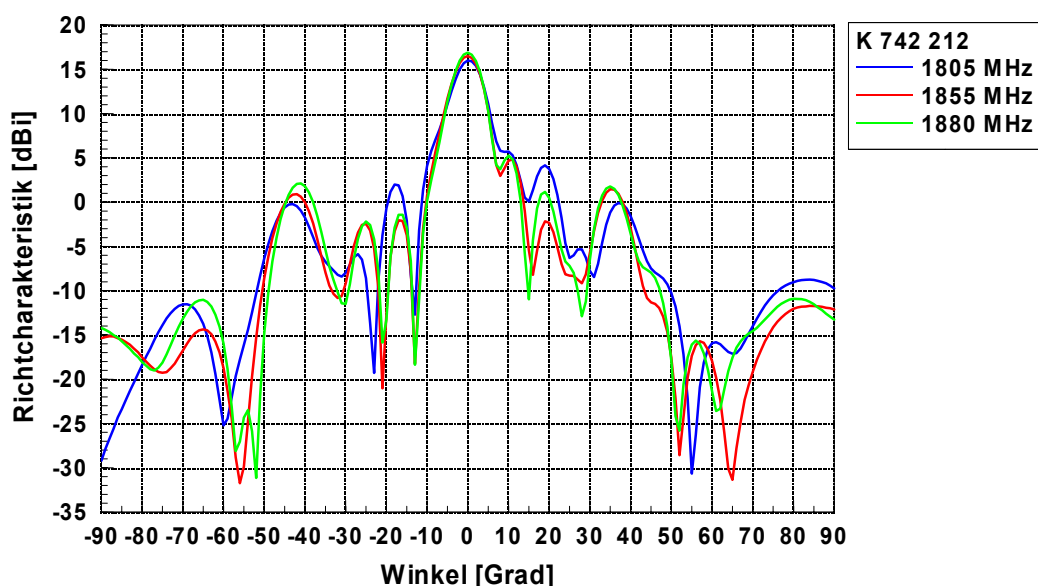


Bild 3.4.9: Frequenzabhängigkeit der Mobilfunkantenne K 742 212 im GSM 1800-Frequenzbereich für den Downlink

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.  $-55^\circ$ ) 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.

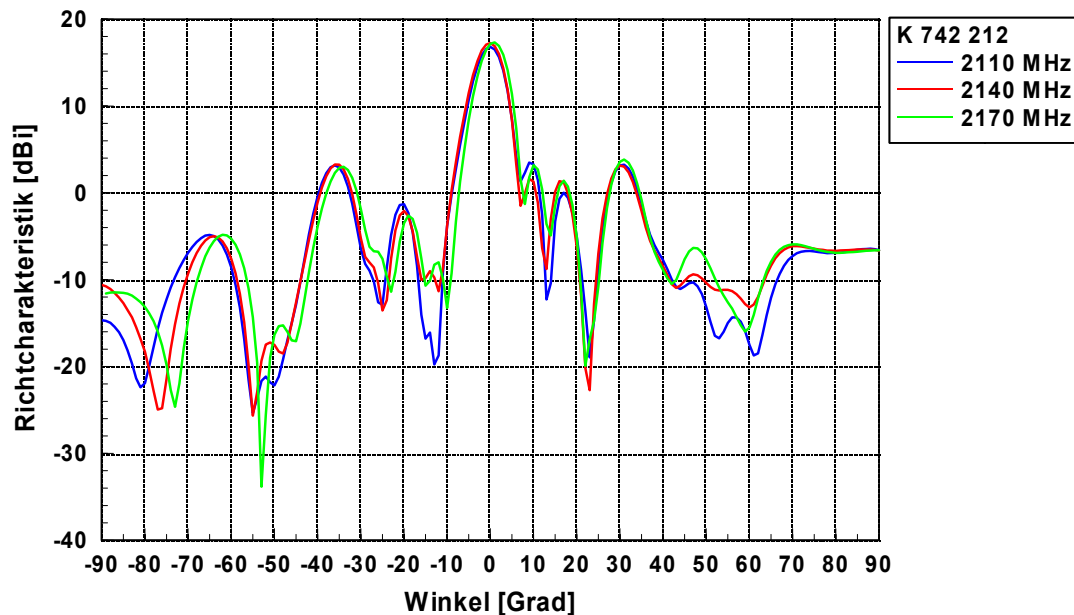


Bild 3.4.10: Frequenzabhängigkeit der Mobilfunkantenne K 742 212 im UMTS-Frequenzbereich für den Downlink

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

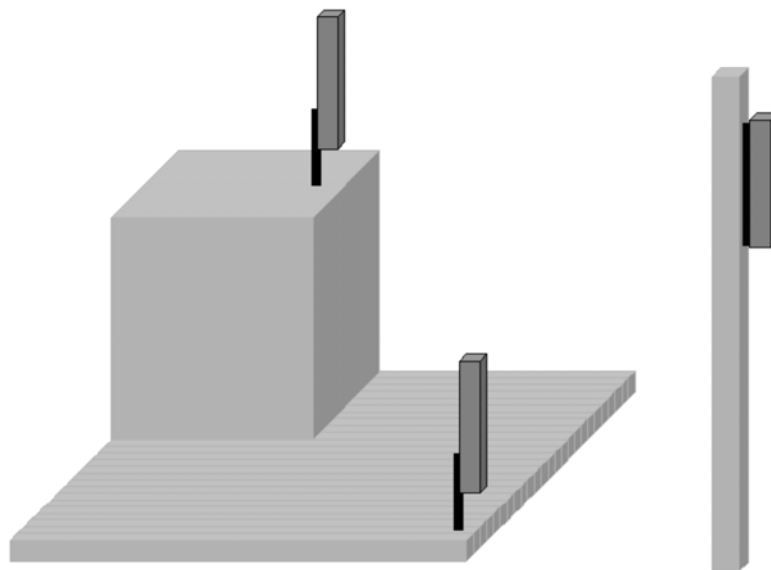


Bild 3.4.11: Mobilfunkantennen auf einem Aufzugschacht, an der Dachkante und an einem Betonmast

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.

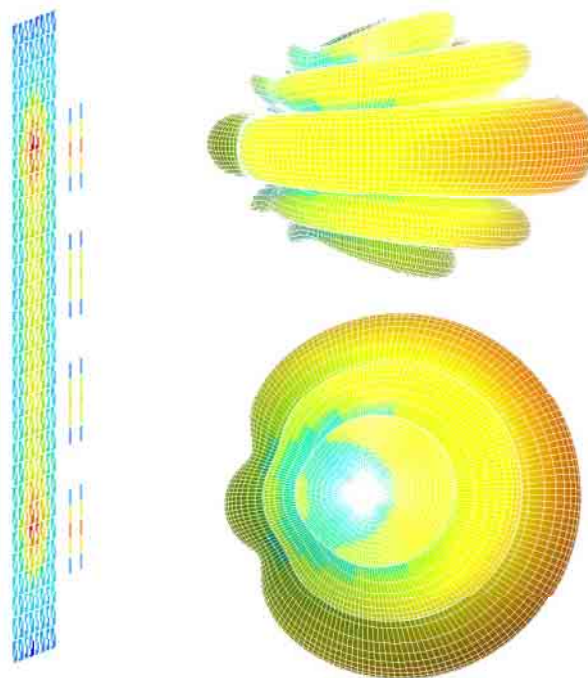


Bild 3.4.12: Exemplarisch modellierte Basisstationsantenne und das zugehörige dreidimensionale Fernfeld in linearer Darstellung aus zwei verschiedenen Ansichten.  
Links: Modellierte Basisstationsantenne  
Oben rechts: Simuliertes dreidimensionales Fernfeld in der Seitenansicht  
Unten rechts: Simuliertes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

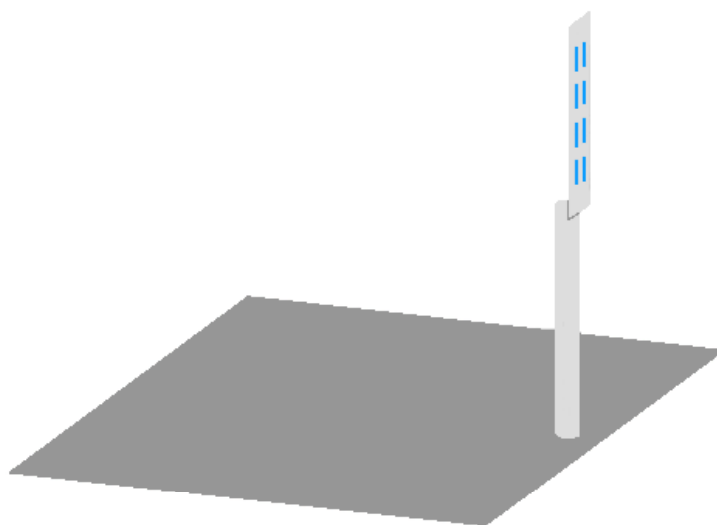


Bild 3.4.13: Mit Feko simuliertes Szenario



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.

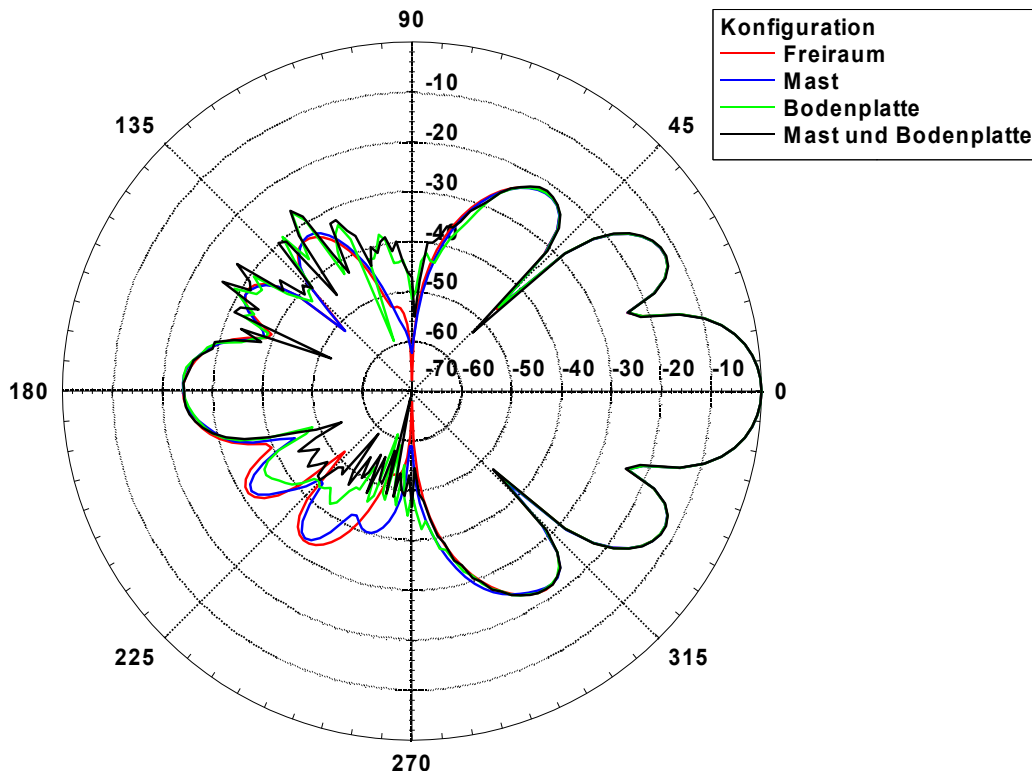


Bild 3.4.14: Vergleich der Abstrahlcharakteristiken zwischen den verschiedenen Konfigurationen

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)).

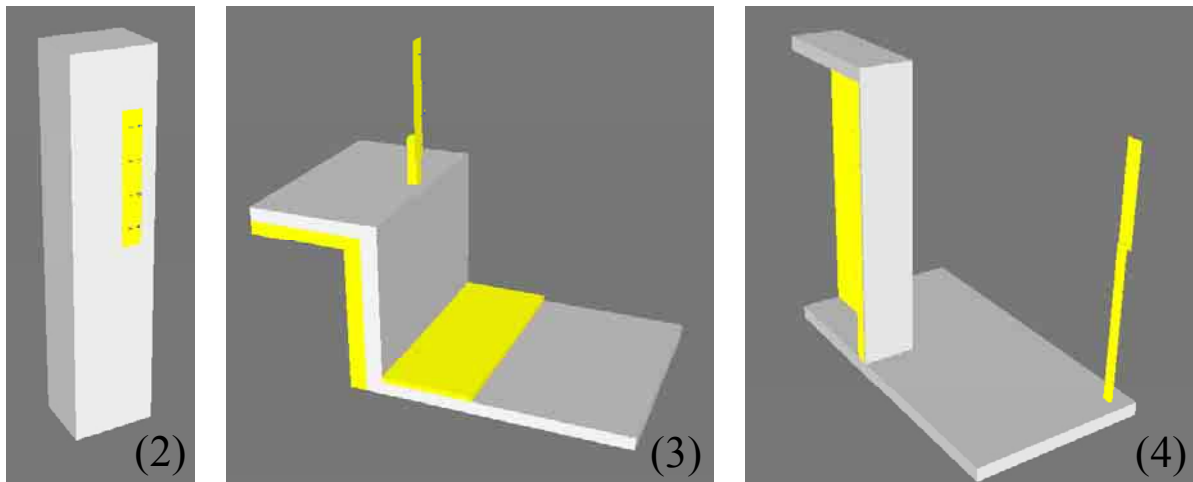


Bild 3.4.15: Drei verschiedene Simulationskonfigurationen, die mit EMPIRE berechnet wurden.

- (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.

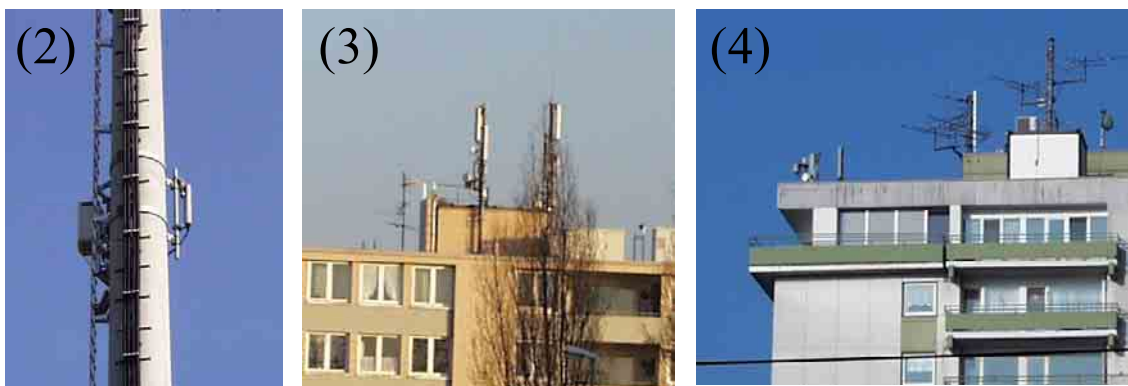


Bild 3.4.16: Drei verschiedene reale Montageumgebungen

- (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.

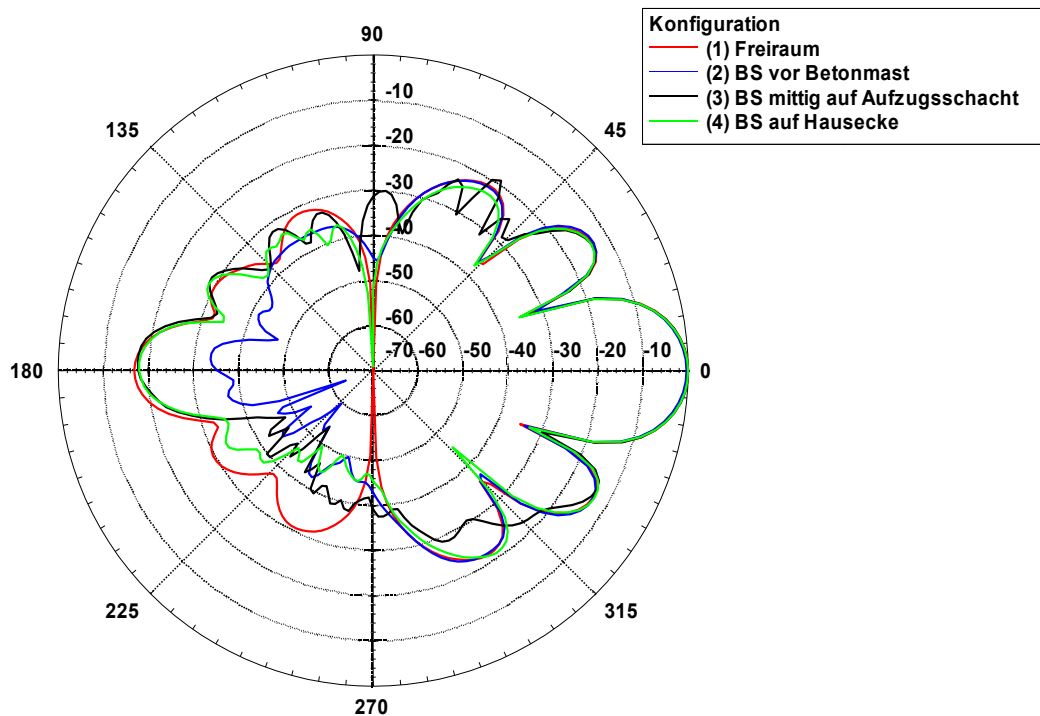


Bild 3.4.17: Vergleich der Abstrahlcharakteristiken zwischen den verschiedenen Konfigurationen

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  $0^\circ$  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 rechentechnischen 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).

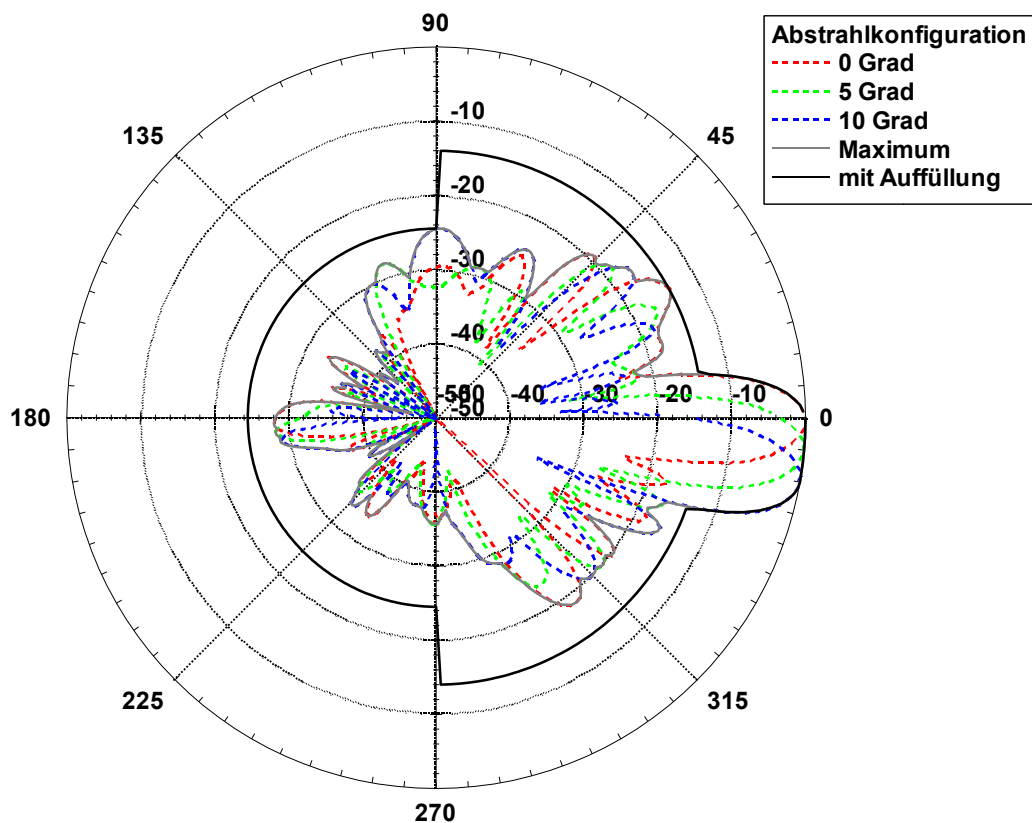


Bild 3.4.18: Synthèse einer neuen Abstrahlcharakteristik zur Kompensation der oben beschriebenen Einflussfaktoren

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 km<sup>2</sup> 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 <sup>1)</sup>	Sendeanennenkennzeichnung <sup>2)</sup>	Montagehöhe über Grund in Meter	Hauptstrahlrichtung (HSR) in Grad	Sicherheitsabstand in HSR in Meter	vertikaler Sicherheitsabstand 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 Standortanträgen) 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.

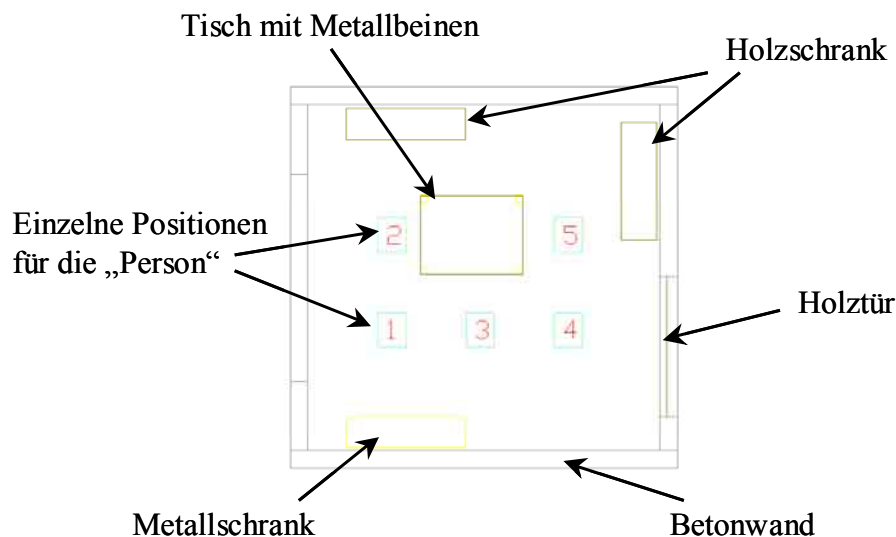


Bild 3.6.1: Aufbau und Konfiguration des untersuchten Indoorszenarios

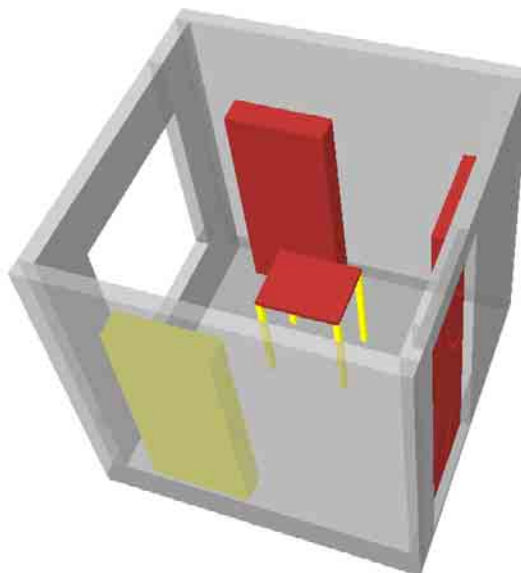


Bild 3.6.2: Untersuchtes Indoorszenario mit folgenden Materialien: Grau = Beton, rot = Holz, gelb = Metall

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.

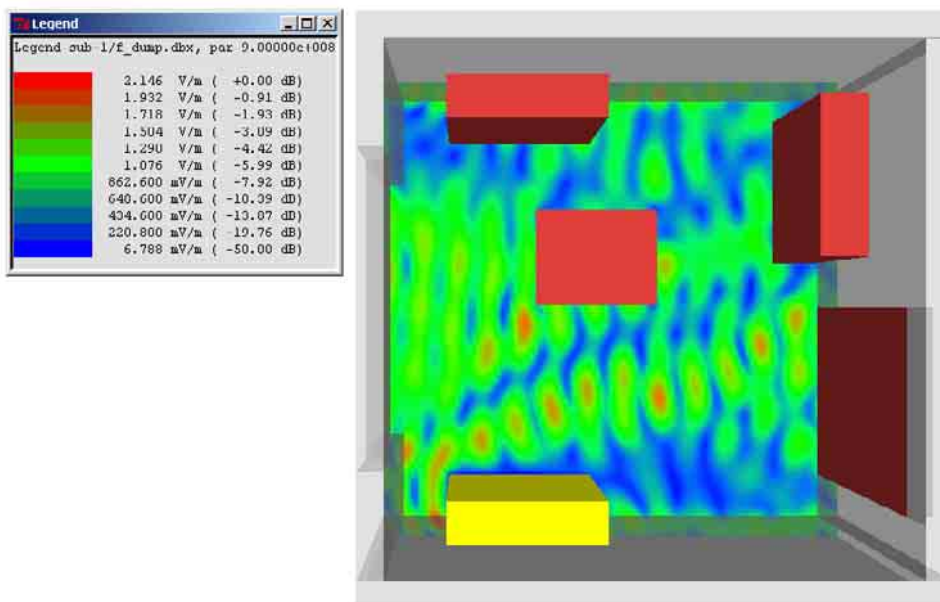


Bild 3.6.3: Verteilung der elektrischen Feldstärke in der Tischebene, einfallende Welle bei 900 MHz

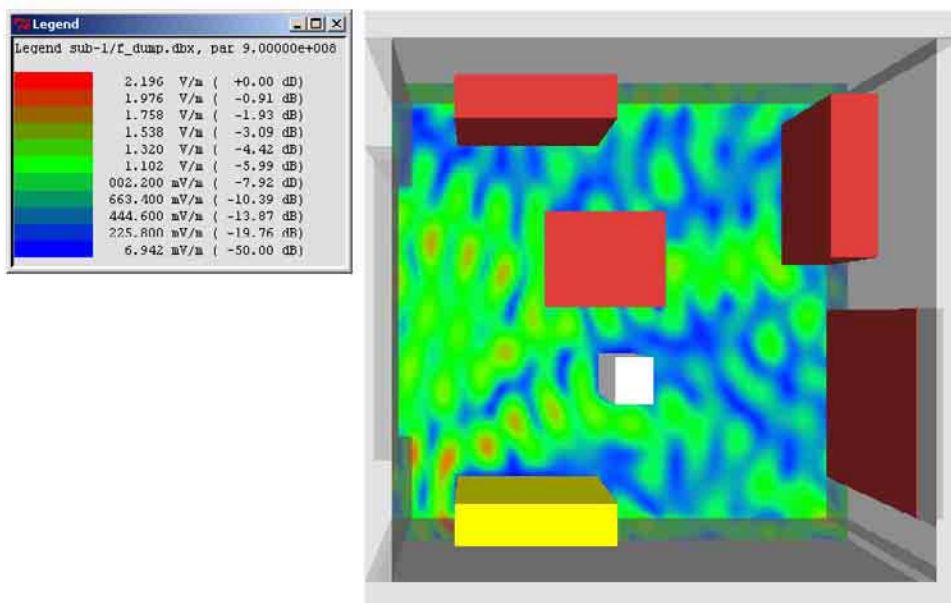


Bild 3.6.4: Verteilung der elektrischen Feldstärke in der Tischebene, einfallende Welle bei 900 MHz, Anwesenheit einer Person im Raum (weißer Block)

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

Konfiguration	Maximale elektrische Feldstärke [dB $\mu$ 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

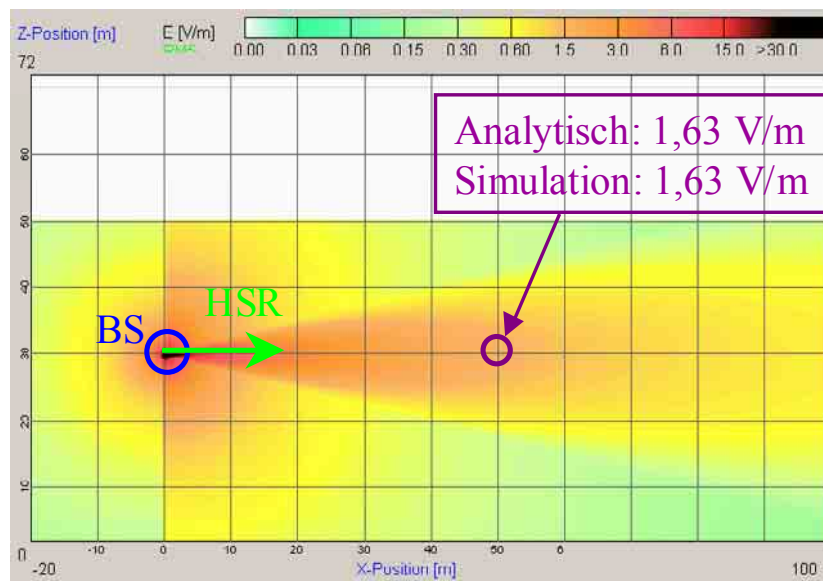


Bild 3.6.5: Vergleich Analytische Berechnung – Simulation

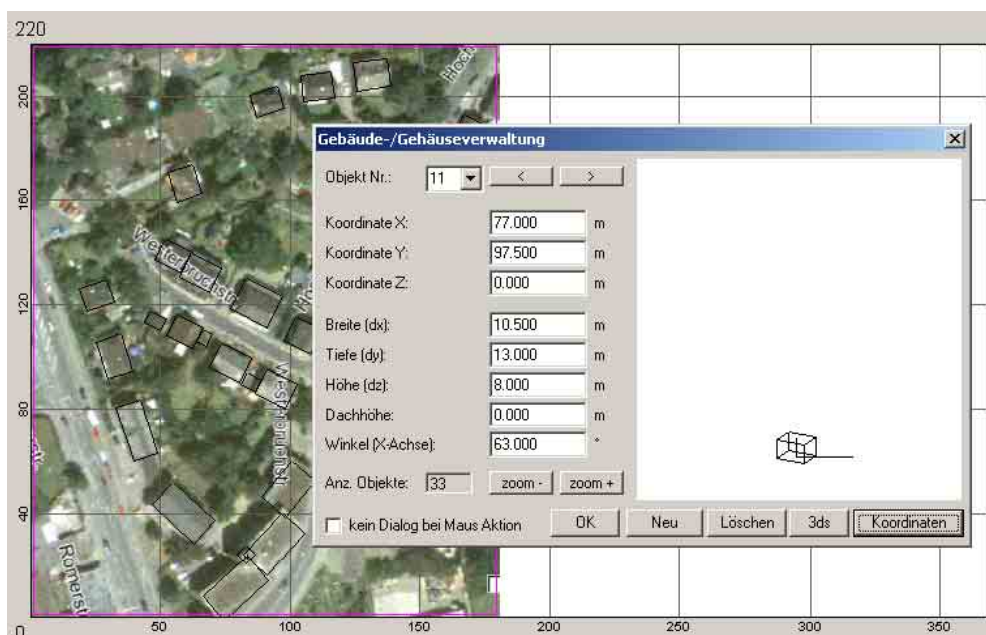
In analoger Weise wurden Berechnungen mit den übrigen Softwarepaketen durchgeführt, die die selben Ergebnisse lieferten.

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

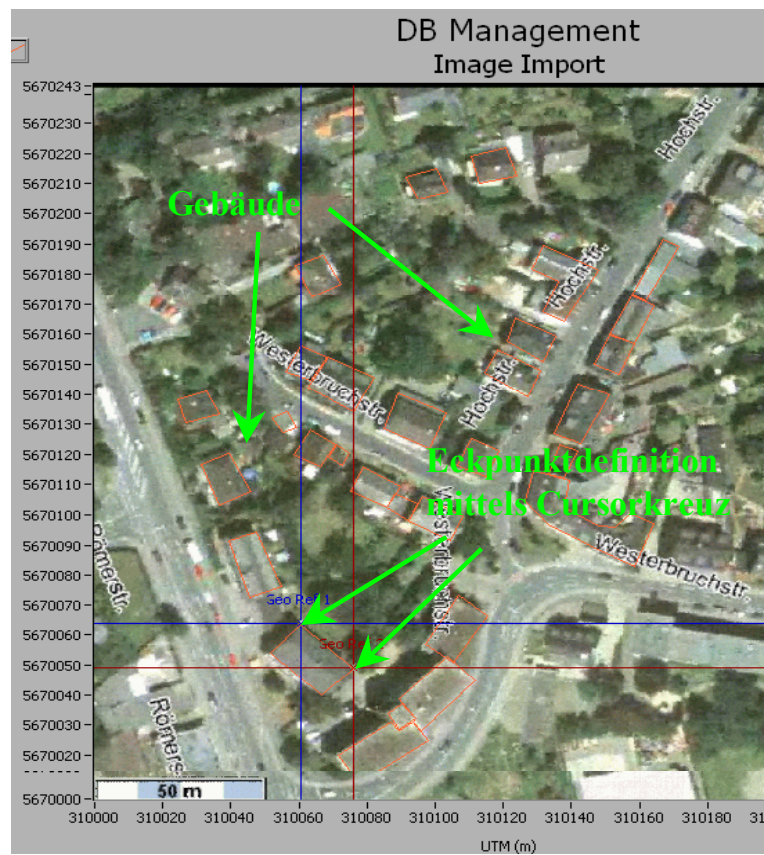


Bild 3.6.8: Gebäudemodellierung mit Quickplan

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 eingeben 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.

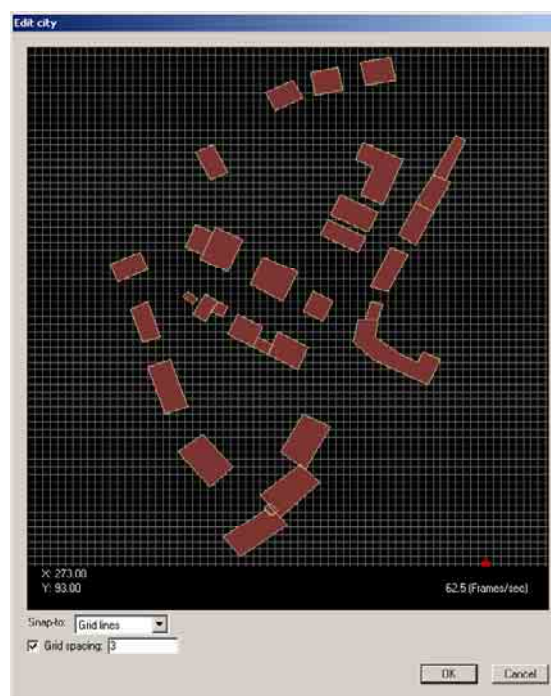


Bild 3.6.9: Einbinden der Gebäude in die Software Wireless Insite

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.



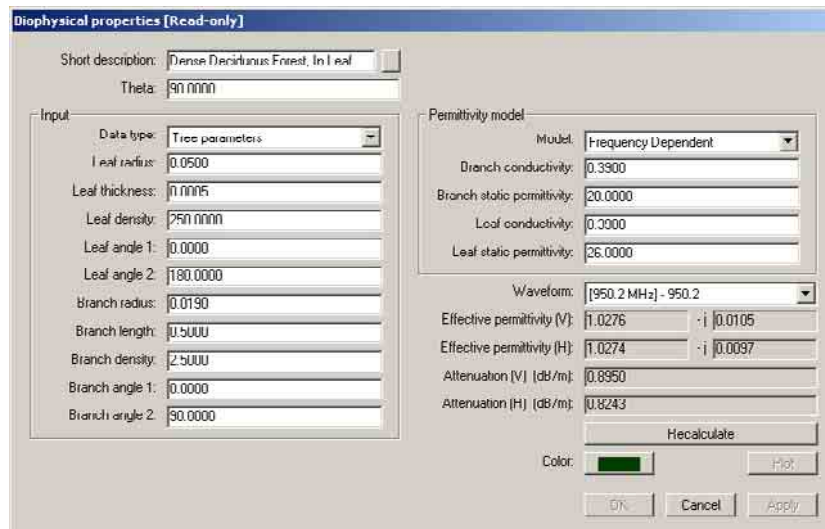


Bild 3.6.10: Biophysikalische Eigenschaften der Vegetation in Wireless Insite (ab Version 2.0)

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.

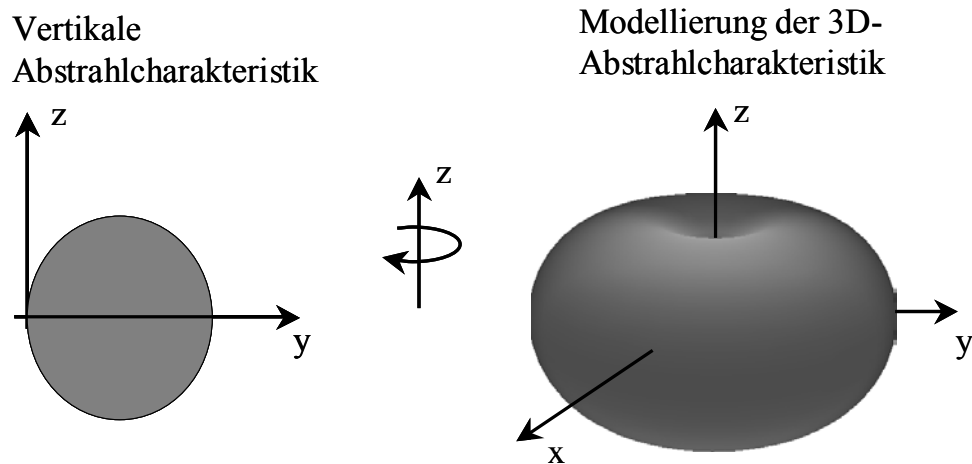


Bild 3.6.11: Dreidimensionale Modellierung der Antennenabstrahlcharakteristik aus dem vertikalen Schnitt.

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.

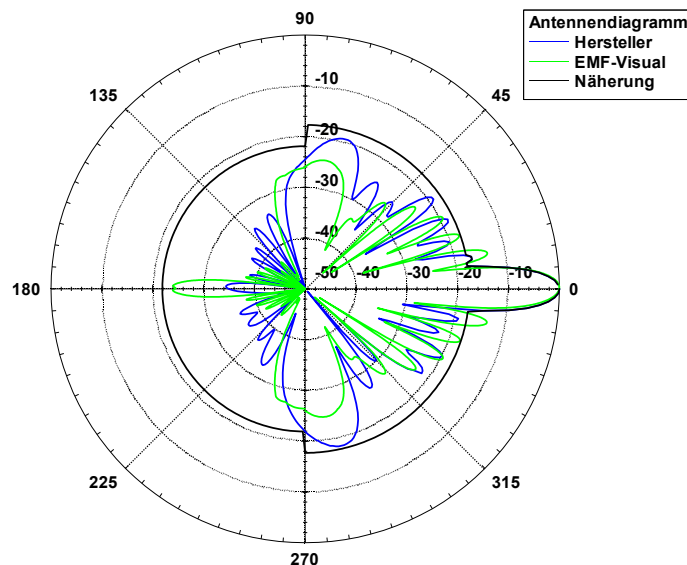


Bild 3.6.12: Vergleich zwischen Antennendiagramm in EMF-Visual zu den Herstellerangaben und den bearbeiteten Diagramm nach Abschnitt 3.4 für die Antenne K 741324 bei 900 MHz

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.

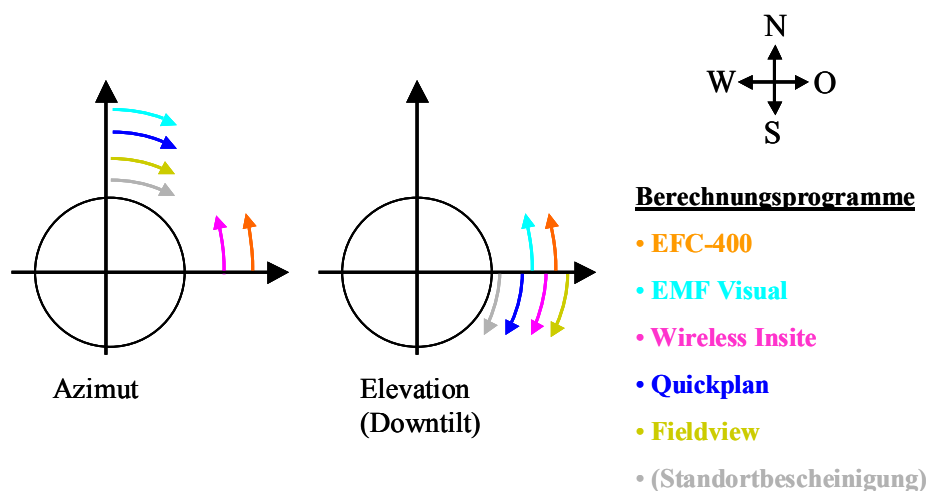


Bild 3.6.13: Vergleich der jeweiligen Richtungen und Drehwinkel für Azimut und Elevation in den einzelnen Softwarepaketen und der Standortbescheinigung

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 $\mu$ 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 $\mu$ 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 $\mu$ V/m außerhalb des Programms geschehen muss.

Die Software EMF-Visual ermöglicht die Ergebnisdarstellung in dB $\mu$ 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 $\mu$ 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 $\mu$ 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.

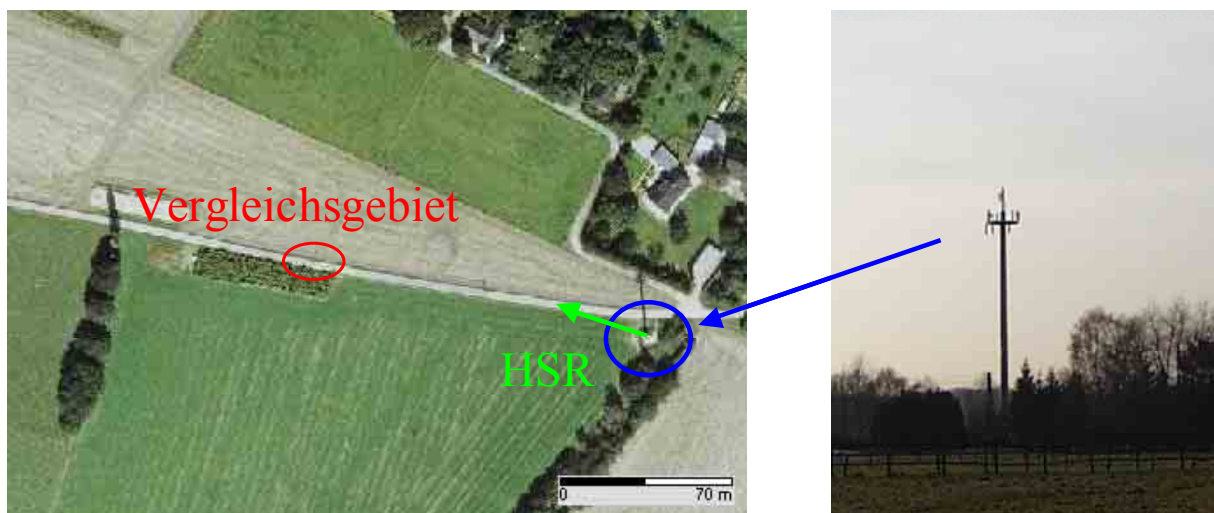


Bild 3.6.14: Mobilfunksendeanlage: Handelsstraße 76, 46519 Alpen

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 dB $\mu$ V/m (10 V/m) und der Minimalwert von 50 dB $\mu$ V/m (0,0003 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.

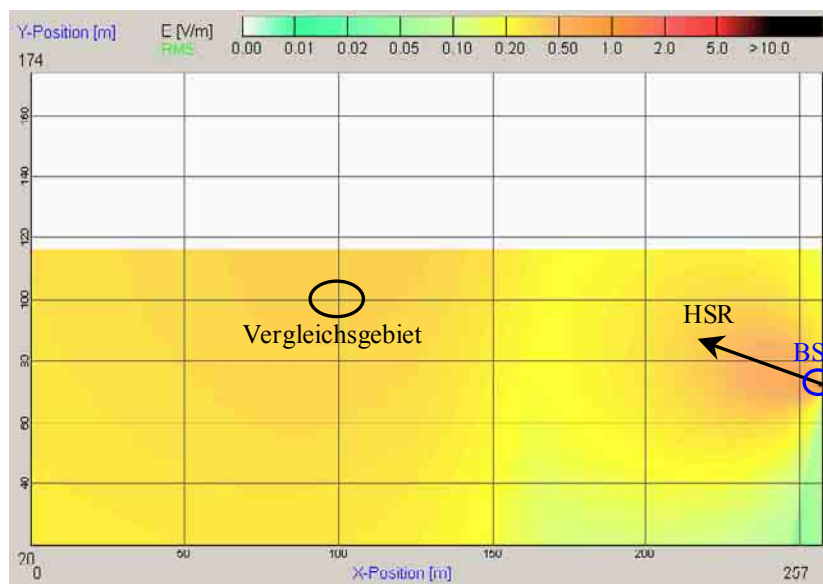


Bild 3.6.15: Simulationsergebnis für das Programm EFC-400

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

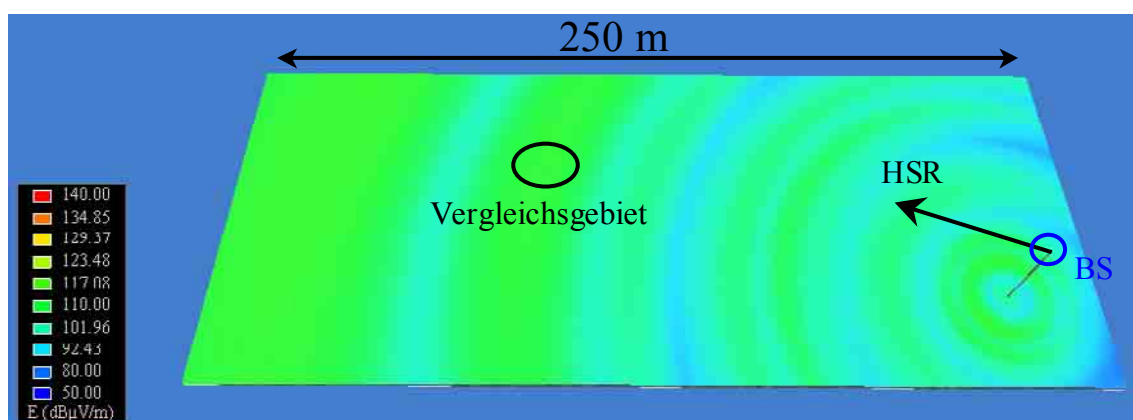


Bild 3.6.16: Simulationsergebnis für das Programm EMF-Visual

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 $\mu$ V/m entsprechen.

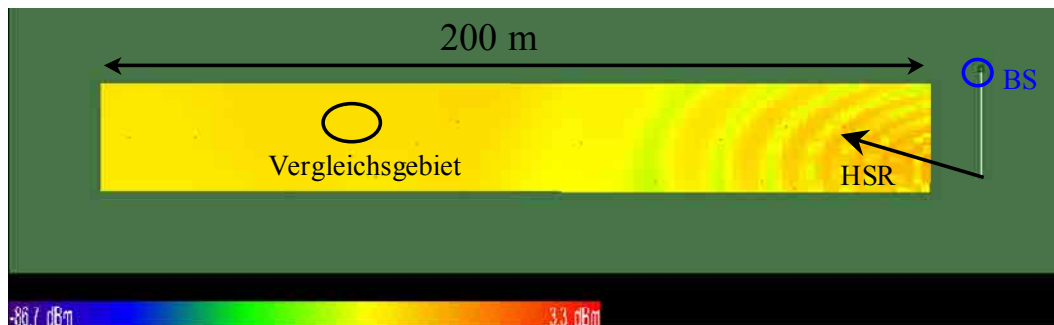


Bild 3.6.17: Simulationsergebnis für das Programm Wireless Insite

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.



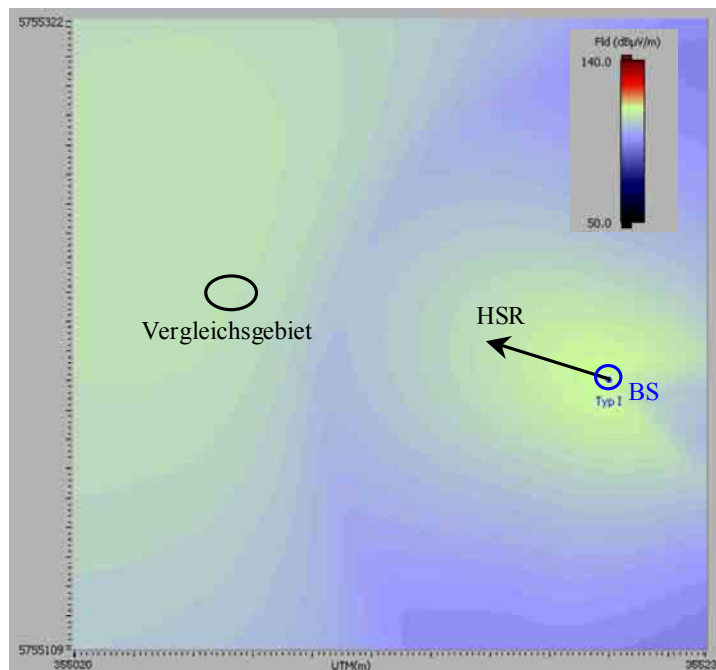


Bild 3.6.18: Simulationsergebnis für das Programm Quickplan, zweidimensional

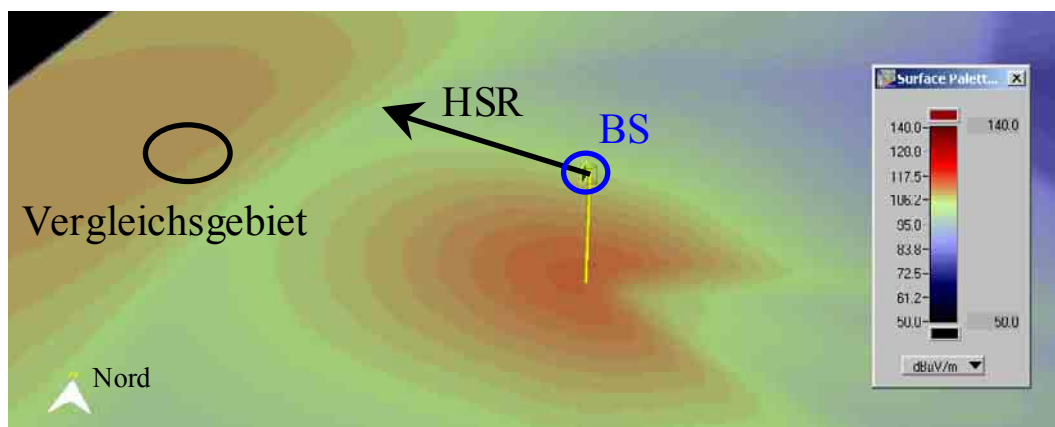


Bild 3.6.19: Simulationsergebnis für das Programm Quickplan, dreidimensional

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 dBµV/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 entgegen gesetzten Richtung zu erkennen. Dieses ist einem Fehler in der programminternen dreidimensionalen Interpolation der Abstrahlcharakteristik zu zuordnen, 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 dBµV/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.

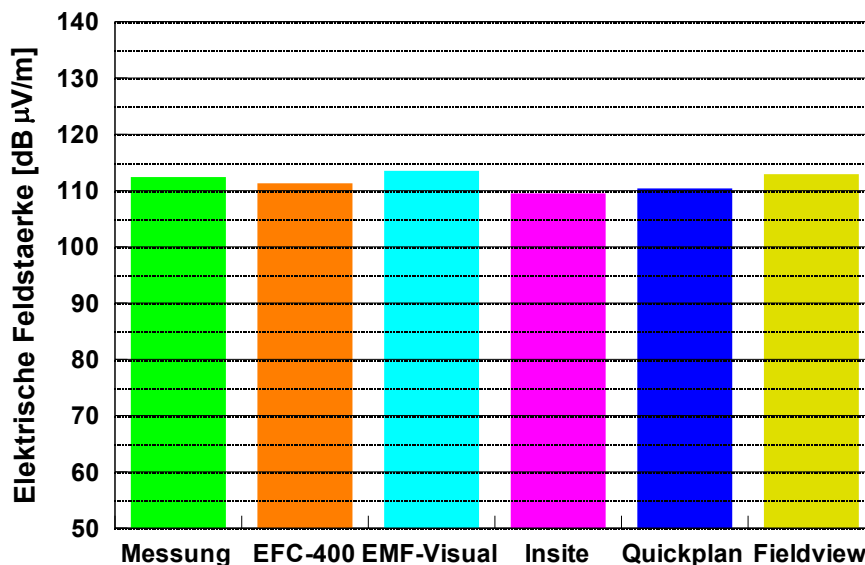


Bild 3.6.20: Vergleich der Simulations- bzw. Messwerte für den Basisstationsstandort Handelsstraße 76 (Alpen) im Vergleichsgebiet (LoS)

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.

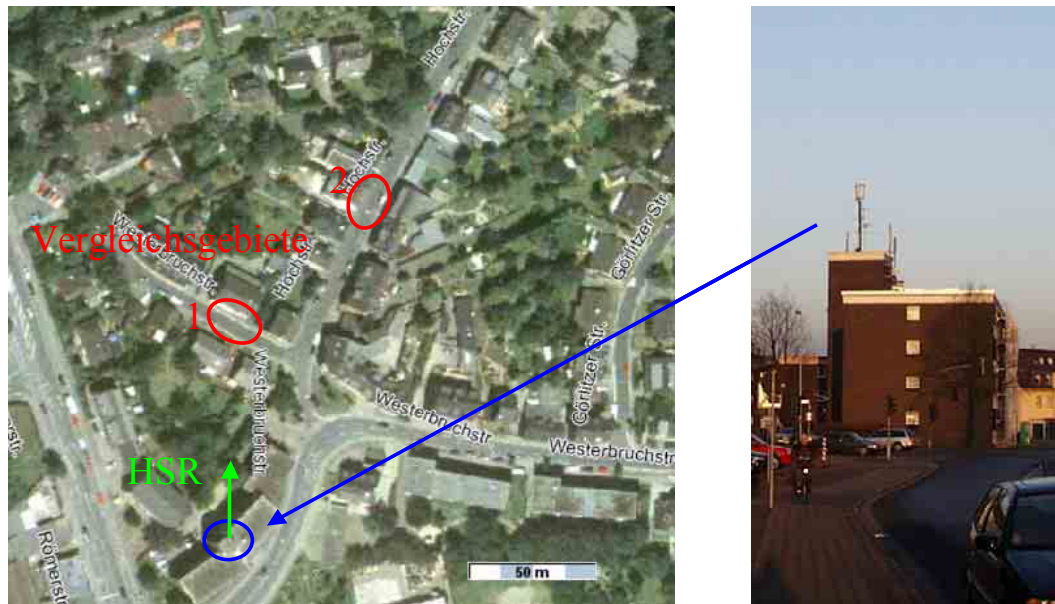


Bild 3.6.21: Mobilfunksendeanlage: Hochstraße 1-3, 47443 Moers

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.

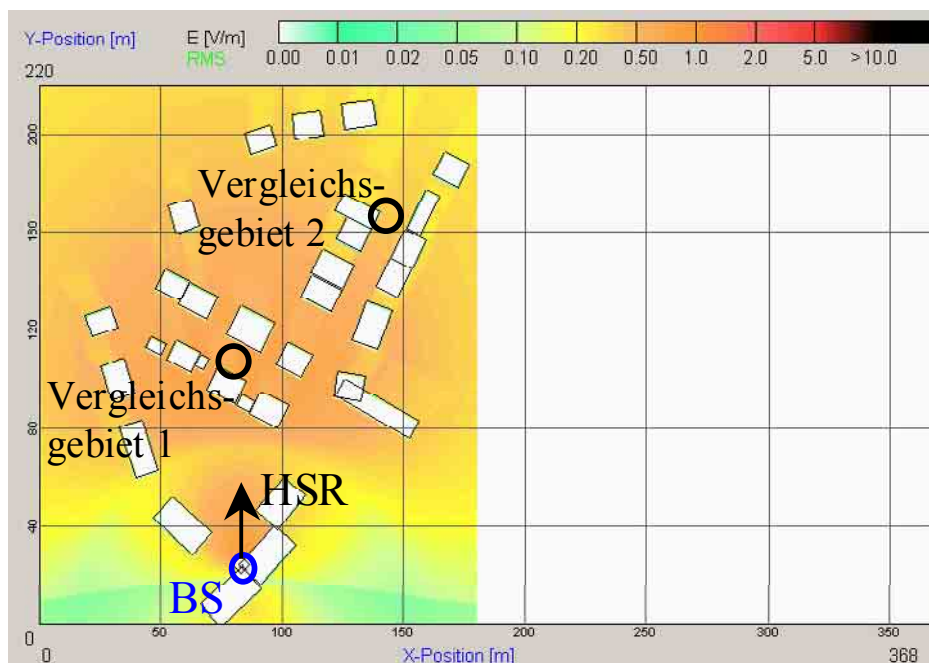


Bild 3.6.22: Simulationsergebnis für das Programm EFC-400, zweidimensional

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.

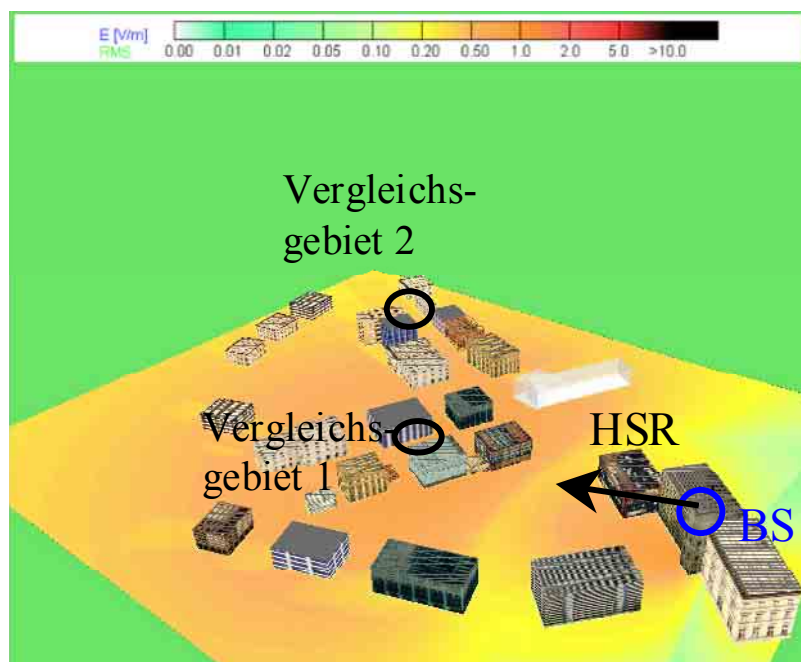


Bild 3.6.23: Simulationsergebnis für das Programm EFC-400, dreidimensional

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.

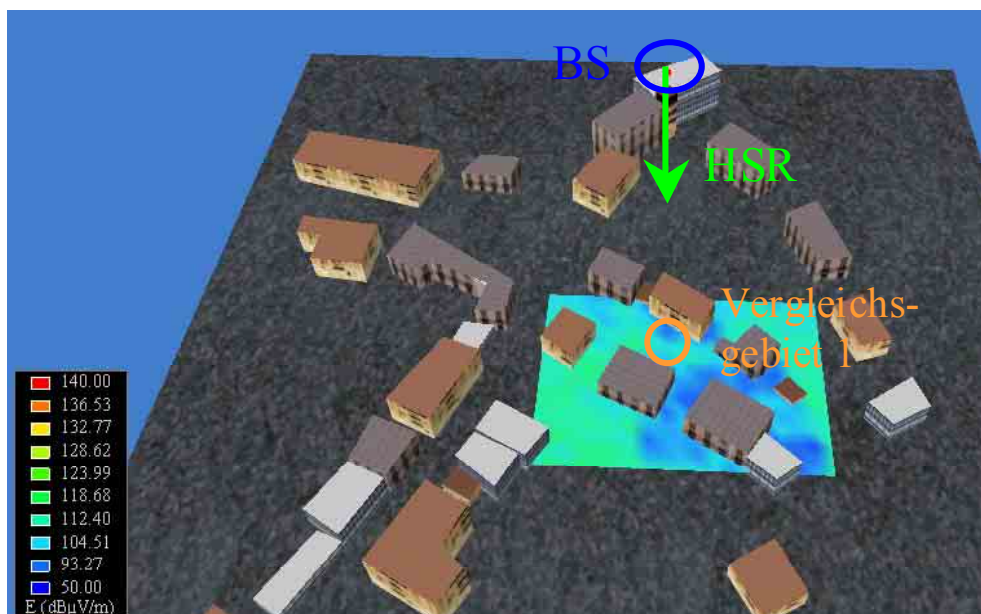


Bild 3.6.24: Simulationsergebnis für das Programm EMF-Visual, Vergleichsgebiet 1 (nLoS)

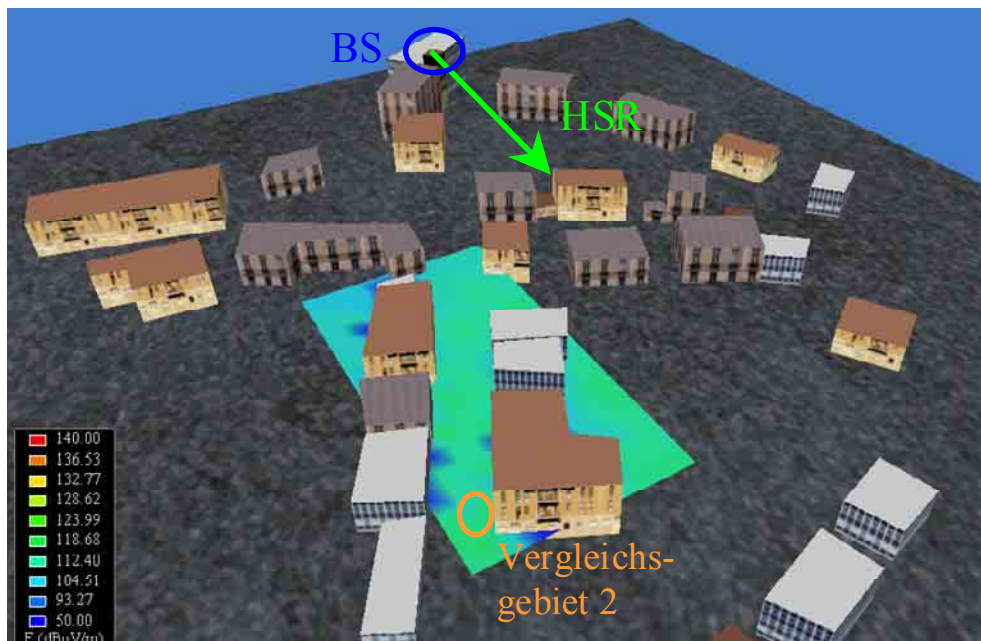


Bild 3.6.25: Simulationsergebnis für das Programm EMF-Visual, Vergleichsgebiet 2 (LoS)

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 dBµV.

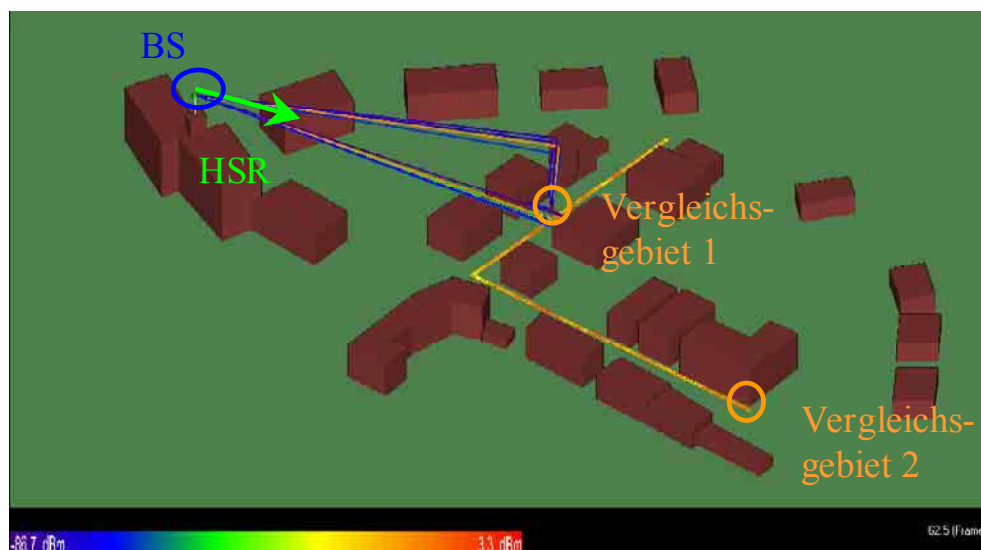


Bild 3.6.26: Simulationsergebnis für das Programm Wireless Insite

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

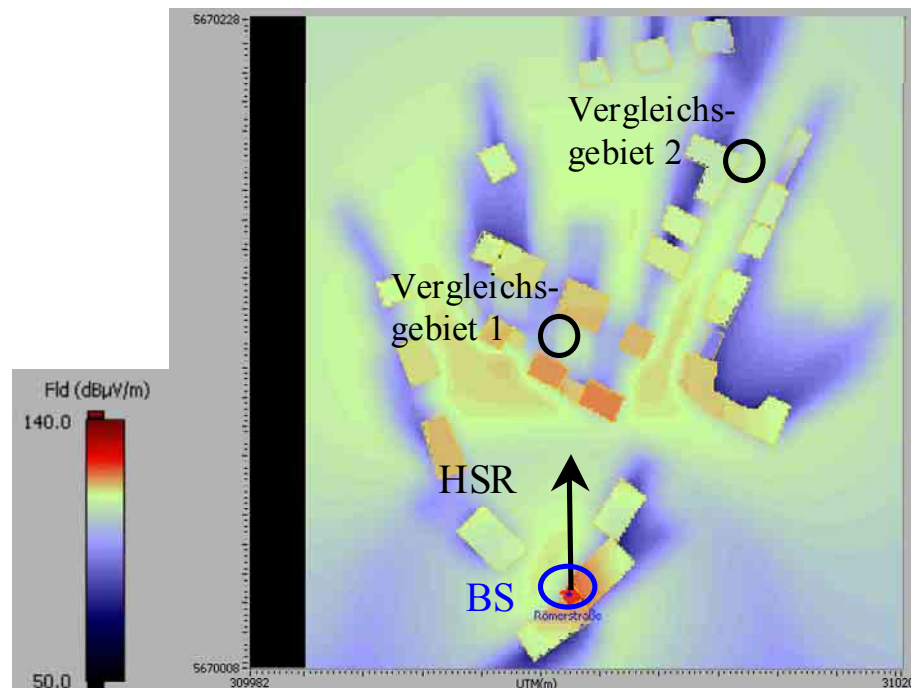


Bild 3.6.27: Simulationsergebnis für das Programm Quickplan, zweidimensional

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.

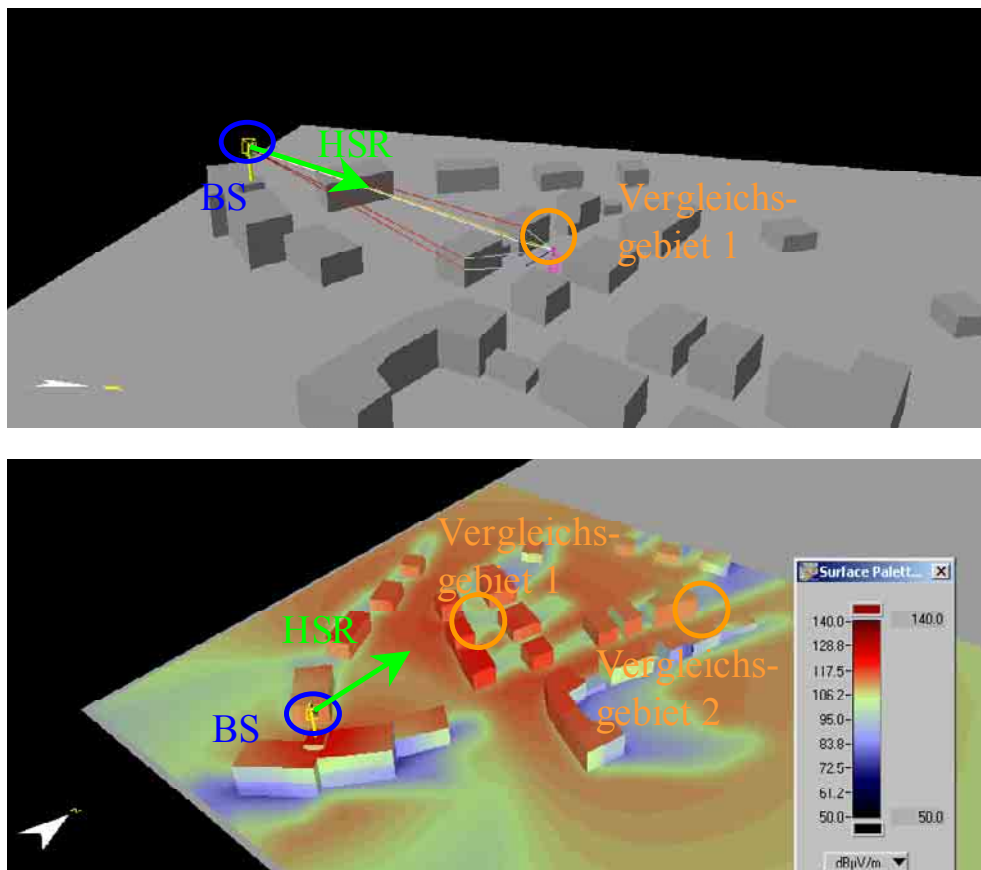


Bild 3.6.28: Simulationsergebnis für das Programm Quickplan, dreidimensional

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 Sendeanenne zu sehen.



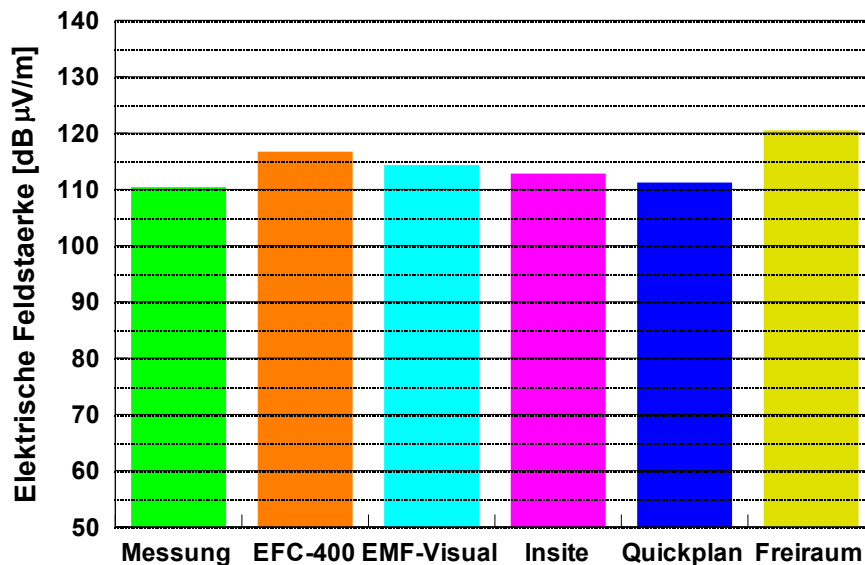


Bild 3.6.29: Vergleich der Simulations- bzw. Messwerte für den Basisstationsstandort Hochstraße 1-3 (Moers) im Vergleichsgebiet 1 (nLoS)

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.

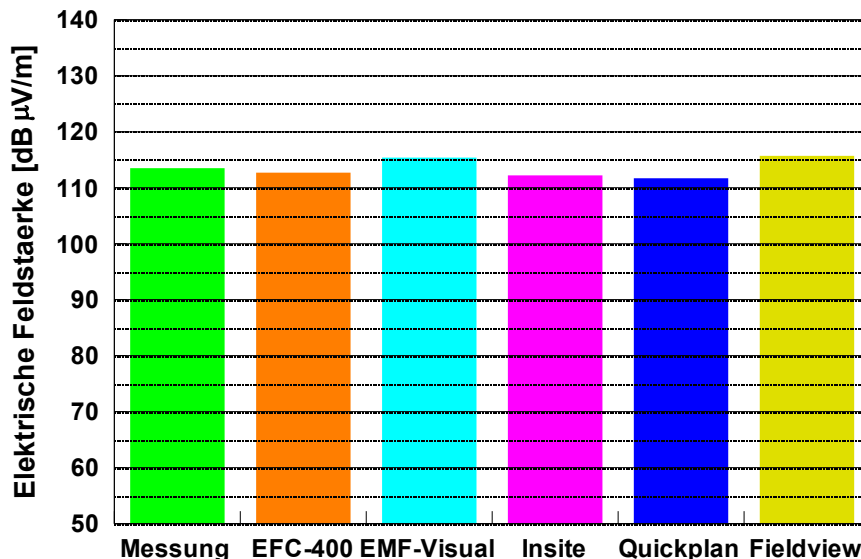


Bild 3.6.30: Vergleich der Simulations- bzw. Messwerte für den Basisstationsstandort Hochstraße 1-3 (Moers) im Vergleichsgebiet 2 (LoS)

### 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.

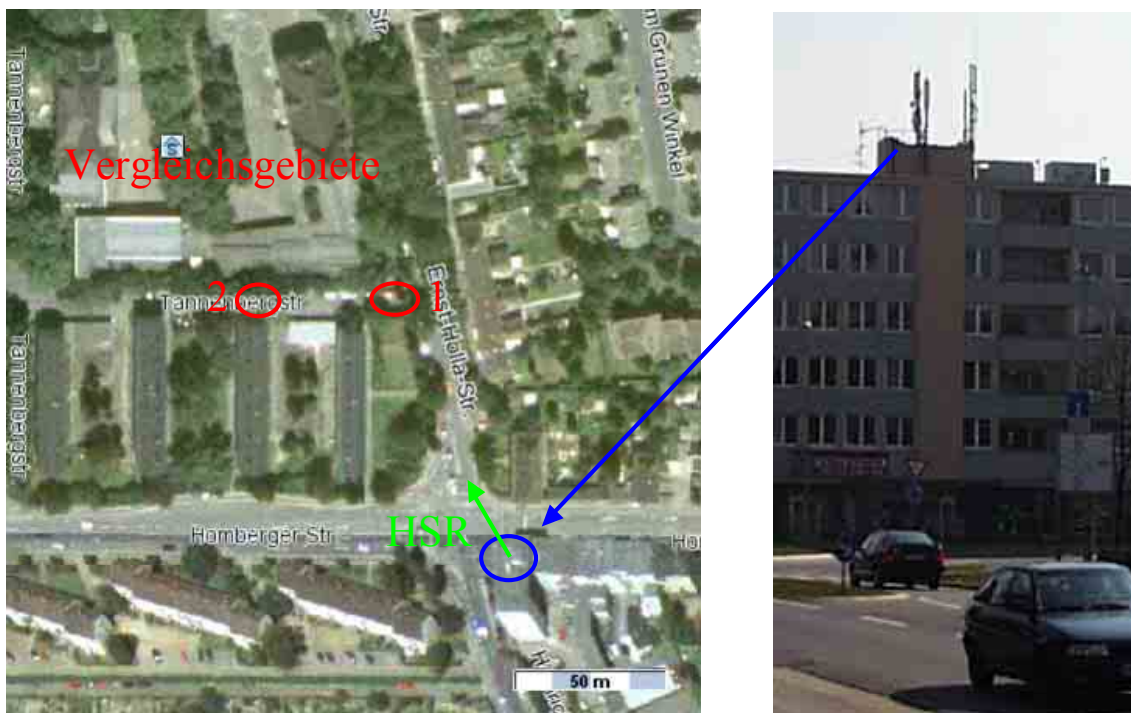


Bild 3.6.31: Mobilfunksendeanlage: Hombergerstraße 162, 47441 Moers

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.

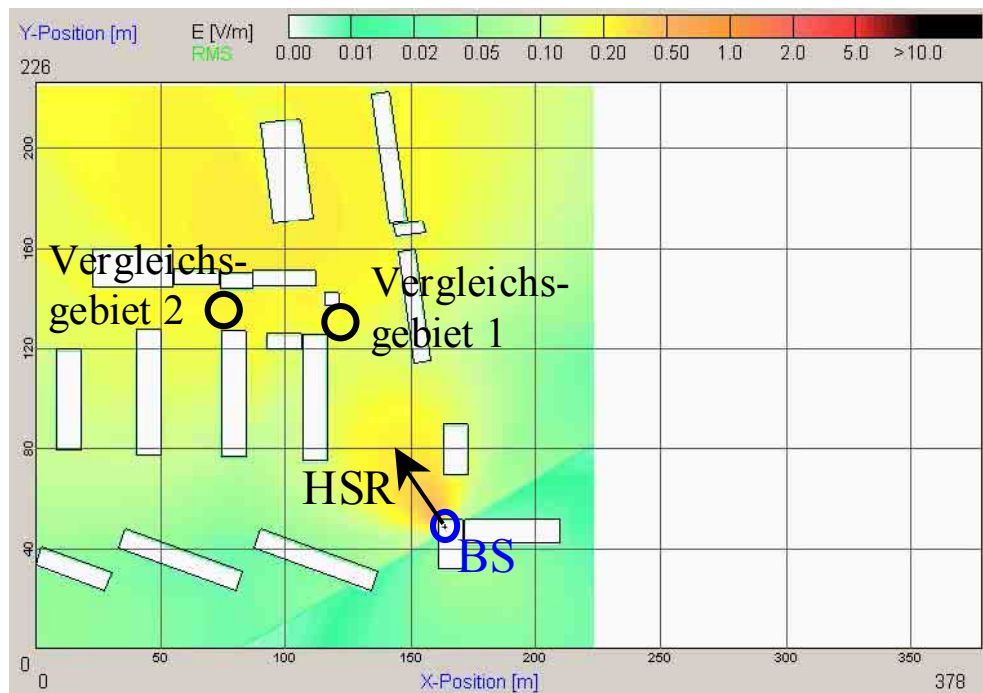


Bild 3.6.32: Simulationsergebnis für das Programm EFC-400, zweidimensional

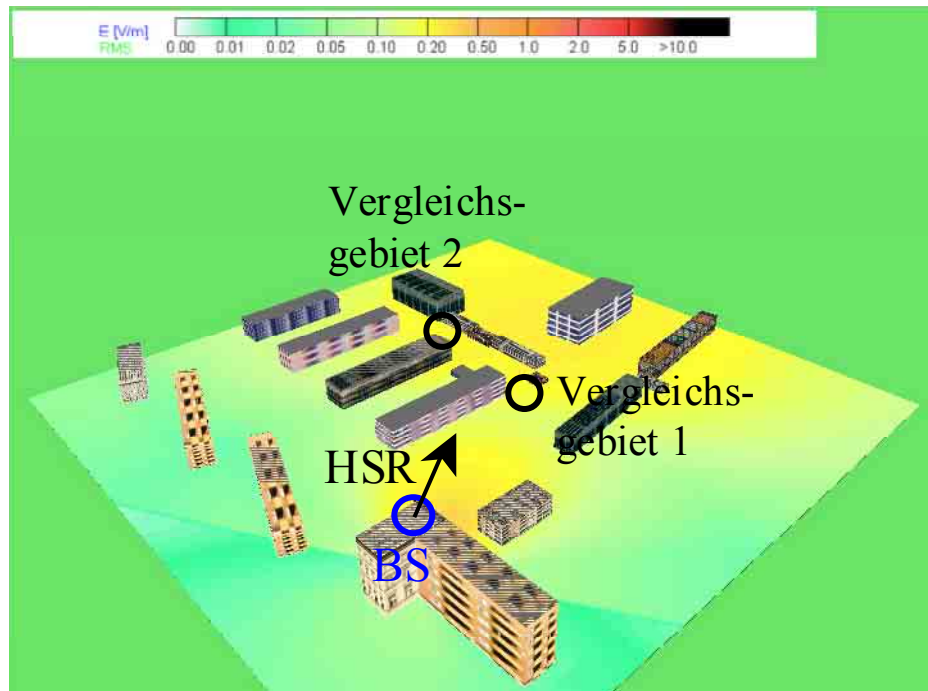


Bild 3.6.33: Simulationsergebnis für das Programm EFC-400, dreidimensional

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.

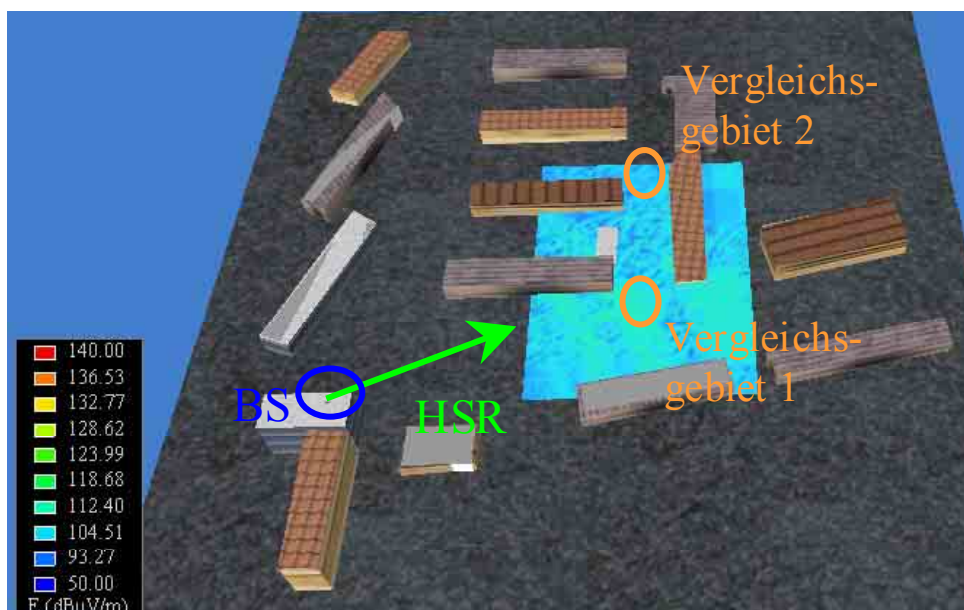


Bild 3.6.34: Simulationsergebnis für das Programm EMF-Visual

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.

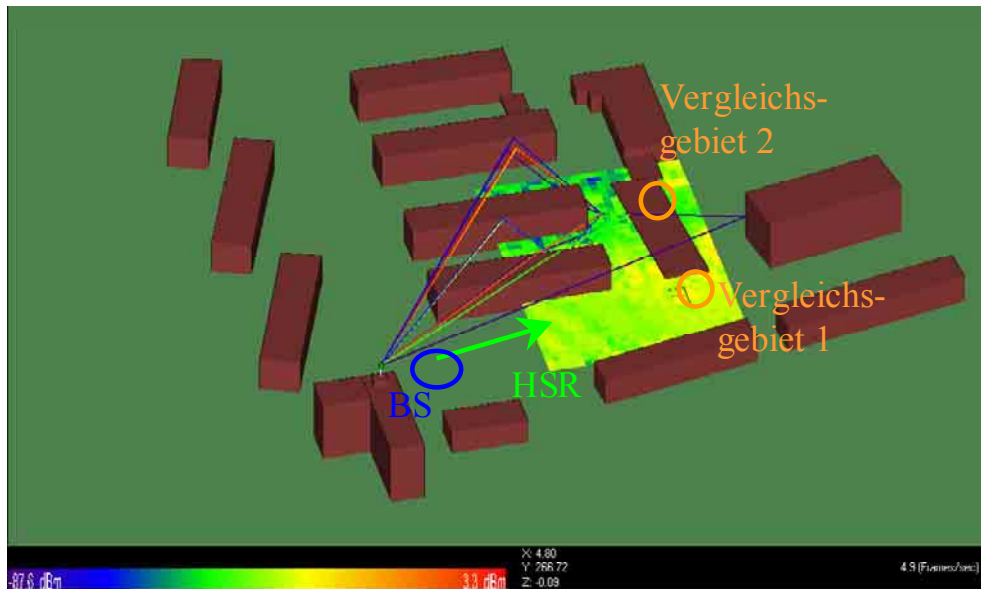


Bild 3.6.35: Simulationsergebnis für das Programm Wireless Insite

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.

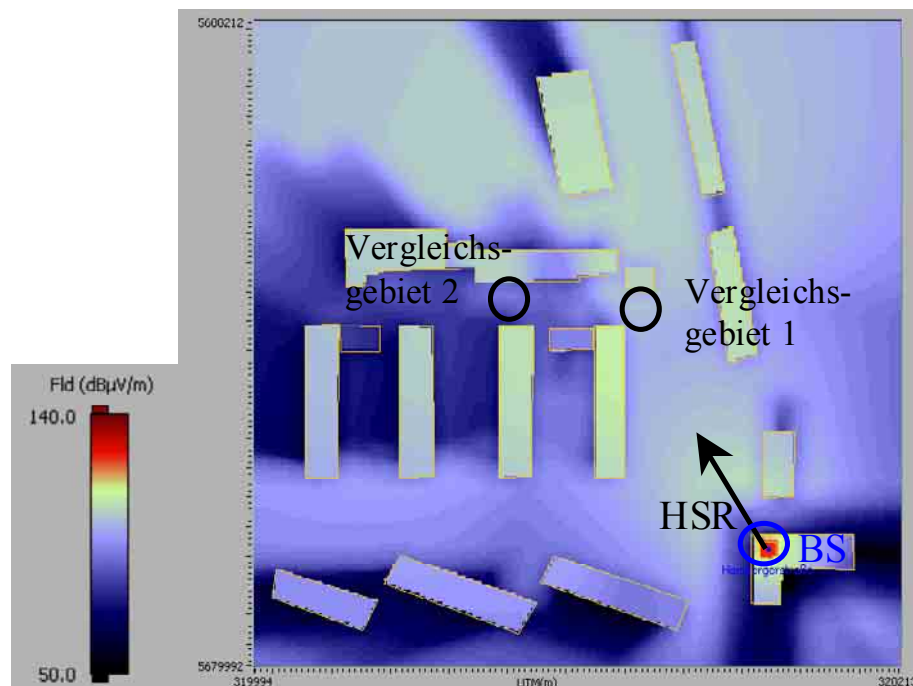


Bild 3.6.36: Simulationsergebnis für das Programm Quickplan, zweidimensional

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.

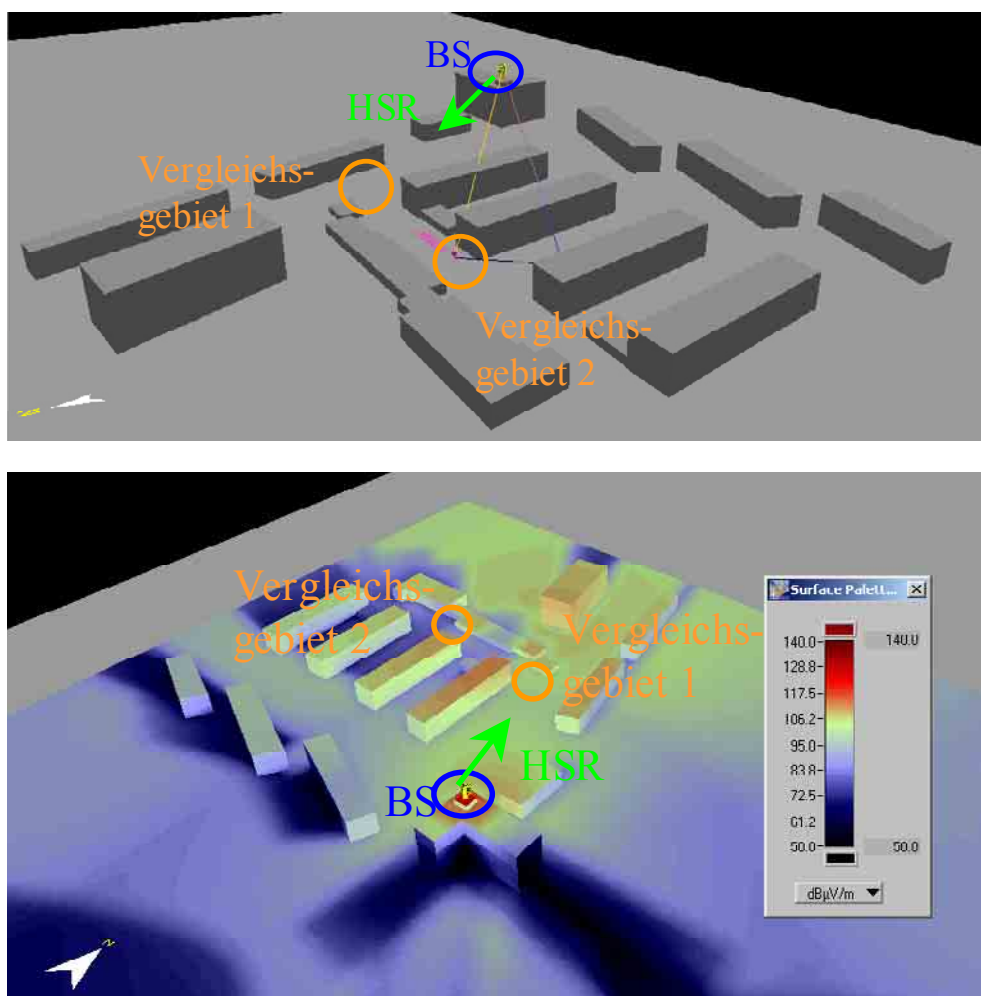


Bild 3.6.37: Simulationsergebnis für das Programm Quickplan, dreidimensional

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.

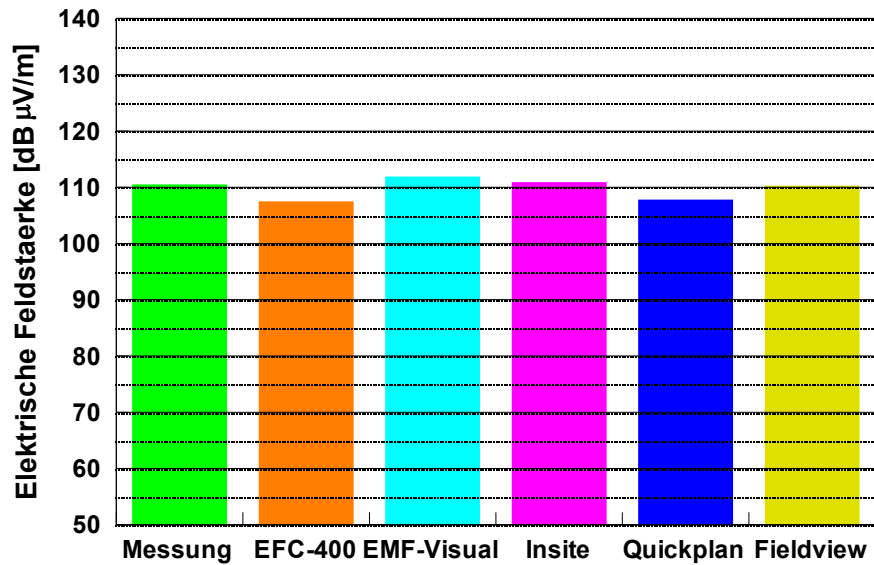


Bild 3.6.38: Vergleich der Simulations- bzw. Messwerte für den Basisstationsstandort Hombergerstraße 162 (Moers) im Vergleichsgebiet 1 (LoS)

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.

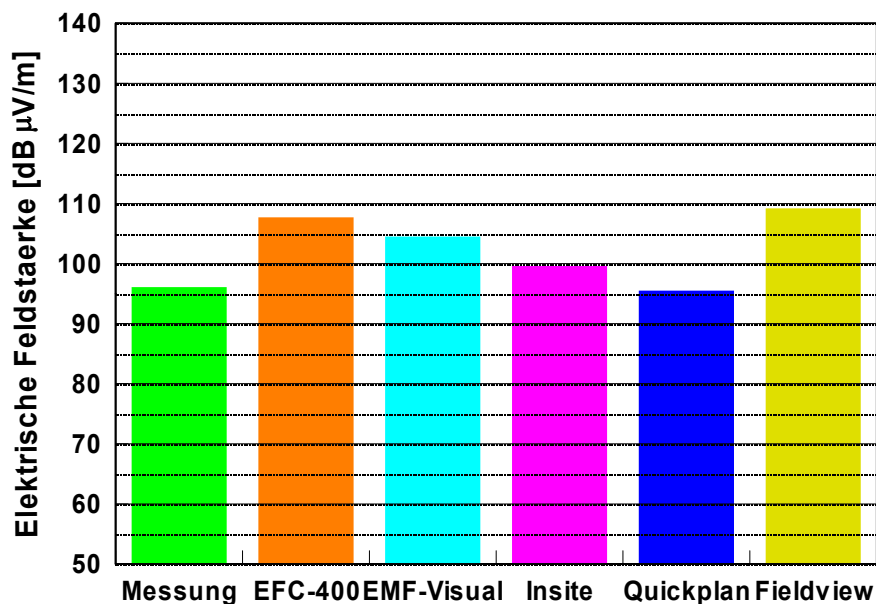


Bild 3.6.39: Vergleich der Simulations- bzw. Messwerte für den Basisstationsstandort Homberger Straße 162 (Moers) im Vergleichsgebiet 2 (nLoS)

### 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.

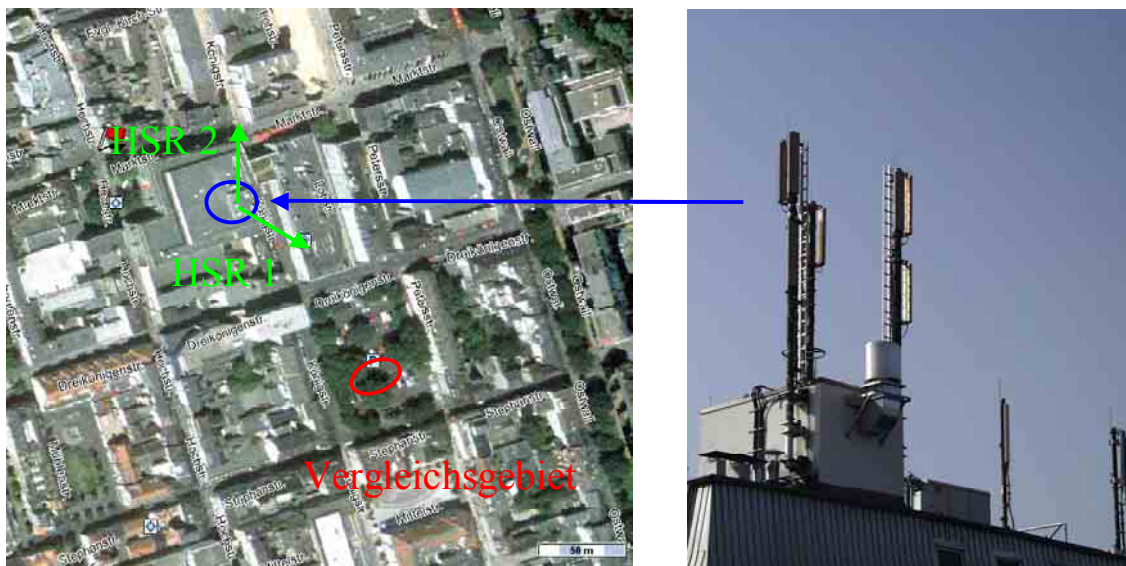


Bild 3.6.40: Mobilfunksendeanlage: Hochstraße 57, 47798 Krefeld

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.

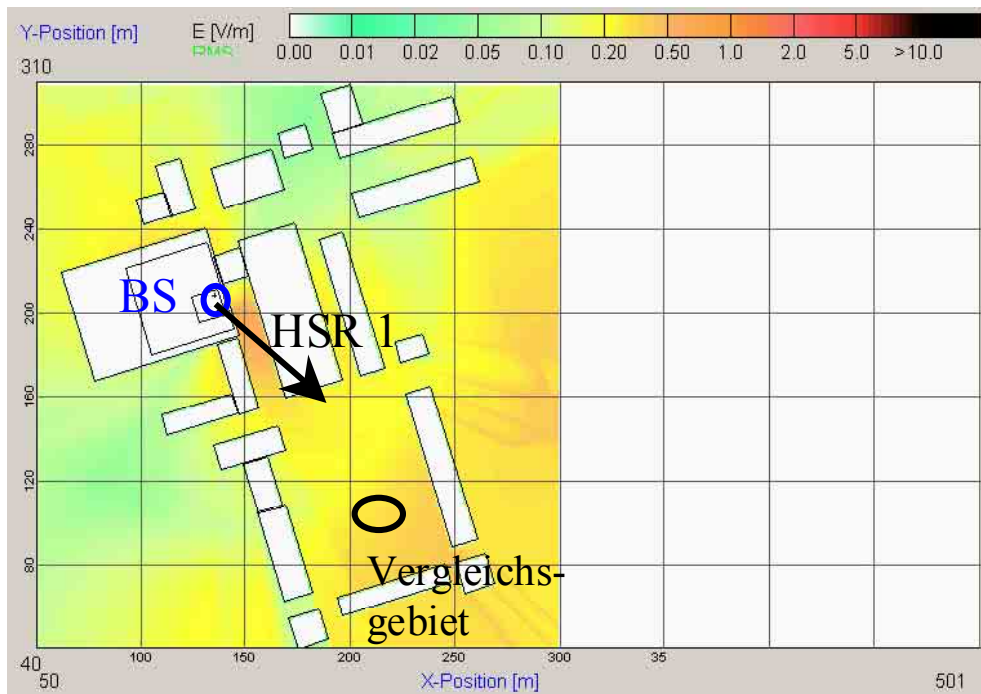


Bild 3.6.41: Simulationsergebnis für das Programm EFC-400, zweidimensional

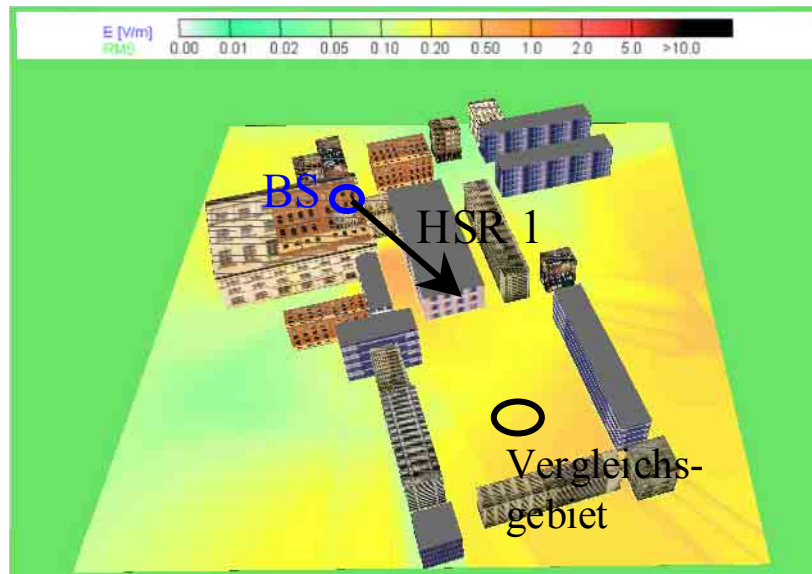


Bild 3.6.42: Simulationsergebnis für das Programm EFC-400, dreidimensional

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.

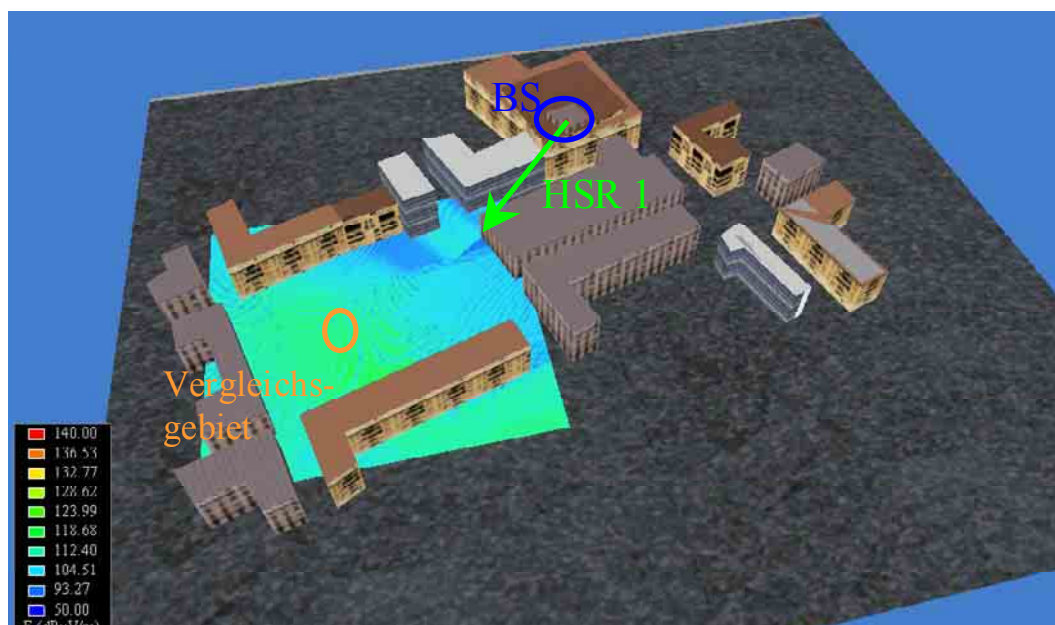


Bild 3.6.43: Simulationsergebnis für das Programm EMF-Visual

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.

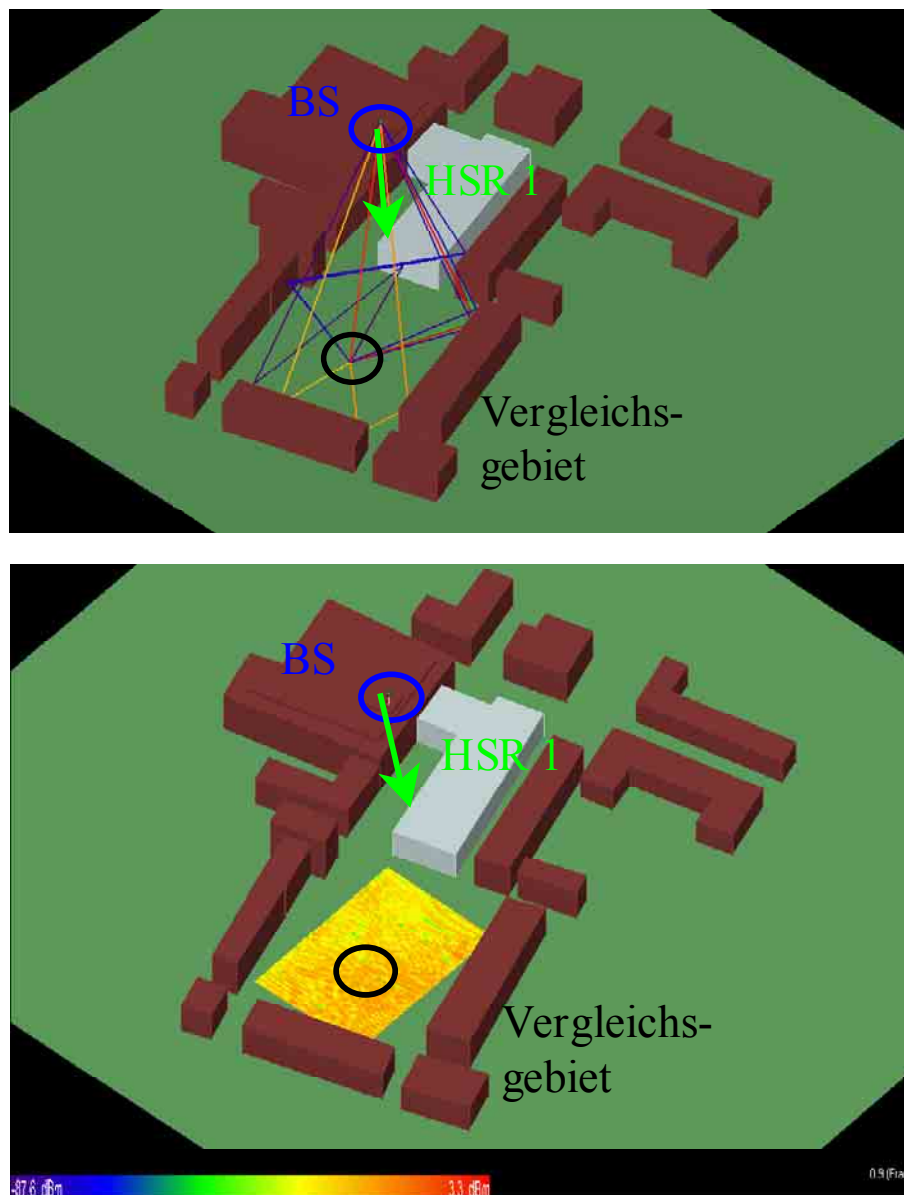


Bild 3.6.44: Simulationsergebnis für das Programm Wireless Insite

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).

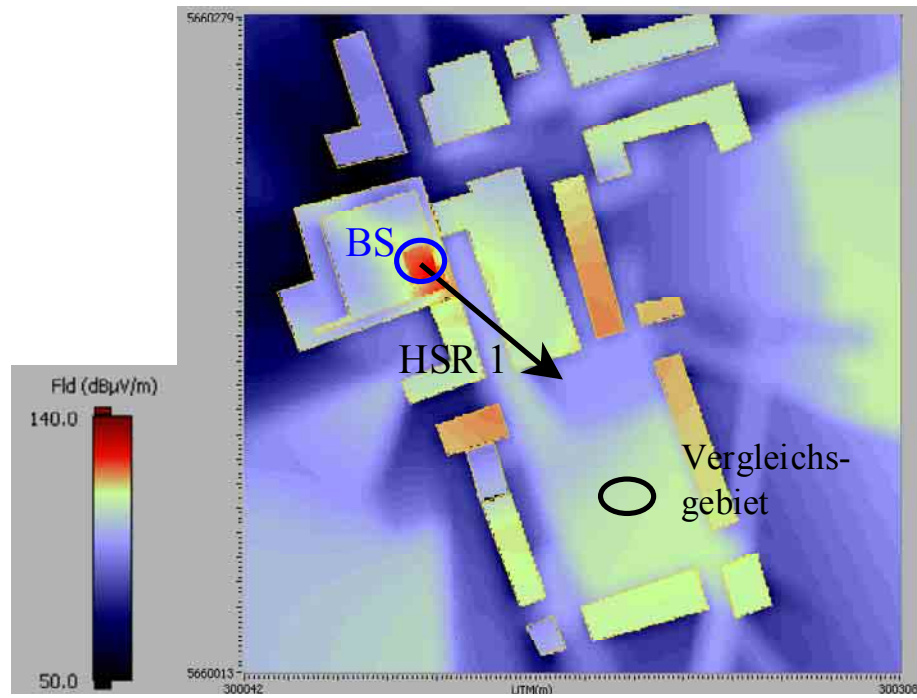


Bild 3.6.45: Simulationsergebnis für das Quickplan, zweidimensional

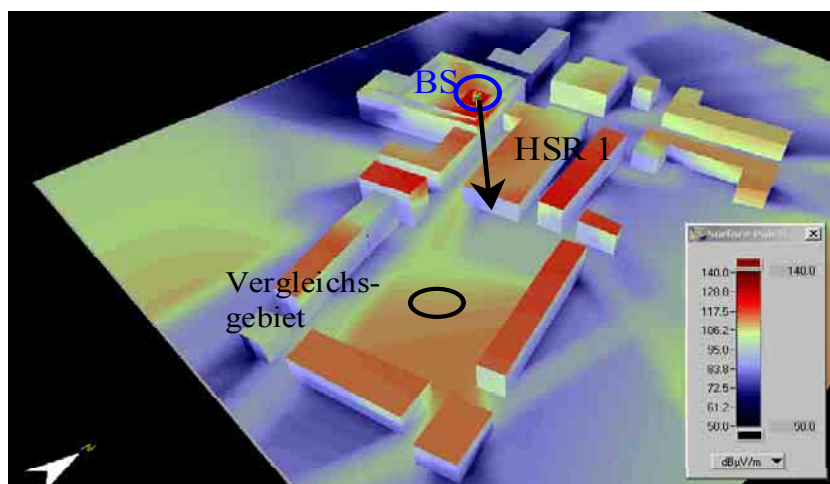
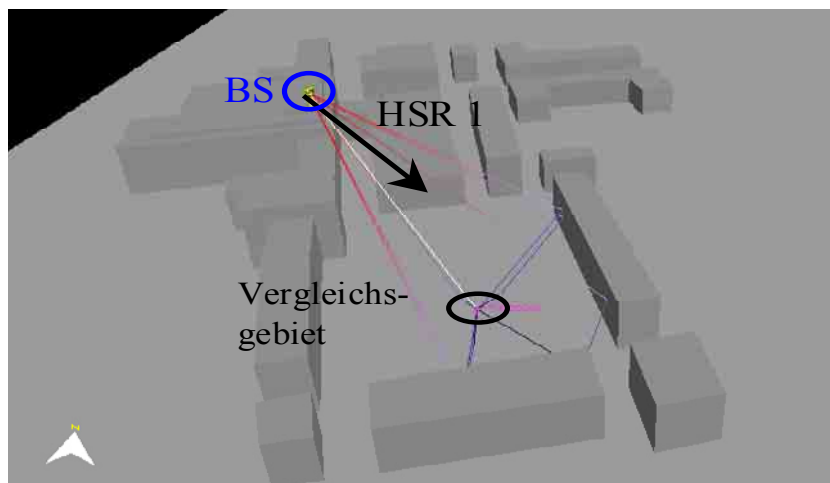


Bild 3.6.46: Simulationsergebnis für das Programm Quickplan, dreidimensional

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.

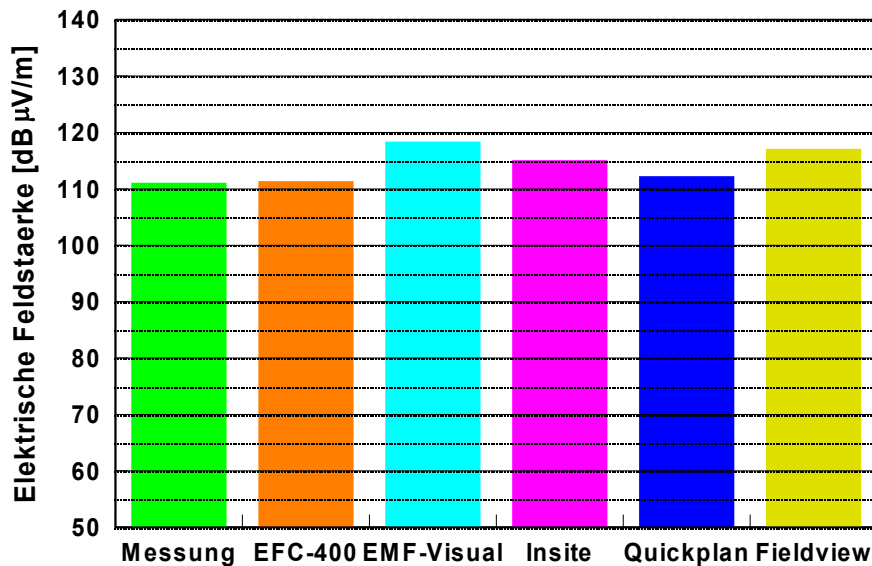


Bild 3.6.47: Vergleich der Simulations- bzw. Messwerte für den Basisstationsstandort Hochstraße 57 (Krefeld) im Vergleichsgebiet, HSR 1 (LoS)

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.

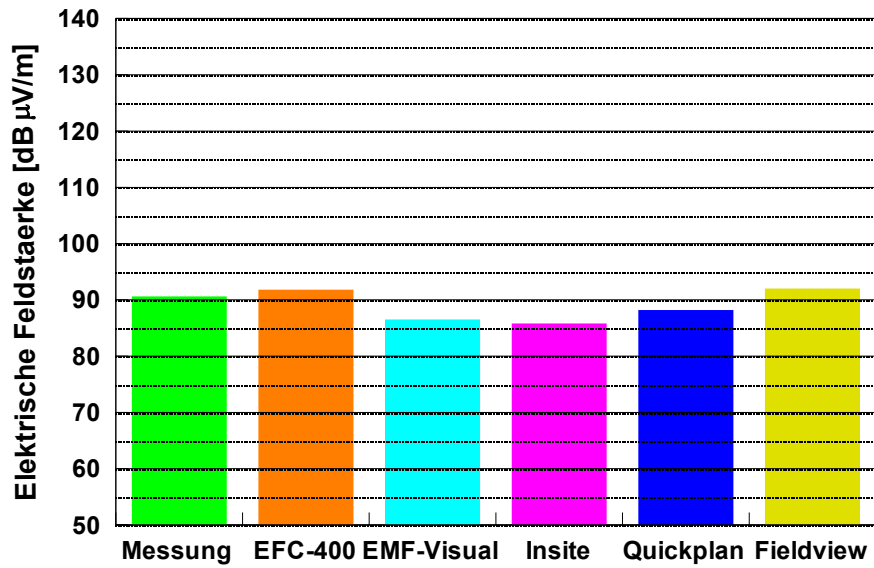


Bild 3.6.48: Vergleich der Simulations- bzw. Messwerte für den Basisstationsstandort Hochstraße 57 (Krefeld) im Vergleichsgebiet, HSR 2 (LoS)

### 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.

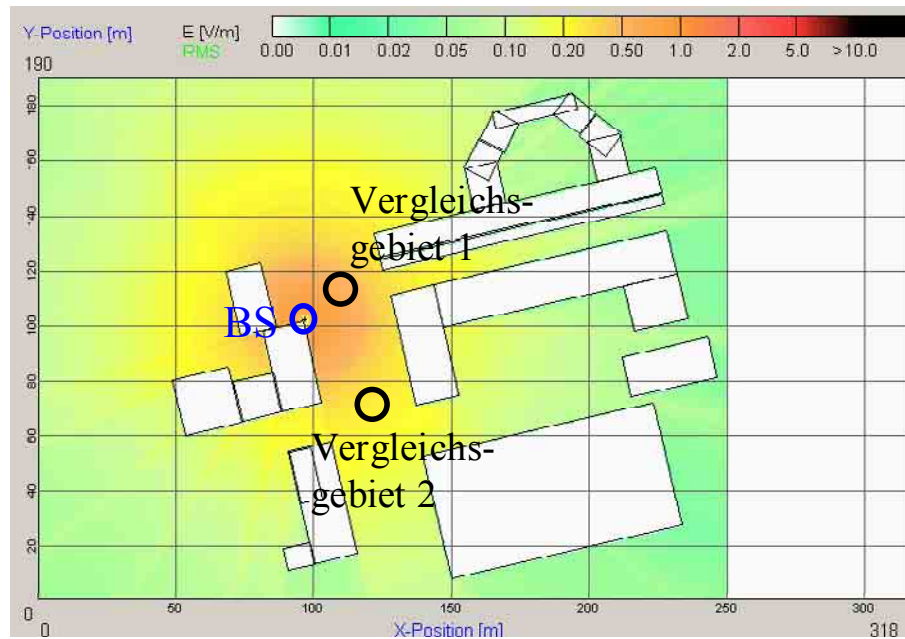


Bild 3.6.50: Simulationsergebnis für das Programm EFC-400, zweidimensional

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

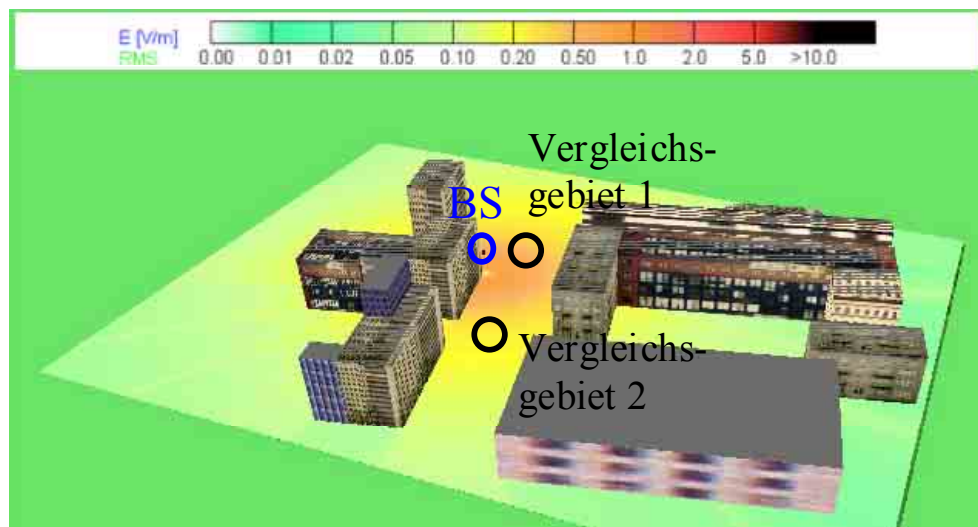


Bild 3.6.51: Simulationsergebnis für das Programm EFC-400, dreidimensional

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.



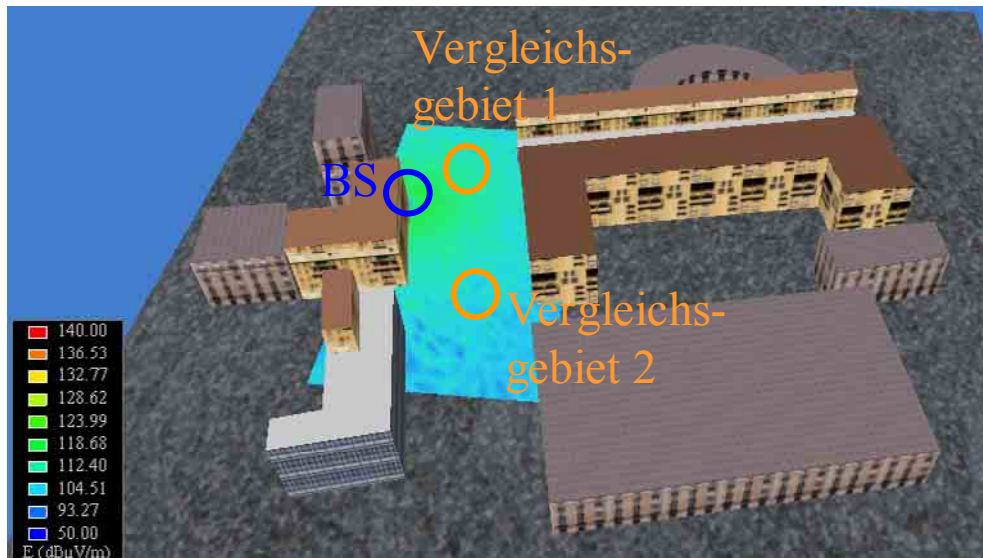


Bild 3.6.52: Simulationsergebnis für das Programm EMF-Visual

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  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  und maximal 140  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  entsprechen.

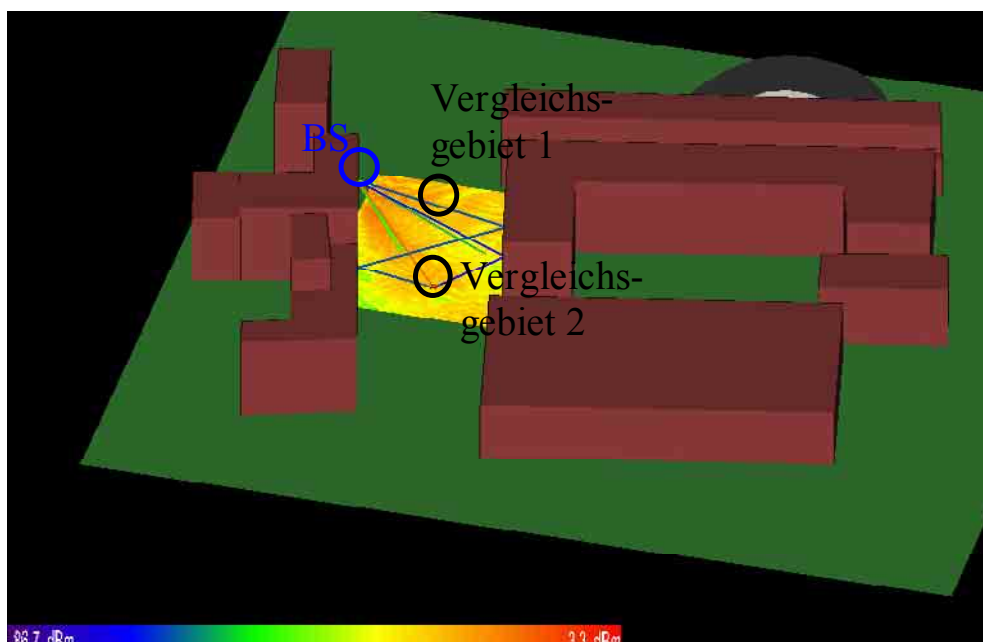


Bild 3.6.53: Simulationsergebnis für das Programm Wireless Insite

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.

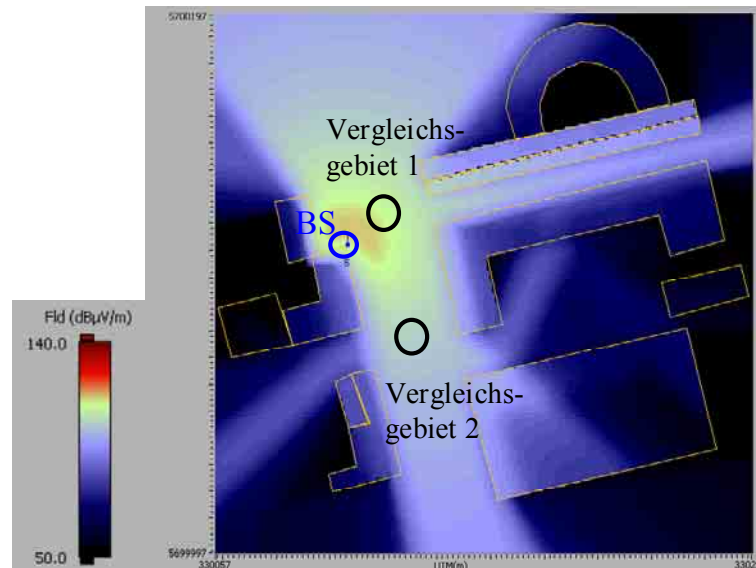


Bild 3.6.54: Simulationsergebnis für das Programm Quickplan, zweidimensional

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.

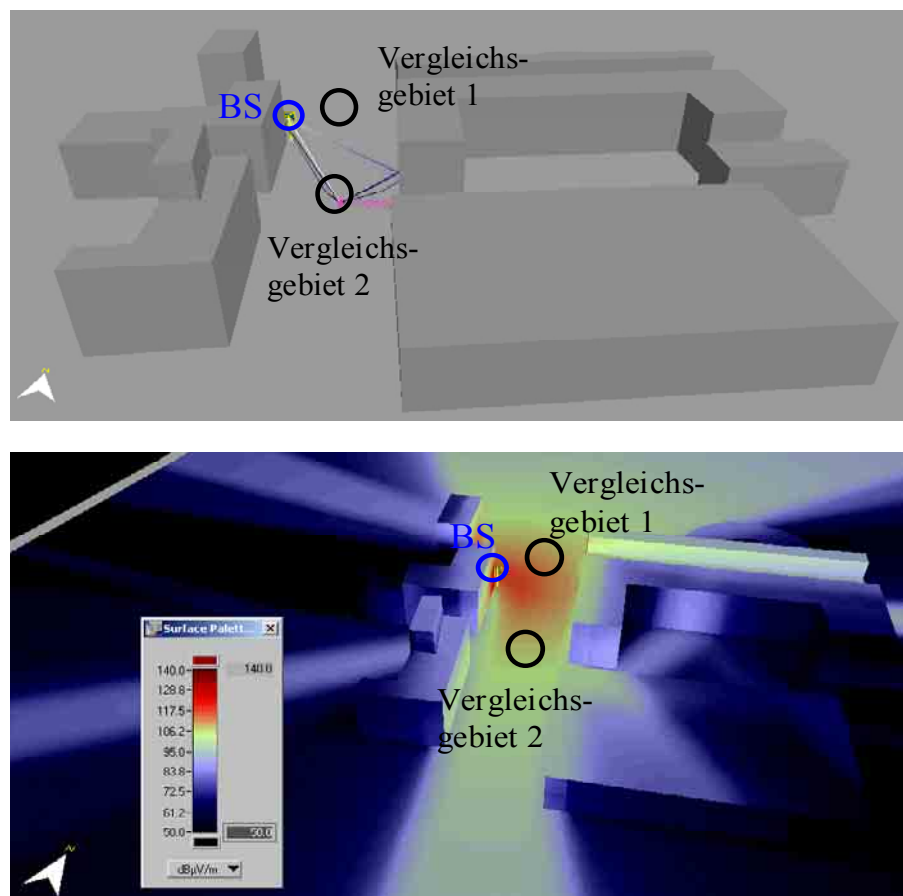


Bild 3.6.55: Simulationsergebnis für das Programm Quickplan, dreidimensional

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, das reine Freiraumausbereitung mit Berücksichtigung der Bodenreflexion beinhaltet.

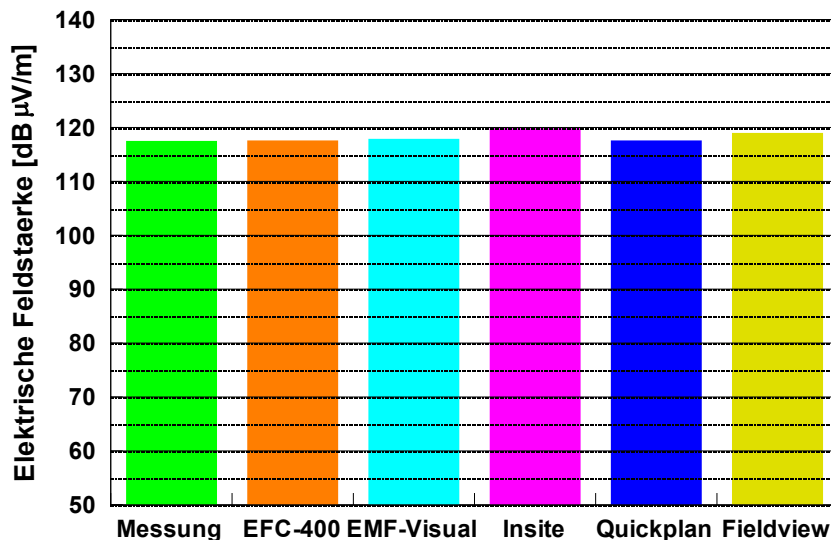


Bild 3.6.56: Vergleich der Simulations- bzw. Messwerte für den Basisstationsstandort Katharinenstraße 12 (Dortmund) im Vergleichsgebiet 1 (LoS)

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).

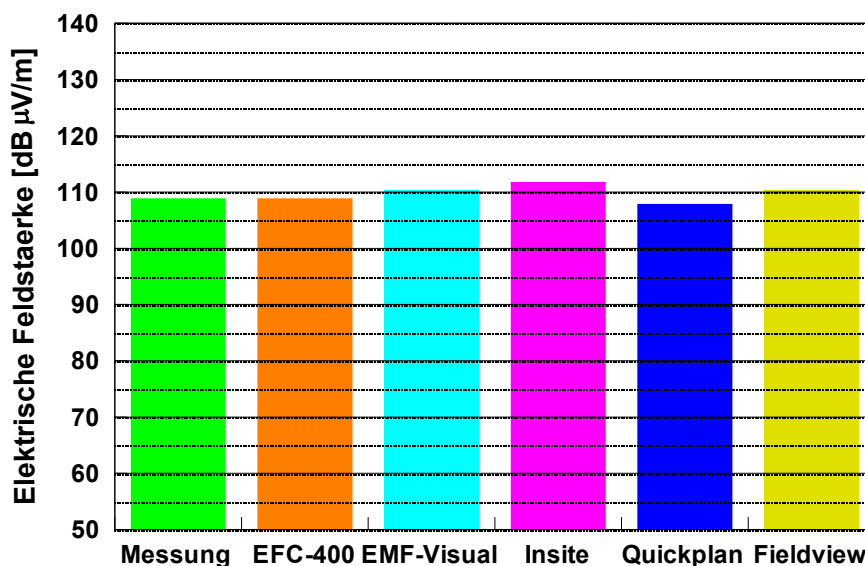


Bild 3.6.57: Vergleich der Simulations- bzw. Messwerte für den Basisstationsstandort Katharinenstraße 12 (Dortmund) im Vergleichsgebiet 2 (LoS)

### 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.

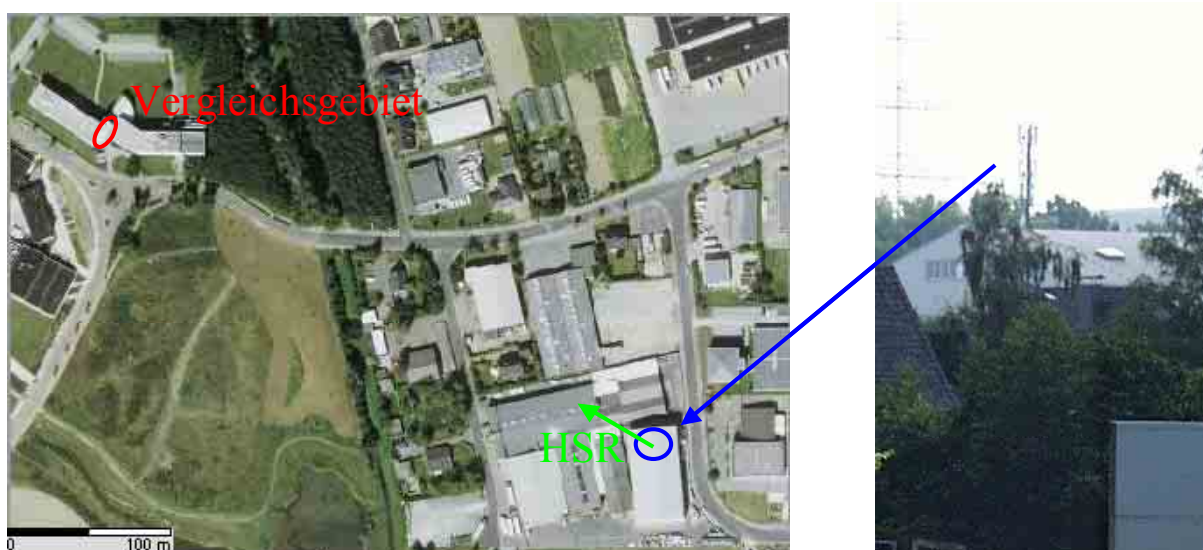


Bild 3.6.58: Mobilfunksendeanlage: Zum Niepmannshof 5, 47475 Kamp-Lintfort

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.

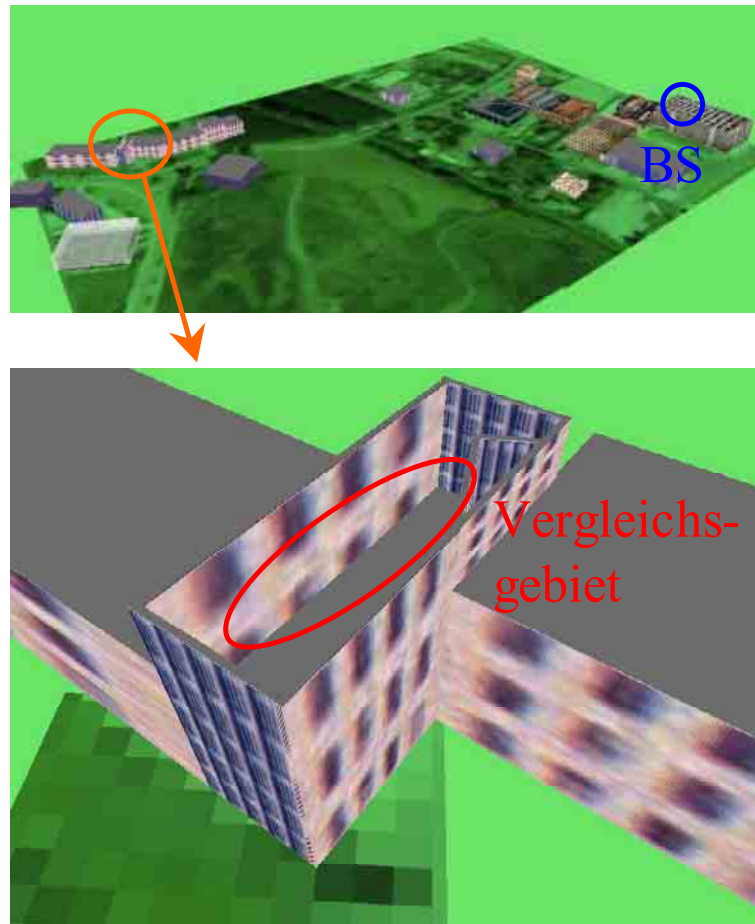


Bild 3.6.59: Modellierte Umgebung mit dem Programm EFC-400

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.

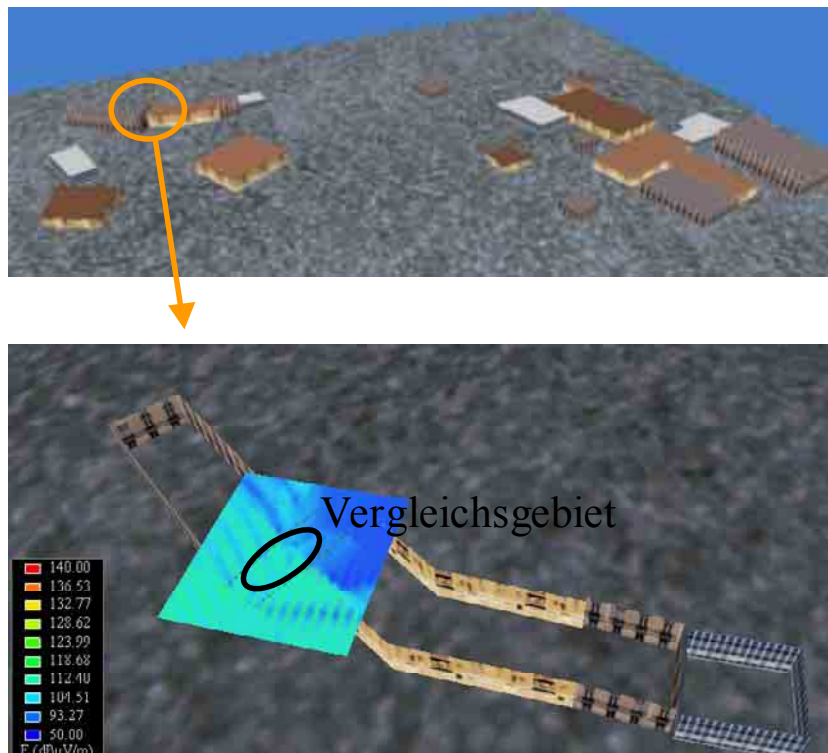


Bild 3.6.61: Modellierung und Simulationsergebnis mit dem Programm EMF-Visual

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 $\mu$ 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.

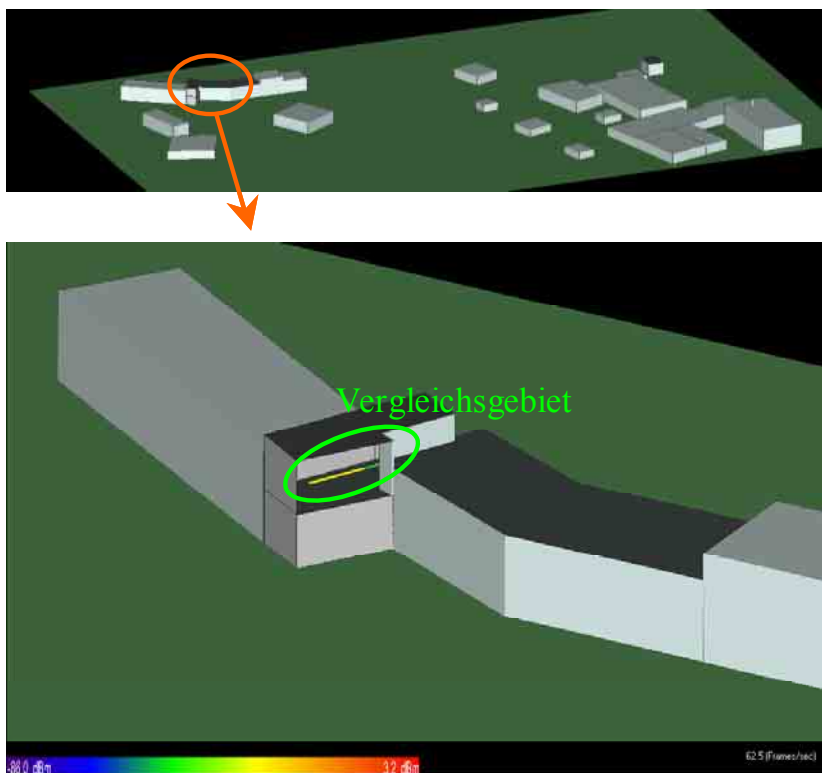


Bild 3.6.62: Modellierung und Simulationsergebnis mit dem Programm Wireless Insite

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.

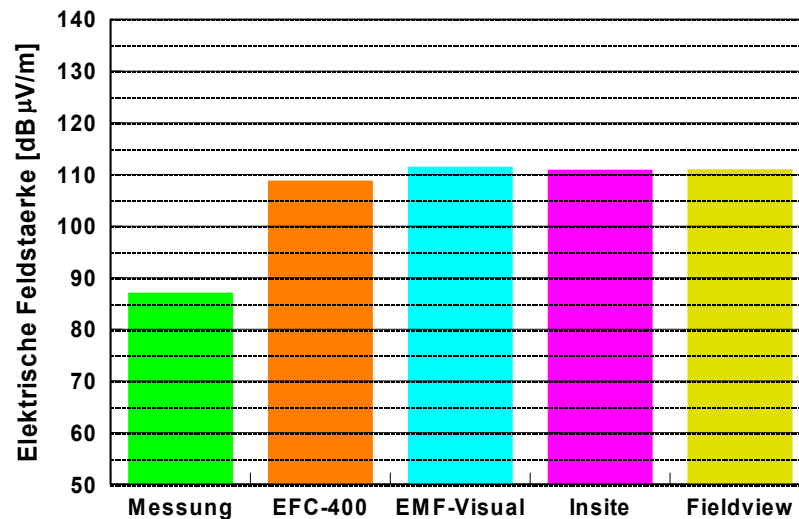


Bild 3.6.63: Vergleich der Simulations- bzw. Messwerte für den Basisstationsstandort Niepmannhof 5 (Kamp-Lintfort) im Vergleichsgebiet (LoS)

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.

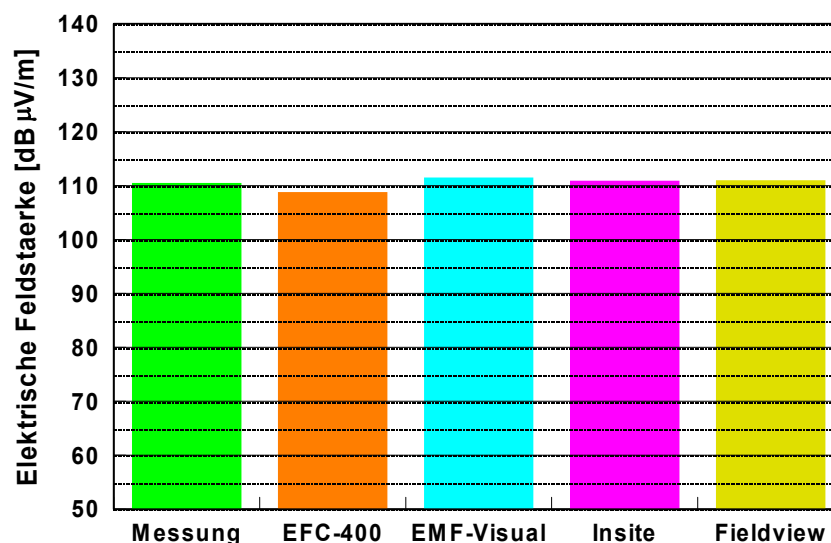


Bild 3.6.64: Vergleich der Simulations- bzw. Messwerte für den Basisstationsstandort Niepmannhof 5 (Kamp-Lintfort) im Vergleichsgebiet (LoS)



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.

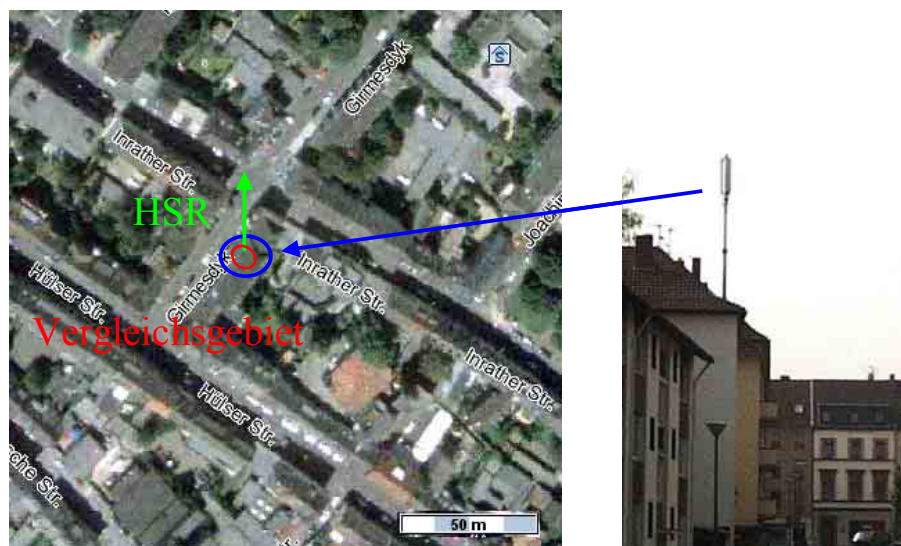


Bild 3.6.65: Mobilfunksendeanlage: Inrather Straße 146, 47803 Krefeld

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.

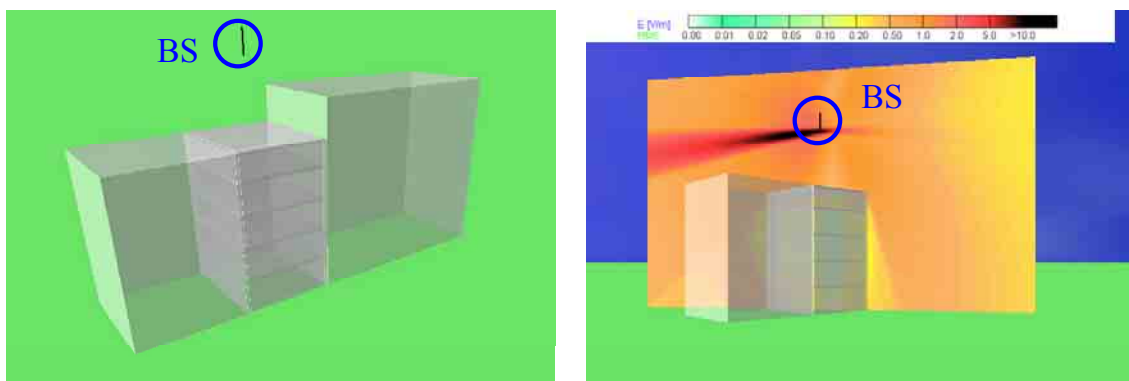


Bild 3.6.66: Modellierungsumgebung und Simulationsergebnis EFC-400

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 weggelassen. 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.

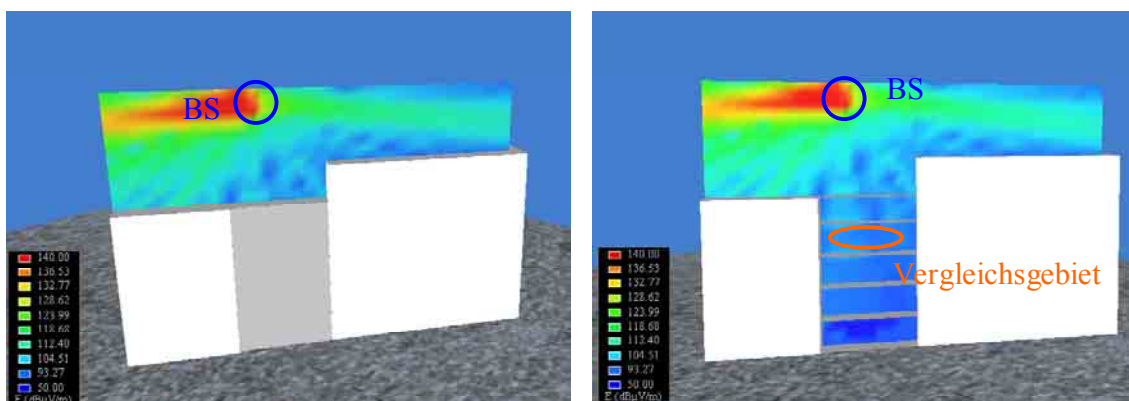


Bild 3.6.67: Modellierung und Simulationsergebnis mit dem Programm EMF-Visual

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.

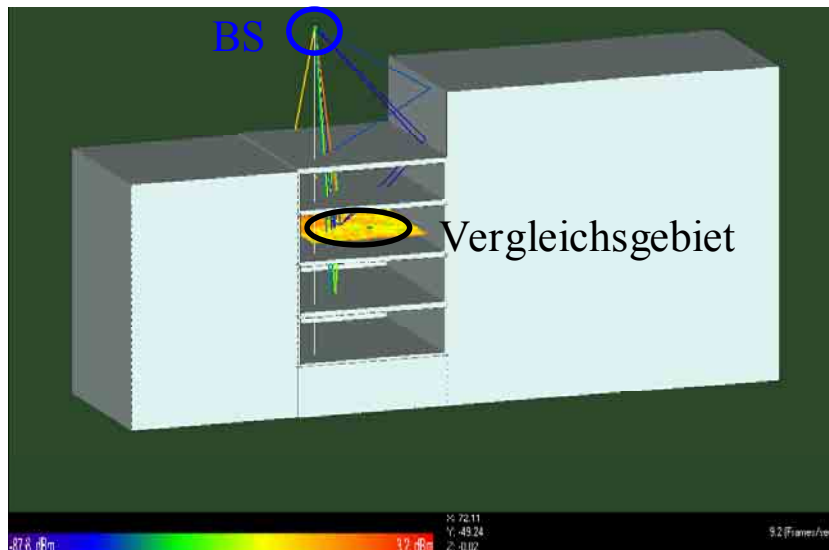


Bild 3.6.68: Modellierung und Simulationsergebnis mit dem Programm Wireless Insite

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.

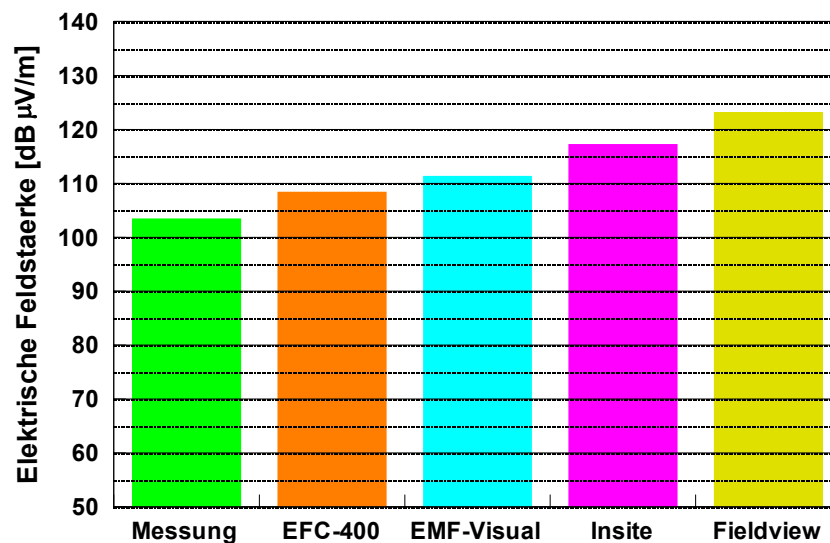


Bild 3.6.69: Vergleich der Simulations- bzw. Messwerte für den Basisstationsstandort Inrather Straße 146 (Krefeld) im Vergleichsgebiet (nLoS)

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.

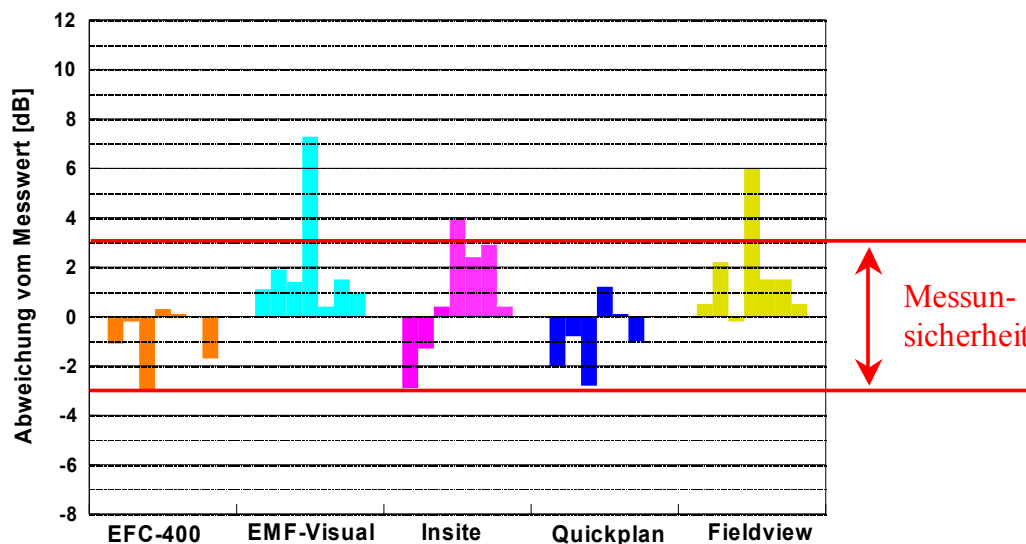


Bild 3.6.70: Abweichung der Simulationsergebnisse vom Messwert bei direkter Sicht zur Sendeanlage (LoS)

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.

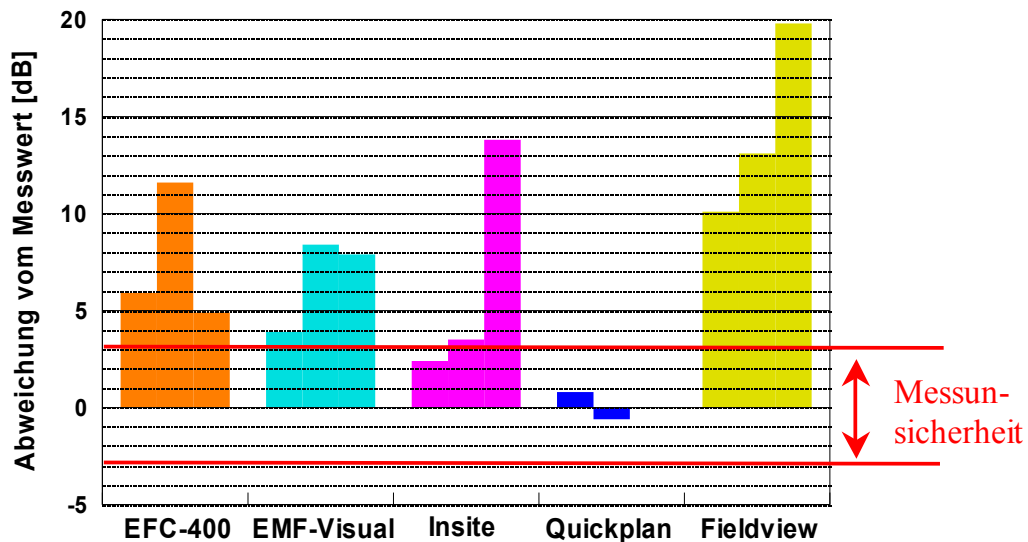


Bild 3.6.71: Abweichung der Simulationsergebnisse vom Messwert bei nicht direkter Sicht zur Sendeanlage (non LoS)

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.

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

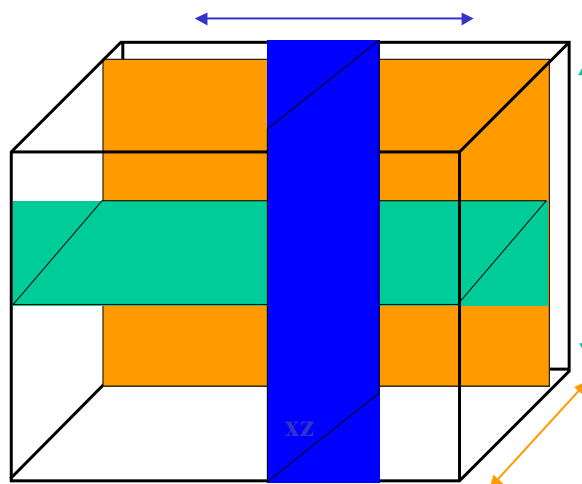


Bild 3.7.1: Die drei verschiedenen Simulationsebenen in EFC-400.

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.

<b>Softwarepaket</b>	<b>Einarbeitungszeit</b>	<b>Zeit für typischen Basisstationsstandort</b>
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

	<b>EFC - 400 (Version 5.04)</b>	<b>EMF-Visual (Version 2.1)</b>	<b>Wireless Insite (Version 1.4.4)</b>	<b>Quickplan (Version 1.3.6)</b>
<b>Grenzwertüberprüfung</b>	-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
<b>Frequenzbereiche</b>				
GSM 900	0	0	0	0
GSM 1800	0	0	0	0
UMTS	0	0	0	-
<b>Entfernungsbereich</b>				
Nahfeld	0	0	-	0
Fernfeld (mindestens bis 200 m)	0	0	0	0
<b>Anwendungsbereich</b>				
Ländliche Gebiete	0	0	0	0
Vor – und Innenstädte	0	0	0	0
Inhaus	0	0	0	-
<b>Systematische Fehler vom Programm</b>	-Keine Beugungs- und Streueffekte - Nur Modellierung von Häusern mit rechteckigem Grundriss	-Fernfelddiagramm differiert von Herstellerdaten (Nur EIN Betriebszustand simulierbar (siehe Abschnitt 3.4))		
<b>Bedienungsfreundlichkeit</b>	Grundsätzliche Kenntnisse notwendig	Grundsätzliche Kenntnisse notwendig	Grundsätzliche Kenntnisse notwendig	Grundsätzliche Kenntnisse notwendig (auch für erdbezogene Koordinatensysteme)
<b>Eingabedaten:</b>				
Höhendaten	0	-	0	0
Gebäudedaten	0	0	0	+
Antennendiagramm (Import MSI-Format)	+	-	-	+
Materialdaten	0	+	+	0
<b>Erforderliche Rechenleistung und Speicherbedarf</b>	-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)
<b>Minimal mögliche Auflösung</b>	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 km<sup>2</sup> herangezogen. Zur Vereinfachung wird ferner angenommen, dass sich auf einem Areal von

1 km<sup>2</sup> 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 km<sup>2</sup> 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](http://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](http://www.antennessa.com)
- [EMP 04] Internetseite der Software Empire: [www.empire.de](http://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](http://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](http://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](http://www.narda-sts.de/en/produktliteratur/fachartikel.htm)
- [KRA 03] **A. Kramer, N. Nikoloski und N. Kuster**, *Analysis of Indoor RF-Field Distribution*, 15<sup>th</sup>. Intl. Zurich Symposium and Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility, Zürich, Supplement S. 305-306, (Februar 2003).
- [KVR] Internetseite des Kommunalverbands Ruhrgebiet – [www.kvr.de](http://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*, 15<sup>th</sup>. 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*, 15<sup>th</sup>. 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](http://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](http://emf.regtp.de).**
- [REGTP 03] **Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post, Reg TP MV 09/EMF/3 Messvorschrift für bundesweite EMVU-Messreihen der vorhandenen Umgebungsfeldstärken, 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](http://www.rohde-schwarz.com).**
- [RS 04-2] **Portables System für EMVU-Messungen R&S TS-EMF, Datenblatt Ausgabe 0203, [www.rohde-schwarz.com](http://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](http://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 <sup>1)</sup>	100-300 <sup>2)</sup>	Peak oder RMS	100 <sup>3)</sup>
GSM-R	921	960	100-300 <sup>1)</sup>	100-300 <sup>2)</sup>	Peak oder RMS	100 <sup>3)</sup>
GSM 1800	1805	1880	100-300 <sup>1)</sup>	100-300 <sup>2)</sup>	Peak oder RMS	100 <sup>3)</sup>

Tabelle 4.1 Empfohlene Einstellungen für die Messparameter bei frequenzselektive Messungen

- <sup>1)</sup> 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.
- <sup>2)</sup> Die VBW ist gleich oder größer der RBW zu wählen.
- <sup>3)</sup> 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 <sup>2</sup> ,
E	für Grenzwertaussage benötigte elektrische Feldstärke in V/m,
Z <sub>F0</sub>	Freiraumwellenwiderstand,
G <sub>i</sub>	isotroper Gewinn der Empfangsantenne, ohne Einheit,
f	Frequenz des mit der Antenne gemessenen Feldes in Hz,
c <sub>0</sub>	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum, c <sub>0</sub> ≈ 3·10 <sup>8</sup> 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					
<b>Erweiterte Messunsicherheit (k=2)</b>					

Tabelle 6.1 Aufstellung des Messunsicherheitsbudgets

- Endergebnis: Das Ergebnis der Messung ist kurz und prägnant darzulegen.