



---

# **Elektromagnetische Felder in NRW**

**Untersuchung der Immissionen  
durch Mobilfunk Basisstationen**

**Abschlussbericht**

**"Untersuchung der Immissionen  
durch Mobilfunk Basisstationen"**

**erstellt für das**

**Ministerium für Umwelt und Naturschutz,  
Landwirtschaft und Verbraucherschutz  
des Landes Nordrhein-Westfalen**

29. August 2002

**Institut für Mobil- und Satellitenfunktechnik GmbH**

Carl-Friedrich-Gauß-Str. 2

47475 Kamp-Lintfort

## **Projektleitung beim Auftragnehmer**

Dr. Christian Bornkessel  
Institut für Mobil- und Satellitenfunktechnik (IMST) GmbH  
Abteilung Antennen & EMVU  
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  
Michael Neikes, IMST GmbH  
Annette Schramm, IMST GmbH

## **Projektleitung beim Auftraggeber**

Dr. Elke Stöcker-Meier  
Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz  
des Landes Nordrhein-Westfalen  
Schwannstraße 3  
40476 Düsseldorf  
Tel: 0211/4566-710  
Fax: 0211/4566-388  
E-Mail: elke.stoecker-meier@munlv.nrw.de

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>5</b>
1.1	Einordnung in den Gesamtzusammenhang.....	5
1.2	Gegenstand des vorliegenden Abschlussberichtes .....	6
1.3	Besonderheiten des Projektes .....	7
<b>2</b>	<b>Gliederung des Berichtes</b> .....	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>Charakterisierung der Immission durch Mobilfunk Sendeanlagen</b> .....	<b>8</b>
3.1	Einleitung.....	8
3.2	Theoretische Abschätzung der zu erwartenden Immissionen .....	9
3.2.1	<i>Untersuchte Einflussfaktoren und Rechenmodell</i> .....	9
3.2.2	<i>Daten der verwendeten Antennen</i> .....	11
3.2.3	<i>Berechnung der Immission in der Sektormitte</i> .....	13
3.2.3.1	Prinzipieller Verlauf der ortsbezogenen Immission.....	13
3.2.3.2	Untersuchung des Einflussfaktors Sendeleistung .....	14
3.2.3.3	Untersuchung des Einflussfaktors Höhenunterschied.....	15
3.2.3.4	Untersuchung des Einflussfaktors Downtilt der Sendeantenne .....	16
3.2.3.5	Untersuchung des Einflussfaktors Sendeantenne.....	20
3.2.3.6	Untersuchung des Einflussfaktors horizontale Ausrichtung der Sendeantennen bzw. horizontale Ausrichtung des Immissionsortes zu den Sendeantennen .....	22
3.2.3.7	Untersuchung des Einflussfaktors Sichtbarkeit zur Sendeanlage .....	23
3.2.4	<i>Zusammenfassung</i> .....	23
<b>3.3</b>	<b>Messtechnisch ermittelte Daten</b> .....	<b>24</b>
3.3.1	<i>Ergebnisse der Messungen in den Kommunen</i> .....	24
3.3.1.1	Dokumentation der Messergebnisse .....	24
3.3.1.2	Auswertung der Messergebnisse.....	31
3.3.1.3	Vergleich der Mobilfunkimmissionen zu Immissionen durch andere HF-Quellen	33
3.3.1.4	Immissionen durch Schnurlostelefone nach dem DECT Standard .....	34
3.3.2	<i>Spezialfall: Freistehende Anlage</i> .....	35
3.3.3	<i>Spezialfall: Wohnung</i> .....	38
3.3.4	<i>Langzeitmessung</i> .....	41
3.3.4.1	Hintergrund der Langzeitmessung .....	41
3.3.4.2	Durchführung der Messung.....	41

3.3.4.3	Messergebnis und Auswertung .....	42
3.3.4.4	Kontinuierliches Feldstärkemonitoring.....	43
3.3.5	<b>Zusammenfassung</b> .....	44
<b>4</b>	<b>Typisierbarkeit</b> .....	<b>46</b>
4.1	Hintergrund der Typisierung .....	46
4.2	Herangehensweise .....	47
4.3	Vorstellung der ausgewählten Typen und Erklärung.....	48
4.4	Auswertung der Ergebnisse .....	52
4.5	Kriterien zur Immissionsabschätzung und -minimierung .....	60
4.6	Zusammenfassung.....	63
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>64</b>
	<b>Danksagung</b> .....	<b>67</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>68</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>69</b>
	<b>Verzeichnis häufig verwendeter Symbole</b> .....	<b>70</b>
	<b>Anhänge: Messprotokolle</b>	

# 1 Einleitung

## 1.1 Einordnung in den Gesamtzusammenhang

Der vorliegende Abschlussbericht ist Bestandteil der Studie "Elektromagnetische Felder in NRW- Untersuchung der Immissionen durch Mobilfunk Basisstationen".

Gegenstand der Studie ist der Mobilfunk, der in Deutschland in den letzten Jahren weite Verbreitung gefunden hat. Bestehende Netze werden flächendeckend weiter ausgebaut. Neue Netze, wie etwa das UMTS Netz, befinden sich in der Vorbereitung oder bereits im Versuchsstadium.

Nicht zuletzt durch die neue UMTS Technologie und den damit verbundenen Bedarf an etwa 40.000 neuen Basisstationen allein in Deutschland [SCHÜ 01] ist in den letzten Monaten eine breite öffentliche Diskussion entbrannt. Hauptangriffspunkte sind nicht in erster Linie die mobilen Endgeräte (Handys), sondern die Basisstationen. Auslöser und Gegenstand der öffentlichen Auseinandersetzung sind Presseberichte über wissenschaftliche Studien, die von der Wirkung des Mobilfunks auf Lebewesen berichten, sowie konkrete Fälle, in denen ein Zusammenhang zwischen elektromagnetischen Feldern des Mobilfunks und Gesundheitsbeeinträchtigungen vermutet wird. Von einigen Gruppen werden im Sinne der Vorsorge neue, gegenüber den bisherigen Sicherheitswerten verschärfte Grenzwerte zum Schutz der Bevölkerung vor elektromagnetischer Strahlung, wie etwa nach dem Schweizer Modell, gefordert.

Das Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (MUNLV) des Landes Nordrhein-Westfalen sowie das Landesumweltamt (LUA) Nordrhein-Westfalen, die Bezirksregierungen und die Staatlichen Umweltämter als nachgeordnete Behörden sehen sich täglich einer wachsenden Flut von Anfragen besorgter Bürger bezüglich der Immissionen von nahegelegenen Mobilfunk Basisstationen ausgesetzt. Hier besteht seitens der Behörden wie auch der betroffenen Bürger ein großer Bedarf an einer Abschätzung zu erwartender typischer Immissionswerte im allgemeinen und einer konkreten *messtechnischen* Ermittlung der Immission an als besonders kritisch eingestuften Örtlichkeiten, wie z.B. innerhalb von Wohnungen, Schulen, Kindergärten, Krankenhäusern usw. im besonderen.

Das MUNLV hat deswegen beim Institut für Mobil- und Satellitenfunktechnik (IMST GmbH) eine Studie beauftragt, die auf *systematische* Art und Weise die von Mobilfunk Basisstationen hervorgerufene Immissionen generell sowie an den o.g. Einwirkungsorten konkret untersuchen soll.

Im Sinne dieser Studie wird unter *Immission* der *empfängerseitige* elektromagnetische Strahlungspegel verstanden, wohingegen die *Emission* die *senderseitige* Abstrahlung beschreibt.

In der Studie werden vier Arbeitspakete (AP) bearbeitet: Innerhalb von *AP 1* trifft sich regelmäßig ein Arbeitskreis unter Beteiligung der Kommunen. Hier findet ein Erfahrungsaustausch der Kommunen bei der Auseinandersetzung mit Bürgern und Netzbetreibern bezüglich Mobilfunkstandorten statt. Außerdem werden die Ergebnisse der Studie dargestellt und diskutiert sowie Messpunkte für Vorortmessungen der Immission nach *AP 2* und *AP 3* vereinbart. Innerhalb von *AP 2* wird die *Gesamtmission* unter Berücksichtigung der Mobilfunkimmissionen *an fixen Messpunkten* gemessen, wohingegen in *AP 3* eine systematische messtechnische Untersuchung der *Mobilfunkimmissionen in der Umgebung von Mobilfunk Basisstationen* im Mittelpunkt steht. Eine wichtige Frage ist hierbei, inwieweit es möglich ist, aus den Gesamt-

ergebnissen der Messungen für eine vereinfachte Betrachtung Typklassen zu bilden sowie Kriterien zu erarbeiten, mit denen Kommunen im Rahmen des Netzausbaus die zu erwartenden Immissionen abschätzen sowie eine Immissionsminimierung erreichen können. *AP 4* beschäftigt sich mit den Auswirkungen eine Veränderung der Grenzwerte auf die Größe der Gesamtimmission.

## **1.2 Gegenstand des vorliegenden Abschlussberichtes**

Der vorliegende Abschlussbericht bezieht sich auf die Arbeitspakete 2 und 3 der Studie, d.h. es werden die messtechnisch erfassten *Gesamtimmissionen* an fixen Messpunkten, sowie die *Mobilfunkimmissionen* in der Umgebung von Basisstationen vorgestellt und ausgewertet. Die Beschreibung der Messtechnik an sich ist nicht Gegenstand vorliegenden Berichtes; sie erfolgt ausführlich in [EMF 2].

Zur Charakterisierung der Mobilfunkimmissionen wird in zwei Schritten vorgegangen:

Zum einen werden einfache Berechnungen der Immissionssituation in der Nähe der Anlagen präsentiert. Hieraus können sehr anschaulich grundlegende Einflussfaktoren, die in die Größe der *ortsbezogenen Immission* eingehen, d.h. der Immission an einem festen Betrachtungspunkt, studiert werden. Zum anderen wurden in der ersten Hälfte des Jahre 2002 umfangreiche Messungen der Mobilfunkimmissionen in der direkten Nähe von Anlagen in mehreren Kommunen durchgeführt. Am Messprogramm waren die Kommunen

- Aachen,
- Bielefeld,
- Bonn,
- Dortmund,
- Düsseldorf,
- Krefeld,
- Münster,
- Oberhausen,
- Siegen und
- Wuppertal

beteiligt. Die bei diesen Messungen erzielten Ergebnisse werden dahingehend ausgewertet, in wie weit sich die bei der Berechnung abgeleiteten Einflussparameter und Trends in der tatsächlichen Immissionssituation wiederfinden lassen.

Zusätzlich werden insbesondere die Immissionen im Umfeld einer freistehenden Anlage sowie die Besonderheiten einer Immissionsverteilung innerhalb einer Wohnung diskutiert. Außerdem werden die Ergebnisse einer Langzeitmessung vorgestellt.

Weiterhin werden die gemessenen Mobilfunkimmissionen mit anderen hochfrequenten Immissionen verglichen, die an identischen Messpunkten ermittelt wurden. Gerade diese Aufgabenstellung liefert interessante Aussagen bezüglich einer Relation der Mobilfunkimmissionen zu denjenigen hochfrequenten Immissionen, denen die Bevölkerung auch ohne Vorhandensein der Mobilfunkanlagen ausgesetzt ist.

Ein weiterer Schwerpunkt des Berichtes bildet die Frage nach einer *Typisierbarkeit* der Mobilfunkanlagen. Es wird untersucht, inwieweit sich Mobilfunkanlagen in bestimmte Anlagenklassen zusammenfassen lassen. Ziel hierbei ist es, eine Klassifizierung nach bestimmten Kategorien dergestalt vorzunehmen, dass eine Übertragbarkeit von typischen Immissionen im Umkreis der Anlage auf andere Anlagen des selben Typs ermöglicht wird. Sofern diese Möglichkeit besteht, würde eine solche Anlagenklassifizierung im Hinblick auf ein Immissionskatasters zu einer deutlichen Vereinfachung der Betrachtung führen. Außerdem könnte hiermit den Kommunen eine Möglichkeit an die Hand gegeben werden, schon bei der Planungsvorlage durch die Netzbetreiber auf einfache Art und Weise Abschätzungen über die spätere Immissionssituation vornehmen zu können. Hierzu wird die Vielfalt der vorhandenen Mobilfunkanlagen in einige wenige Klassen untergliedert und Typen definiert. Neben senderseitigen Parametern geht auch der Immissionsort ein. Nachfolgend werden die umfangreichen Messergebnisse in den Kommunen mit den gebildeten Typen korreliert und auf Übereinstimmungen ausgewertet. Es erfolgt eine abschließende Aussage, inwieweit eine Typbildung möglich ist.

Darüber hinaus werden allgemeine Kriterien für eine Vorabschätzung und Minimierung der zu erwartenden Immissionen abgeleitet.

### **1.3 Besonderheiten des Projektes**

Vorliegendes Projekt weist eine Reihe von Besonderheiten aus, die es von anderen Arbeiten auf diesem Gebiet unterscheiden. Insbesondere sind dies:

1. Im Gegensatz zu vielen Einzelmessungen auf diesem Gebiet, die sich vorrangig an der Frage orientieren, welche Immissionen in eine Wohnung oder an einem sensibler Ort vorliegen und diese Immissionen in Relation zu Grenzwerten setzen, ist die Grundintention vorliegenden Projektes anders: Hier wird eine *systematische* Untersuchung der Immissionssituation im Umfeld verschiedener Basisstationen durchgeführt. Zwar wurden die einzelnen Messpunkte bei vorliegender Studie auch nach Aspekten konkreter Brennpunkte vor Ort gewählt, jedoch ist eine solche Vielfalt von unterschiedlichen Anlagen und Messpunkten gewährleistet, so dass nicht nur singuläre Aussagen, sondern umfassende Aussagen zur Immissionssituation möglich sind.
2. Durch eine Vielzahl von untersuchten Anlagen, einer durchgeführten Einteilung der Anlagen in Anlagenklassen und einer entsprechenden Auswahl der Messpunkte können bei der Auswertung der Messergebnisse Aussagen bezüglich einer *Typisierbarkeit* der Anlagen getroffen werden.
3. Die Messungen werden *rechentechnisch begleitet*, d.h. schon vor Beginn der Messungen wurden Untersuchungen bezüglich der Einflussfaktoren durchgeführt, die Auswirkungen auf die konkret vorliegende Immissionssituation vor Ort haben. Rechentechnisch ermittelte prinzipielle Verläufe der ortsbezogenen Immission in Abhängigkeit der einzelnen Einflussfaktoren zeigen interessante Trends auf, die messtechnisch überprüft werden.
4. Durch die parallele Angabe der Immissionsbeiträge durch
  - die Mobilfunkanlage vor Ort (Hauptsendeanlage),

- die umliegenden Mobilfunkanlagen gleicher und anderer Netzbetreiber (Nebensendeanlagen) und
- andere hochfrequente Quellen (Rundfunksender, Fernsehsender usw.)

wird ein Vergleich der Immissionen durch verschiedene Quellen ermöglicht.

6. Die Messorte befanden sich primär *nicht im Freien*, so wie bei vielen anderen Messprojekten üblich. Die Untersuchungen konzentrierten sich vielmehr auf diejenigen Orte, bei denen aus theoretischer Sicht durch Lage und Ausrichtung zur Sendeanlage mit den maximalen Immissionen im Umfeld der Anlage zu rechnen war. Außerdem wurden oftmals diejenigen Orte gewählt, wo seitens der Bevölkerung das Interesse an einer messtechnischen Erfassung der Immissionen am größten war. Das heißt, dass die Messungen primär im *Innenbereich von Gebäuden*, d.h. innerhalb von *Wohnungen*, Schulen oder Kindergärten / Kindertagesstätten, durchgeführt wurden.

## 2 Gliederung des Berichtes

Der erste Teil des Berichtes befasst sich mit der Charakterisierung der Immission durch Mobilfunkanlagen. Hierbei werden zunächst verschiedene Einflussfaktoren untersucht und die Größe von zu erwartenden Immissionen rechentechnisch abgeschätzt. Anschließend werden die Ergebnisse der Messungen vorgestellt, statistisch ausgewertet und mit den Grenzwerten verglichen. Es erfolgt eine Gegenüberstellung der Immissionen durch Mobilfunk zu den Immissionen durch andere hochfrequenztechnische Quellen an ausgewählten Messpunkten.

Als Spezialfälle werden die "Freistehende Anlage" und "Wohnung" diskutiert sowie eine 24-Stunden Messung präsentiert.

Der zweite Teil des Berichtes befasst sich mit der Typisierbarkeit. Hier wird eine mögliche Typauswahl zunächst theoretisch herausgearbeitet und begründet. Danach werden die messtechnisch ermittelten Ergebnisse dahingehend ausgewertet, ob die gewählte Typauswahl sinnvoll ist und eine vereinfachte Betrachtung im Sinne eines Kriterienkataloges möglich ist.

Die ausführlichen Messprotokolle der Einzelmessungen sind der Übersichtlichkeit und Vertraulichkeit halber nicht im Hauptbericht, sondern im Anhang enthalten. Somit können sie separat vom Bericht behandelt und herausgegeben werden. Im Bericht selber erfolgt schwerpunktmäßig die *Auflistung und Auswertung* der Messergebnisse.

## 3 Charakterisierung der Immission durch Mobilfunk Sendeanlagen

### 3.1 Einleitung

In diesem Kapitel werden die Immissionen durch Mobilfunkanlagen eingehend untersucht. Vor einer Auswertung der messtechnisch erfassten Immissionen in Kapitel 3.3 soll in Kapitel 3.2 zunächst erarbeitet werden, welche *prinzipiellen* Einflussfaktoren in die Verteilung der ortsbezogenen Immissionen eingehen und wie groß typische Immissionen sind. Diese grundsätzlichen Untersuchungen sind zwar bereits prinzipiell im Abschlussbericht zum Arbeitspaket 4 "Einfluss von Grenzwertverschärfungen auf die Gesamtmission" vorliegenden Ge-



samtprojektes präsentiert worden [EMF 1], allerdings mit der Zielrichtung, inwieweit Grenz- oder Vorsorgewerte durch typische Anlagenkonfigurationen erreicht oder überschritten werden können. Diese Untersuchungen sind für die nachfolgenden Betrachtungen und Auswertungen vorliegenden Berichtes jedoch so eminent wichtig, dass es auch im Sinne einer besseren Lesbarkeit bzw. einer geschlossenen Darstellung dieses Berichtes für notwendig erachtet wird, die Ausführungen in modifizierter Form hier wiederzugeben. Hierdurch wird die Basis für die spätere Typbildung geschaffen, die dann mit Hilfe der Messergebnisse überprüft wird.

## **3.2 Theoretische Abschätzung der zu erwartenden Immissionen**

### **3.2.1 Untersuchte Einflussfaktoren und Rechenmodell**

Es ist leicht einsichtig, dass die Immission an einem festen Ort im Umfeld der Sendeanlage (ortsbezogene Immission) vor allem von der *Sendeleistung* der Anlage und vom *Abstand* des Immissionsortes zur Anlage abhängt. Darüber hinaus spielt auch die "*Sichtbarkeit*" der Anlage eine große Rolle, d.h. an Orten, die keine direkte Sicht zur Anlage haben, sondern durch Gebäude, Bäume oder (in Wohnungen) durch eine Außenwand von ihr getrennt sind, werden in der Regel kleinere Immissionen vorliegen als an Orten mit freier Sicht zur Anlage und ähnlichem Abstand. Grund dafür ist die Dämpfung der elektromagnetischen Wellen durch das Sichthindernis.

Ein großer Einflussfaktor sind aber auch die Sendeantennen, die bei Mobilfunkanlagen verwendet werden. Die meist verwendeten Sektorantennen strahlen ihre Energie nicht gleichmäßig in alle Raumrichtungen ab, sondern bevorzugt in einzelne Raumrichtungen. Oft wird die Abstrahlung der Mobilfunkantennen auch mit der Lichtabstrahlung eines Leuchtturms verglichen. Damit steht zu vermuten, dass auch die *Ausrichtung* des Immissionsortes zur Anlage bezüglich Höhe (vertikale Ausrichtung) und Himmelsrichtung (horizontale Ausrichtung) eine Rolle spielt.

Insofern gibt es die folgenden Einflussfaktoren, die entweder nur von der Sendeanlage oder nur vom Empfängerort oder von beiden bestimmt werden:

#### *Einflussfaktoren seitens der Mobilfunkanlage:*

- insgesamt Sendeleistung der Anlage (Anzahl der Netzbetreiber, Anzahl der Kanäle, Sendeleistung pro Kanal),
- Höhe der Sendeanlage über Grund,
- verwendete Antennentypen,
- Downtilt der Antennen,
- horizontale Ausrichtung der Antennen.

#### *Einflussfaktoren seitens des Immissionsortes:*

- (lateraler) Abstand zur Sendeanlage,

- Höhe des Empfängerortes über Grund (bzw. Höhenunterschied zur Sendeanlage),
- horizontale Ausrichtung zur Anlage,
- Vorhandensein von dämpfenden Hindernissen (Sichtbarkeit der Anlage).

Die folgenden Untersuchungen zum detaillierten Einfluss der verschiedenen Faktoren werden rechenstechnisch mit einem einfachen Freiraum Wellenausbreitungsmodell durchgeführt. Dieses hat seine Berechtigung, da

- damit der worst case Fall beschrieben wird, was für die vorgesehenen Untersuchungen angemessen ist, und
- an Orten in unmittelbarer Nähe der Basisstationsantenne, d.h. an denjenigen Orten, in denen die Immission am höchsten ist, wegen meist vorliegender direkter Sichtverbindung zum Sender Freiraumbedingungen angenommen werden können.

Dieses Modell wird auch von der RegTP bei der Bewertung zur Standortbescheinigung eingesetzt.

In Abb. 3.1 ist die Geometrie beschrieben, die den Berechnungen zugrunde liegt.

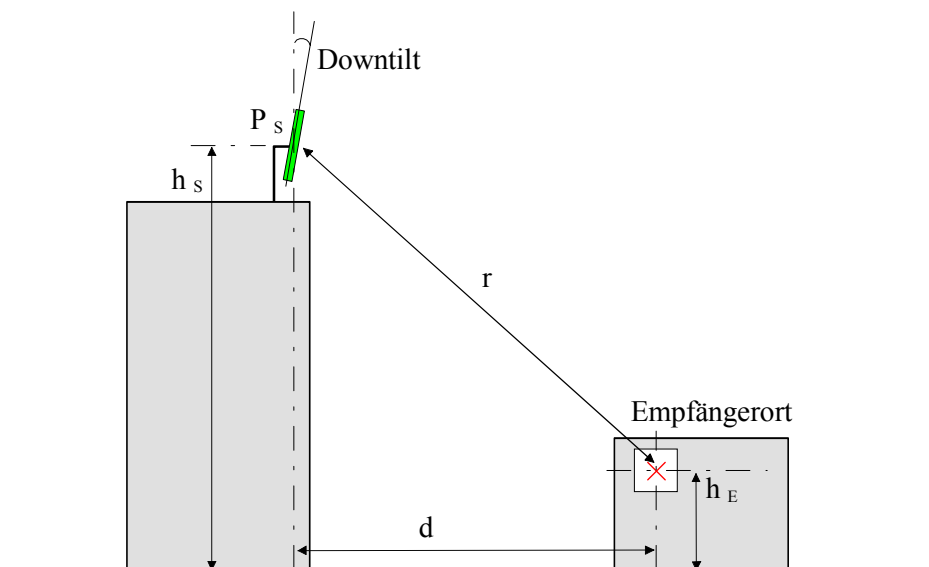


Abb. 3.1 Geometrie für die Berechnungen der Leistungsflussdichte S am Empfängerort

Mit  $h_s$  und  $h_E$  ist die Höhe von Sender- und Empfängerort über dem Boden beschrieben.  $d$  kennzeichnet den lateralen Abstand vom gedachten Fußpunkt der Antenne am Boden,  $r$  den radialen Abstand zwischen Sender und Empfänger. Der Empfängerort kann sich sowohl in einem Gebäude, als auch auf dem Erdboden befinden.

Für eine solche Konfiguration berechnet sich die Leistungsflussdichte  $S$  als

$$S = P_s \cdot G_s \cdot \frac{C^2(\theta, \psi)}{4\pi r^2} \quad (3.1)$$

Der radiale Abstand  $r$  wird bestimmt durch

$$r = \sqrt{d^2 + (h_s - h_E)^2} \quad (3.2)$$

Hierbei ist  $P_S$  die Sendeleistung der Basisstationsantenne,  $G_S$  deren Gewinn und  $C(\theta, \psi)$  die normierte Richtcharakteristik der Antenne (vgl. Abschnitt 3.2.2).

Mobilfunkantennen arbeiten verbreitet mit einem sog. Downtilt. Darunter versteht man eine Abwärtsneigung der Antenne in Richtung Erdboden um wenige Grad. Sinn hierbei ist, dass die Sendeenergie nicht horizontal abgestrahlt werden soll, sondern in Richtung Erdboden. Der Downtilt kann elektrisch (bereits in der Antenne realisiert) oder/und mechanisch (die Antenne wird bei der Installation nach unten gekippt) ausgeführt sein.

### 3.2.2 Daten der verwendeten Antennen

Für Mobilfunk Basisstationsantennen werden verbreitet Sektorantennen verwendet. Diese sind Richtantennen. Das heißt, dass sie ihre Energie nicht (wie z.B. eine Glühlampe) in alle Richtungen gleichmäßig abstrahlen, sondern gerichtet, und zwar

- vertikal (Elevation) in einen sehr schmalen Bereich und
- horizontal (Azimut) in einen etwa z.B.  $120^\circ$  breiten Sektor.

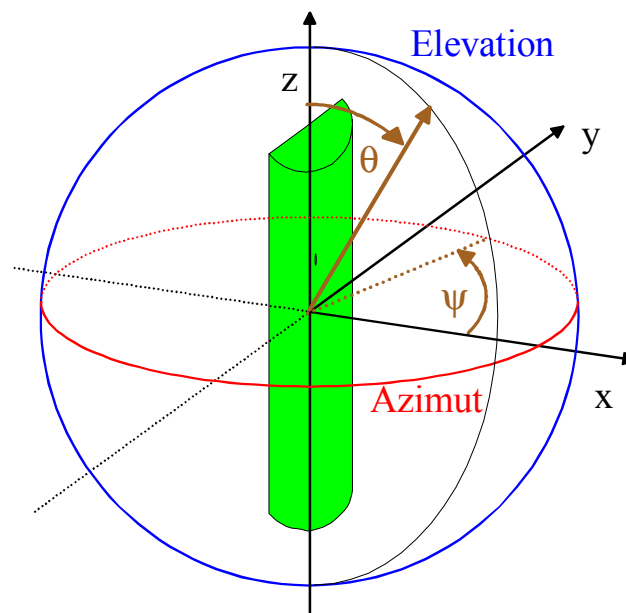


Abb. 3.2 Lage der Antenne im Koordinatensystem für Elevations- und Azimutschnitt

In den Abb. 3.3 und 3.4 ist das Richtdiagramm (zweidimensionale Darstellung der Richtcharakteristik) einer für Mobilfunk typischen Sendeantenne im Elevations- und Azimutschnitt angegeben. Die Lage der Antenne im Koordinatensystem zeigt Abb. 3.2; außerdem ist der Umriss der Antenne in den beiden Diagrammen von Abb. 3.3 und 3.4 angedeutet. Die Hauptstrahlrichtung ist die x-Richtung mit  $\psi = 0^\circ$  und  $\theta = 90^\circ$ .

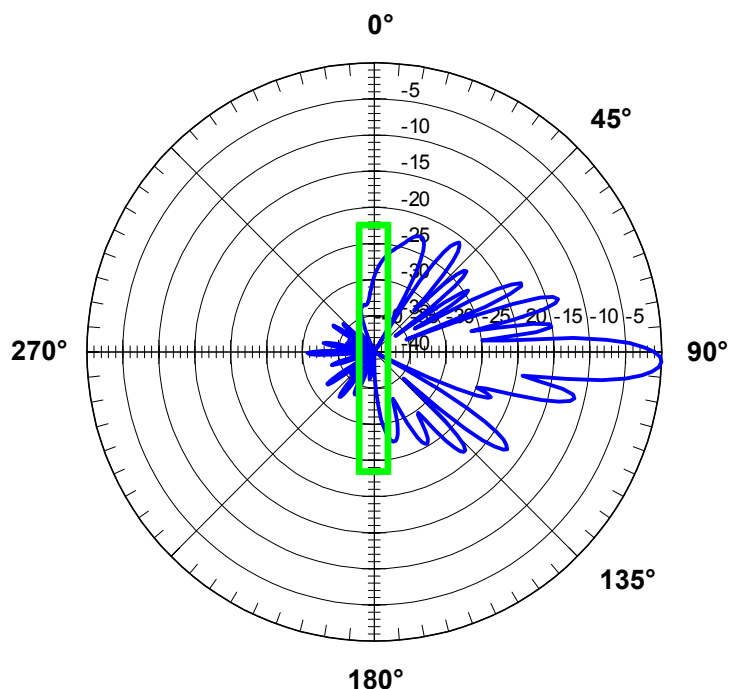


Abb. 3.3 Elevationsdiagramm der verwendeten Antenne K 735 147

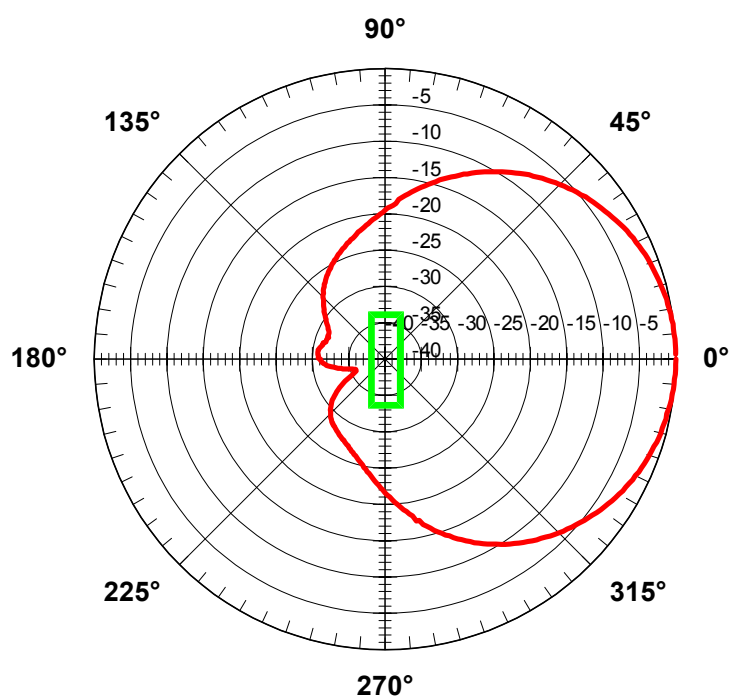


Abb. 3.4 Azimutdiagramm der verwendeten Antenne K 735 147

Elevations- und Azimutschnitt zeigen die relative Intensität der Antennenabstrahlung in den beiden Ebenen. Die Skala ist in logarithmischer Darstellung (dB) (10 dB entsprechen einem Faktor 10, 20 dB einem Faktor 100 und 30 dB einem Faktor 1000 bezüglich der abgestrahlten Leistung). Wie man in Abb. 3.3 sieht, existieren neben der hier nach rechts gerichteten Haupt-

strahlung noch zahlreiche Nebenstrahlungen (Nebenzipfel). Ihre Intensität relativ zur Hauptstrahlung lässt sich direkt an der Skala ablesen. Man beachte hier jedoch wiederum die logarithmische Darstellung, durch die die Nebenzipfel überbetont werden. Trotzdem können die Nebenzipfel, wie der nächste Abschnitt noch zeigen wird, signifikant zur Immission beitragen.

Als Basisstationsantenne wird für die Berechnungen eine Antenne der Fa. Kathrein, Typ K 735 147 verwendet. Die Antenne verfügt über einen Gewinn von 18,0 dBi, eine 3 dB Öffnungsbreite von 7° in der Elevation bzw. 65° im Azimut und einen elektrischen Downtilt von 2°. Dieser Antennentyp ist speziell für den Frequenzbereich von 1710 - 1900 MHz entwickelt und kommt im GSM 1800 Bereich oftmals zum Einsatz. Im GSM 900 Bereich werden u.a. Antennen mit ähnlichen technischen Parametern wie bei der hier vorgestellten eingesetzt. Die Richtdiagramme der Kathrein Antennen liegen auf CD ROM vor.

Aus Gründen der Vereinfachung werden die nachfolgenden Berechnungen der Immission nur in der Mitte des durch eine Basisstationsantenne ausgeleuchteten Sektors, d.h. im Azimut 0° (vgl. Abb. 3.4) durchgeführt. Damit wird wiederum der worst case Fall betrachtet.

Es sei hier der Vollständigkeit halber darauf verwiesen, dass durch Gleichung (3.1) bei der Verwendung des Fernfeld-Gewinns  $G_S$  die Leistungsflussdichte in unmittelbarer Nähe der Antenne (bis einige Meter) zum Teil erheblich überschätzt wird [WIE 01]. Da die solchermaßen ermittelten Leistungsflussdichten aber immer größer bzw. gleich den tatsächlich vorliegenden sind, liegt man mit diesen Berechnungen auf der sicheren Seite.

### 3.2.3 Berechnung der Immission in der Sektormitte

#### 3.2.3.1 Prinzipieller Verlauf der ortsbezogenen Immission

In Abb. 3.5 ist der prinzipielle Verlauf der ortsbezogenen Immission im Abhängigkeit vom lateralen Abstand  $d$  von der Sendeantenne angegeben. Die Darstellung erfolgt in Sektormitte.

Es wird Parametersatz 1 verwendet, der in Tabelle 3.1 zusammengefasst ist.

<b>Parametersatz 1</b>	
Sendeleistung $P_S$	20 W
Höhendifferenz Sender-Empfänger $h_S-h_E$	5 m
Antenne	K 735147
elektrischer Downtilt	2°
mechanischer Downtilt	0°
Wellenausbreitungsmodell	Freiraum

Tabelle 3.1 Beschreibung der Parameter für Parametersatz 1

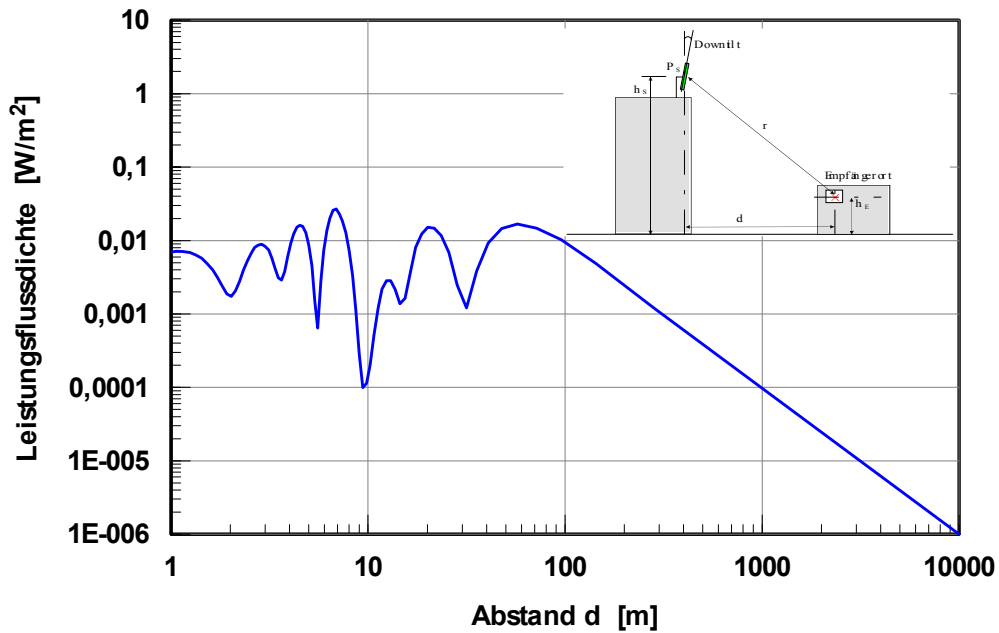


Abb. 3.5 Verlauf der Leistungsfussdichte in Abhängigkeit vom lateralen Abstand, Parametersatz 1

Abb. 3.5 kann wie folgt interpretiert werden: Bei kleinem lateralem Abstand  $d$  befindet man sich nahezu direkt unter der Antenne. Nach Abb. 3.3, Wertebereich  $180^\circ$  bis etwa  $100^\circ$ , ist man noch nicht im Hauptstrahl der Antenne, sondern im Bereich der Nebenzipfel. Diese sind zwar von der Intensität nicht so hoch wie der Hauptstrahl, dafür ist der radiale Abstand von der Antenne relativ gering. Bewegt man sich von der Antenne weg (steigender lateraler Abstand  $d$ ), durchläuft man in Abb. 3.3 von  $180^\circ$  in Richtung  $90^\circ$  alle Nebenmaxima und Minima und erreicht schließlich an einem genügend großen Abstand den Bereich der Hauptstrahlung. Das "Durchwandern" der Nebenmaxima und -minima ist in Abb. 3.5 als starke ortsabhängige Variation der Leistungsfussdichte im Bereich 1 m bis ca. 50 m zu erkennen. Vergleicht man die Variation in Abb. 3.5 mit der Aufzipfelung des Richtdiagramms in Abb. 3.3 ( $180^\circ$  bis  $90^\circ$ ), kann genau die Struktur der Nebenmaxima und -minima nachvollzogen werden. Ab etwa 50 m gelangt man in der Bereich der Hauptstrahlung; ab da fällt die Leistungsfussdichte gleichmäßig mit der Entfernung ab, d.h. gemäß dem angenommenen Freiraumausbreitungsmodell proportional zu  $d^2$ .

### 3.2.3.2 Untersuchung des Einflussfaktors Sendeleistung

Für die Sendeleistung werden Werte von 5 W, 20 W, 50 W und 100 W angenommen. Unter Sendeleistung wird hier die in einen Sektor *insgesamt* abgestrahlte, maximale Leistung bei Anlagenvolllast verstanden, d.h. Kanalzahl  $\times$  Sendeleistung pro Kanal. 5 W und 20 W sind gängige Werte bei vielen Basisstationen. 50 W können auftreten für einzelne Anlagen, die maximal mit Sendekanälen bestückt sind (z.B. [BFS 01]); dies ist aber schon als nicht allgemeiner Fall anzusehen. 100 W sind für eine einzelne Anlage/Sektor sicherlich unrealistisch. Es ist jedoch denkbar, dass ein Standort von mehreren Netzbetreibern gleichzeitig genutzt wird bzw. dass ein Netzbetreiber auf einem ihm zur Verfügung stehenden Standort neben der GSM Sendeanlage auch noch eine UMTS Sendeanlage aufbaut. Bei ähnlicher Ausrichtung der

Sektorantennen können sich dann die abgestrahlten Leistungen addieren. Die Ergebnisse der Berechnung in Sektormitte sind in Abb. 3.6 dargestellt.

Auswertung:

Mit veränderter Leistung ändert sich am prinzipiellen Verhalten der Kurve aus Abb. 3.5 nichts; die Kurven werden einfach parallel nach oben (steigende Leistung) bzw. unten (sinkende Leistung) verschoben. Hier spiegelt sich die Proportionalität zwischen Sendeleistung  $P_s$  und Leistungsflussdichte  $S$  aus Gleichung (3.1) wider, d.h. bei steigender Gesamtleistung der Sendeanlage erhöht sich die ortsbezogene Immission entsprechend. Zur Orientierung sind die für Deutschland gültigen Grenzwerte der 26. BImSchV sowie die Schweizer Vorsorgewerte für Orte mit empfindlicher Nutzung angegeben.

Interessant ist jedoch die Tatsache, dass bei der hier verwendeten Antenne die ortsbezogenen Immissionen im Bereich der Nebenzipfel der Antenne *höher* als im Hauptstrahl sind. Diese Feststellung weist bereits darauf hin, dass die alleinige Beschreibung der Abstrahlung von Mobilfunkantennen mit dem Hauptstrahlmodell (Leuchtturmcharakteristik) zur Beurteilung der tatsächlich vorliegenden Situation vor allem in unmittelbarer Nähe der Antenne nicht ausreichend ist. Vielmehr sind hier in die Betrachtung auch die Nebenabstrahlungen der Antenne einzubeziehen, die, obschon amplitudenmäßig schwächer als der Hauptstrahl, wegen kleineren Abständen zum Immissionsort ähnlich große oder sogar größere Immissionen verursachen können als der Hauptstrahl.

### **3.2.3.3 Untersuchung des Einflussfaktors Höhenunterschied**

Es wird hier als sinnvoll erachtet, nicht mit absoluten Höhen von Sender- und Empfängerort, sondern mit einem *Höhenunterschied* zu arbeiten. Damit werden mehrere unterschiedliche Konfigurationen gleichzeitig erfasst: Ein Höhenunterschied von 10 m bei der Berechnung kann bedeuten, dass sich der Sender in 10 m Höhe auf einem Wohnhaus oder Mast befindet und die ortsbezogene Immission am Erdboden betrachtet wird. Es kann aber auch bedeuten, dass sich die Sendeantenne in 20 m Höhe (über dem Erdboden) auf einem Hochhausdach befindet und die ortsbezogene Immission in einer Wohnung in 10 m Höhe über dem Erdboden betrachtet wird. Die Ergebnisse werden immer auf Empfängerhöhe dargestellt. Die Höhendifferenz wird variiert wie folgt: 1 m, 5 m, 10 m, 20 m und 50 m. 1 m bis 10 m entsprechen typischen Konfigurationen in Wohngebieten; 20 m ist für die Betrachtung der ortsbezogenen Immission am Erdboden von einer Sendestation auf einem Hochhausdach ebenfalls denkbar. 20 m und 50 m können für die ortsbezogene Immission am Erdboden für Sendestationen auftreten, die auf einem separaten Trägermast installiert sind. Die Ergebnisse der Berechnung in Sektormitte sind in Abb. 3.7 dargestellt.

Auswertung:

Bei Variation des Höhenunterschiedes bleibt die prinzipielle Kurvenform erhalten. Mit zunehmendem Höhenunterschied verschieben sich die Kurven im Nah- und mittlerem Abstandsbereich von der Antenne jedoch nach unten und gleichzeitig nach rechts. Die Rechtsverschiebung ist damit erklärbar, dass ein bestimmter Abstrahlwinkel der Antenne bei größerem Höhenunterschied erst in einem größeren Abstand von der Antenne erreicht wird. Durch den größeren Abstand ist auch die Immission kleiner, da die Leistungsflussdichte im Fernfeld

quadratisch mit der Entfernung von der Antenne abnimmt. Abb. 3.7 zeigt deutlich, dass bei geringen Höhenunterschieden (z.B. 1 m) Werte der ortsbezogenen Immission stark steigen und sogar die Schweizer Anlagengrenzwerte deutlich überschritten werden können. Davon sind solche Immissionsorte z.B. innerhalb von Wohnungen betroffen, die sich in Hauptstrahlrichtung auf fast derselben Höhe wie die Sendeantenne befinden und relativ dicht (einige Meter) an ihr angrenzen. Bei großen Entfernungen von der Antenne (einige Hundert Meter) spielt die Höhendifferenz keine Rolle mehr, da man dort die Sendeantenne, unabhängig von ihrer Höhe, unter nahezu demselben Winkel sieht und die Hauptstrahlung über diesen Winkelbereich nahezu konstant ist. Deswegen münden die Immissionskurven ineinander ein.

*(Anmerkung: Letztere Aussage gilt nicht für innerstädtisches Gebiet ohne direkte Sicht zur Sendeanlage. Hier steigt die ortsbezogene Immission bei Erhöhung der Sendeantenne aus wellenausbreitungstechnischen Gründen an).*

#### **3.2.3.4 Untersuchung des Einflussfaktors Downtilt der Sendeantenne**

Im Elevationsdiagramm nach Abb. 3.3 sieht man, dass die hier betrachtete Antenne einen elektrischen Downtilt von  $2^\circ$  fest voreingestellt hat. Für die Berechnungen wird ein zusätzlicher mechanischer Downtilt von  $0^\circ$  bis  $8^\circ$  in  $2^\circ$  Schritten parametrisiert. Mechanische Downtilts werden zusätzlich zu elektrischen verwendet, um durch stärkere Absenkung des Hauptstrahls die Interferenz mit benachbarten Funkzellen zu begrenzen. Die Ergebnisse der Berechnung in Sektormitte sind in Abb. 3.8 dargestellt.

##### Auswertung:

Für größere Downtilts verschieben sich die Kurven nach links, und die ortsbezogenen Immissionspegel werden größer. Interessanterweise steigt die im Bereich der Hauptstrahlung liegenden ortsbezogene Immission stärker an als die im Bereich der Nebenzipfel liegenden. Auch für moderate Sendeleistungen (20 W) kommt es bei realistischen Downtilts schon zur Überschreitung der Schweizer Anlagengrenzwerte. Die Kurven münden für große Abstände von der Antenne nicht ineinander ein, da man dort in einem Winkelbereich des Elevationsdiagramms ist, wo sich die Abstrahlung sehr stark bei minimaler Winkeldifferenz ändert. Für  $8^\circ$  Downtilt wird für große Abstände bereits der erste Nebenzipfel über dem Horizont erreicht, deswegen steigt die Kurve wieder an.



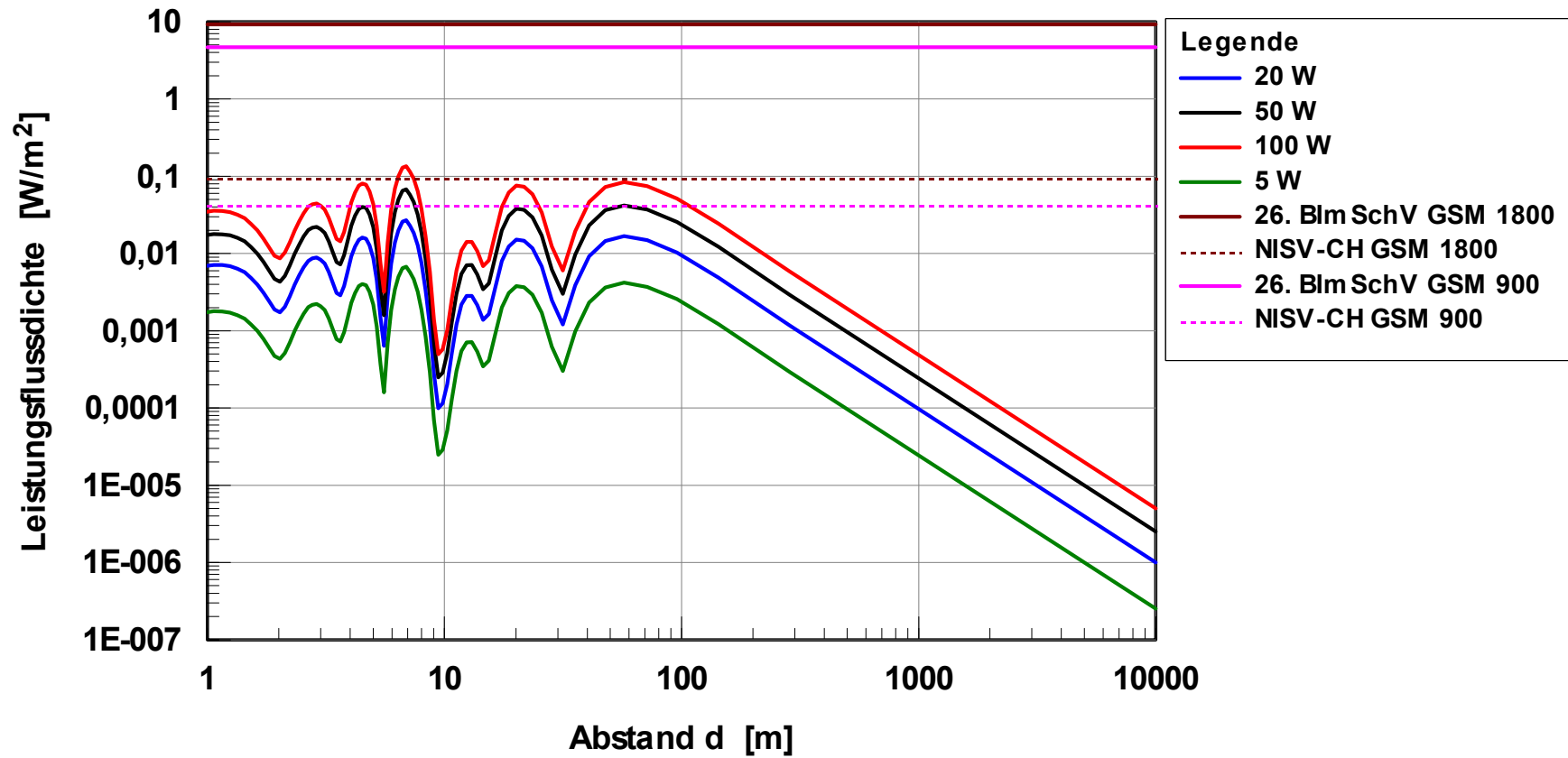


Abb. 3.6

Verlauf der Leistungsflussdichte in Abhängigkeit vom lateralen Abstand. Parametersatz 1 bei Variation der Sendeleistung  $P_s$

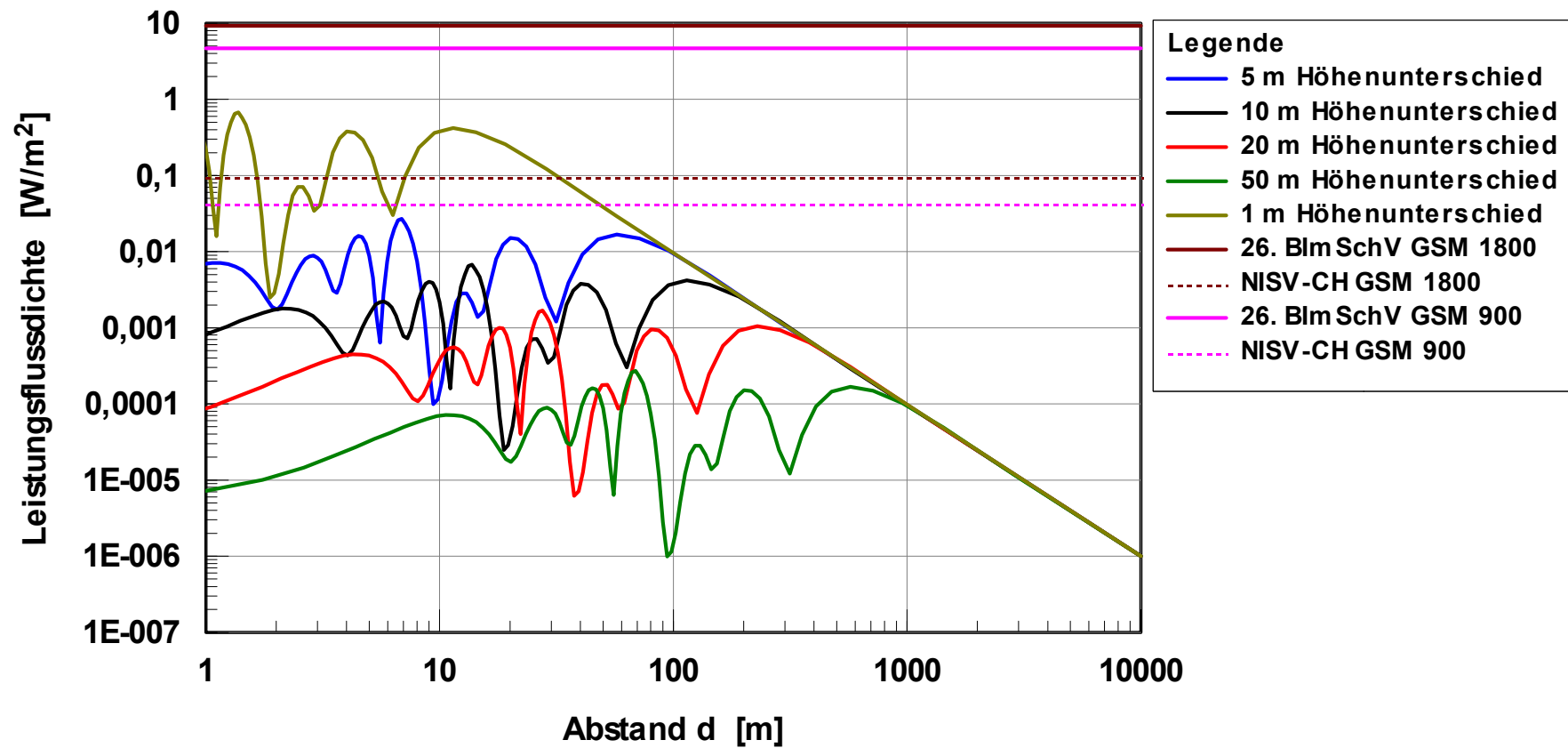


Abb. 3.7 Verlauf der Leistungsflussdichte in Abhängigkeit vom lateralen Abstand. Parametersatz 1 bei Variation des Höhenunterschieds  $h_S-h_E$

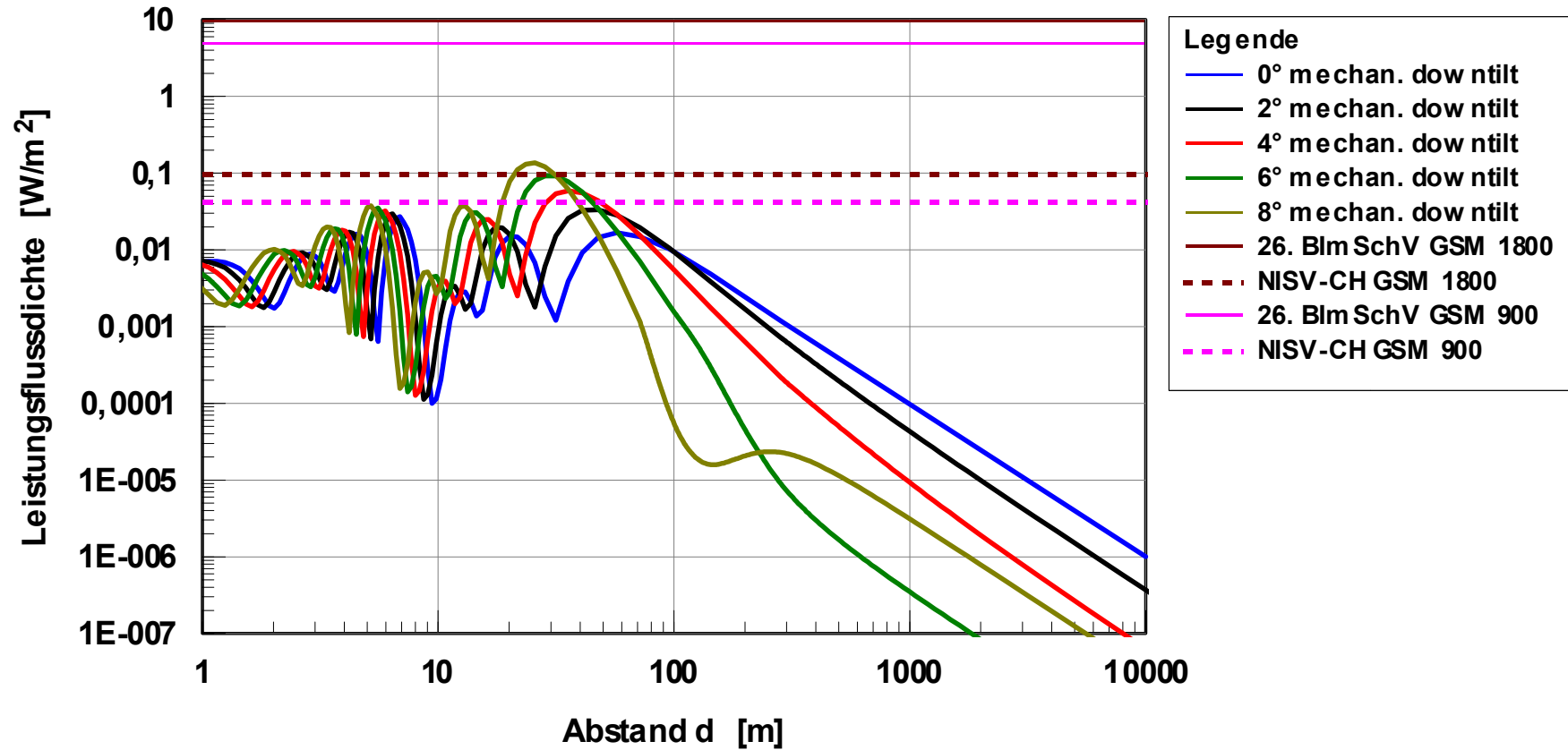


Abb. 3.8 Verlauf der Leistungsflussdichte in Abhängigkeit vom lateralen Abstand. Parametersatz 1 bei Variation des mechanischer Downtilts

### 3.2.3.5 Untersuchung des Einflussfaktors Sendeantenne

Die in den vorangegangenen Abschnitten gezeigten typischen Immissionskurven sind für einen Antennentyp gültig, der für Basisstationsantennen gängig ist. Prinzipiell werden selbstverständlich verschiedene Antennentypen verwendet, je nach Netzbetreiber und ausleuchtungstechnischen Anforderungen. In diesem Abschnitt soll kurz darauf eingegangen werden, ob sich die ermittelten Trends auch bei anderen Antennen wiederfinden, oder ob sich die Verhältnisse grundsätzlich ändern.

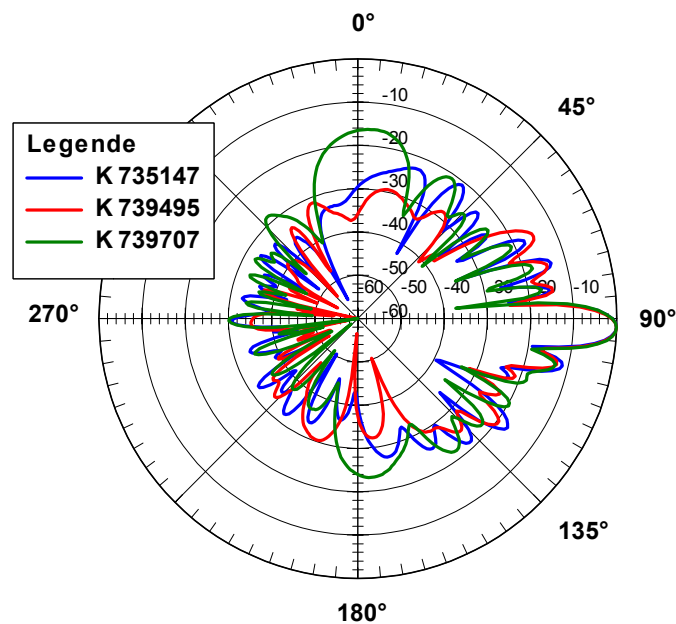


Abb. 3.9 Elevationsdiagramme von drei typischen GSM 1800 Antennen

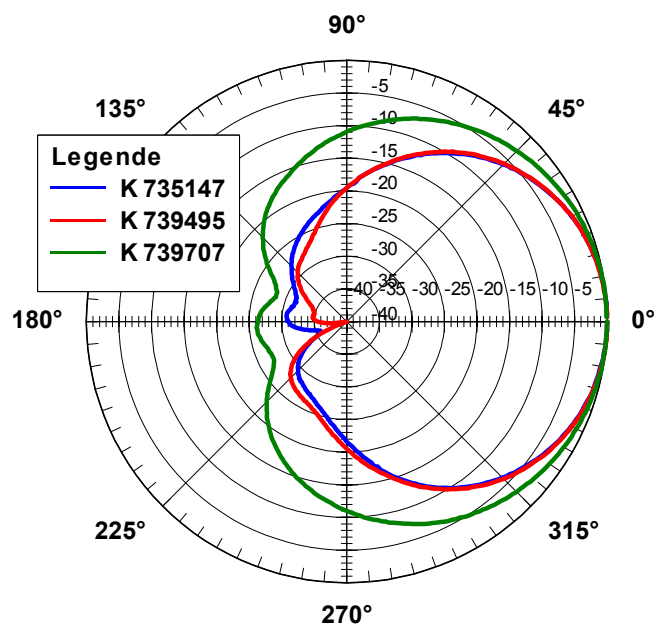


Abb. 3.10 Azimutdiagramme von drei typischen GSM 1800 Antennen

Zu diesem Zweck werden zwei andere Antennen, die ebenfalls im GSM 1800 Netz Verwendung finden, in die Untersuchungen einbezogen. Abb. 3.9 und 3.10 zeigen die Elevations- und Azimutdiagramme aller drei Antennen im Vergleich.

In den Elevationsdiagrammen (Abb. 3.9) sind im Bereich der Hauptstrahlung alle drei Kurven deckungsgleich. Im Bereich der relevanten Nebenzipfel ( $180^\circ$  bis etwa  $100^\circ$ ) ergeben sich jedoch Abweichungen. Unten wird gezeigt, welchen Einfluss dies auf die Immission in Sektormitte hat. Der elektrische Downtilt von  $2^\circ$  ist allen drei Antennen gleich.

Die Azimutschnitte (Abb. 3.10) sind für die K 739 147 und die K 739 495 nahezu identisch. Eine Abweichung gibt es bei der K 739 707, die einen sehr viel breiteren Sektor ausleuchtet. Diese Antenne hat eine 3 dB Öffnungsbreite von  $90^\circ$  (im Gegensatz zu  $65^\circ$  der anderen beiden Antennen), dafür aber nur einen Gewinn von 16,5 dBi (statt 18 dBi).

In Abb. 3.11 ist der Verlauf der Leistungsflussdichte in Abhängigkeit vom lateralen Abstand für die drei Antennentypen gezeigt. Es gelten wiederum die Angaben von Parametersatz 1, wobei hier der Antennentyp variiert wird. Prinzipiell sind alle drei Verläufe ähnlich: Bis zum Erreichen der Hauptstrahlrichtung der Antennen bei ca. 50 m werden wiederum die Nebenmaxima- und -minima durchlaufen. Da diese für alle drei Antennen unterschiedlich aussehen, siehe Abb. 3.9, differiert der Verlauf der Immission in diesem Bereich. Ab etwa 50 m fallen die Kurven wieder gleichmäßig ab, allerdings ist die Immission durch die Antenne K 739 707 wegen ihres um ca. 1,5 dBi kleineren Gewinns entsprechend niedriger.

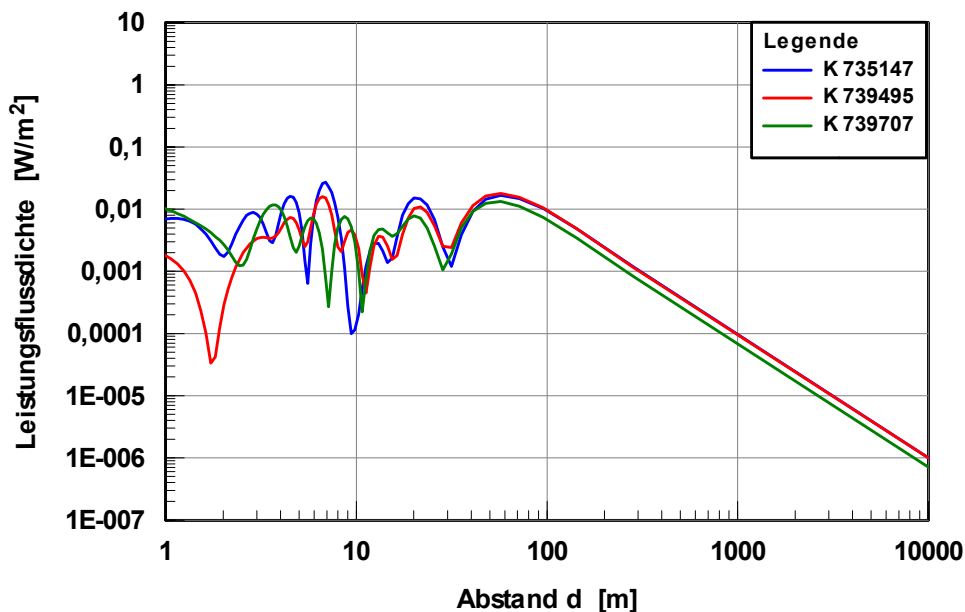


Abb. 3.11 Verlauf der Leistungsflussdichte in Abhängigkeit vom lateralen Abstand. Parametersatz 1 bei Variation von drei verschiedenen Antennentypen

#### Auswertung:

Die Wahl der Antenne hat Auswirkungen vor allem auf den Verlauf der ortsbezogenen Immission im Bereich der Nebenzipfel, d.h. je nach Höhe bis zu ca. 50 m (5 m Höhenunterschied) bzw. ca. 500 m Abstand (50 m Höhenunterschied) von der Antenne entfernt. Hier kann vor allem durch Wahl einer Antenne mit niedrigen Nebenzipfeln die Immission deutlich gesenkt werden (nur bei der Antenne K 735 147 liegt die Immission im Bereich der Nebenzip-

fel über der Immission in Hauptstrahlrichtung!). Ab Erreichen der Hauptstrahlrichtung verlaufen die Kurven gleich und sind nur noch vom Gewinn der Antenne abhängig. Durch die Antenne verändern sich die in den vorhergehenden Abschnitten festgestellten Trends *nicht*.

### 3.2.3.6 Untersuchung des Einflussfaktors horizontale Ausrichtung der Sendeantennen bzw. horizontale Ausrichtung des Immissionsortes zu den Sendeantennen

Üblicherweise werden pro Basisstation drei um  $120^\circ$  versetzte Sendeantennen betrieben, die jeweils einen Sektor (eine Funkzelle) ausleuchten. Durch diesen Versatz wird erreicht, dass durch eine Basisstation insgesamt ein nahezu kreisförmiger Bereich versorgt werden kann (siehe Abb. 3.12).

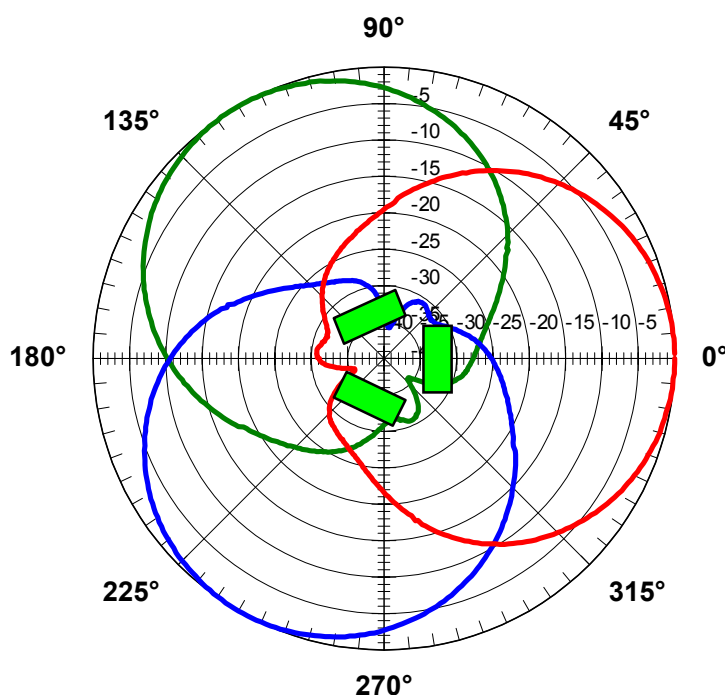


Abb. 3.12 Ausleuchtung eines kreisförmigen Gebietes durch drei versetzt aufgestellte Antennen K 735147

Aus Abb. 3.12 wird deutlich, dass es je nach horizontaler Ausrichtung des Immissionsortes bezüglich der Sendestation Unterschiede in der Immission geben wird: Wohingegen die Immission dann maximal ist, wenn eine der Antennen voll auf den Immissionsort ausgerichtet ist ( $0^\circ$ ,  $120^\circ$  oder  $240^\circ$ ), wird die Immission dann geringer sein, wenn sich der Immissionsort in dem Überlappungsbereich zwischen zwei Sektoren befindet ( $60^\circ$ ,  $180^\circ$  oder  $300^\circ$ ). Zwar überlagern sich in diesem Überlappungsbereich die Abstrahlungen beider benachbarter Antennen zu einer resultierenden Abstrahlung, jedoch ist diese in diesem Beispiel immer noch deutlich kleiner als in Sektormitte.

Werden Antennen mit breiterer Azimutcharakteristik eingesetzt (z.B. K 739 707, Abb. 3.10), ist der Pegel einbruch im Überlappungsbereich zweier Sektoren nicht mehr so deutlich ausgeprägt.

### **3.2.3.7 Untersuchung des Einflussfaktors Sichtbarkeit zur Sendeanlage**

Besteht freie Sicht zur Anlage, dann können die Immissionen trotz größerer Entfernung zur Anlage größer sein, als wenn ein Hindernis im Ausbreitungsweg zwischen Sender und Immissionsort vorhanden ist. Die Dämpfung durch das Hindernis kann wie eine Reduzierung der Sendeleistung der Anlage betrachtet werden (Abb. 3.6). Auf die Problematik der Dämpfung durch typische Gebäudematerialien und der zu erwartenden Immissionsreduzierung wird zu einem späteren Zeitpunkt eingegangen. Hierbei muss allerdings berücksichtigt werden, dass durch Reflexions- und Beugungserscheinungen Strahlungsanteile der Sendeantenne auch über Umwege zum Immissionsort gelangen können.

### **3.2.4 Zusammenfassung**

Unter Einbeziehung der Besonderheiten der verwendeten Mobilfunk Sendeantennen können folgende grundsätzlichen Aussagen für das Verhalten der zu erwartenden ortsbezogenen Immission in unmittelbarer Nähe einer Sendeanlage getroffen werden:

1. Eine höhere Sendeleistung führt zu einer erhöhten ortsbezogenen Immission. Unter Sendeleistung ist die gesamte Anlagensendeleistung zu betrachten, d.h. Kanalzahl x Sendeleistung pro Kanal unter der Berücksichtigung eventuellen site sharings.
2. Auch der laterale Abstand zur Anlage ist ein deutlicher Einflussfaktor: Bei größerem Abstand ist im Allgemeinen die Immission niedriger als bei kleinen Abständen. Außerdem ist der Höhenunterschied zwischen Sende- und Empfangsantenne mit zu berücksichtigen: Orte, die im Hauptstrahl der Antenne liegen (geringer Höhenunterschied) erfahren eine sehr viel höhere Immission als tiefer gelegene Immissionsorte bei gleichem lateralen Abstand. Bei steigendem Downtilt der Antenne können auch tiefer gelegene Immissionsorte in den Hauptstrahl rutschen.
3. Trotz des Vorhandenseins einer klaren Hauptstrahlrichtung der Sendeantennen kann nicht generell geschlussfolgert werden, dass alle anderen Raumrichtungen, wie z.B. direkt unter der Antenne, feldfrei sind. Im Gegenteil können durch die sog. Nebenzipfel der Antenne bei kürzeren Abstandsbereichen Immissionen vorliegen, die größer als diejenigen sind, die weiter entfernte Orte erfahren, die in Hauptstrahlrichtung liegen. Entscheidend hierfür sind die konkret eingesetzten Sendeantennen, die vor allem im Bereich der Nebenzipfel sehr unterschiedliche Strahlungsverhalten aufweisen können.
4. Neben der durch den Höhenunterschied charakterisierten vertikalen Ausrichtung spielt bezüglich der Immission auch die horizontale Ausrichtung des Immissionsortes zu den Sendeantennen eine Rolle. Hierbei wird betrachtet, inwieweit sich der Ort im Strahlungsbereich einer Antenne (Sektormitte) oder im Überlappungsbereich zweier Antennen befindet.
5. Gravierende Unterschiede bezüglich der Immissionssituation gibt es bezüglich der Sichtverhältnisse zur Anlage: Gebäude, Hauswände oder Bäume, die sich im Ausbreitungsweg zwischen Sendeanlage und Immissionsort befinden, dämpfen die Strahlung signifikant ab. Allerdings können durch Reflexions- und Beugungserscheinungen Strahlungsanteile auch über Umwege zum Immissionsort gelangen.

### 3.3 Messtechnisch ermittelte Daten

#### 3.3.1 Ergebnisse der Messungen in den Kommunen

##### 3.3.1.1 Dokumentation der Messergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der systematischen Vorortmessungen in den zehn ausgewählten Kommunen vorgestellt.

Die Messungen erfolgten nicht an wahllos ausgewählten Orten, sondern vorrangig an Messpunkten, die sich in *direkter* Nähe zu Mobilfunk Basisstationen befinden und oft nur wenige zehn Meter von ihr entfernt sind. Besondere Berücksichtigung fanden auch Messpunkte im selben Gebäude, auf dem die Anlage installiert ist, und zwar in Wohnungen direkt unterhalb der Anlage ("unter Anl." in Tab. 3.2). Insofern sind die hier vorgestellten Immissionen nicht als flächenmäßig gemittelte Durchschnittswerte über Nordrhein-Westfalen zu verstehen, sondern in erster Linie als worst case Werte für Orte in unmittelbarer Umgebung der Anlagen. Die durchschnittlichen Immissionen werden entsprechend geringer ausfallen.

Die Messungen wurden primär mit der frequenzselektiven Messmethode, d.h. mit Spektrumanalysator und Empfangsantenne, vorgenommen. Die maximalen Immissionen wurden mit der Schwenkmethode ermittelt. Messverfahren und Messmethode sind im Anhang bzw. ausführlich in [EMF 2] beschrieben.

Nach den Messungen wurden die Daten der betreffenden Anlagen, insbesondere Kanal- und Frequenzinformationen, von den Betreibern abgefragt. Mit diesen Daten erfolgte eine Extrapolation der gemessenen (Augenblicks-) Werte auf die Immissionen, die bei maximaler Anlagenauslastung vorliegen. Im weiteren sind, sofern nicht explizit anders beschrieben, nur diese maximal möglichen Immissionen angegeben.

In der nachfolgenden Dokumentation wird so vorgegangen, dass die gemessene Immission in drei unterschiedlichen Klassen angegeben wird:

1. Immission durch die Hauptsendeanlage (HSA): Die Mobilfunkanlage vor Ort wird als Hauptsendeanlage bezeichnet. Durch das frequenzselektive Verfahren sind die Immissionen der HSA von den Immissionen umliegender Mobilfunkanlagen sowie anderer HF-Quellen separierbar.
2. Mobilfunk insgesamt (MFu gesamt): Hier werden zusätzlich zu den HSA auch diejenigen (Mobilfunk-) Nebensendeanlagen (NSA) einbezogen, die zur Immission am Messpunkt einen relevanten Beitrag liefern. Auch die Immission durch die NSA wurde, sofern Daten vorlagen, auf maximale Anlagenauslastung extrapoliert.
3. Andere HF: Hier werden an ausgewählten Messpunkten die relevanten Immissionen durch andere Quellen, die im Frequenzbereich von 10 kHz bis ca. 3 GHz, gemessen wurden, angegeben. Mobilfunk bleibt hierbei *unberücksichtigt*. In der Tabelle werden die Daten für externe HF-Quellen und DECT separat dargestellt; in den Abb. 3.13 bis 3.16 wird unter "andere HF Immissionen" nur die Immission durch externe Quellen (primär Rundfunk- und Fernsehsender) angegeben. Auf DECT wird später separat eingegangen.

In Tab. 3.2 sind die Messwerte aufgelistet. In den Abb. 3.13 bis 3.17 sind die Ergebnisse aus Tab. 3.2 grafisch aufbereitet.



Messort Messpunkt	Höhe	Sicht zur HSA?	Entfer- nung [m]	Immission [ $W/m^2$ ]		
				HSA	MFu gesamt	andere HF
<b>Aachen</b>						
Raafstraße; HSA auf Mast ca. 15 m über Grund						
AC 1.1	1. OG	ja	10	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$6,6 \cdot 10^{-2}$
AC 1.2	EG	ja	10	$5,1 \cdot 10^{-4}$	$5,1 \cdot 10^{-4}$	
AC 1.3	1. OG	nein	20	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	
Bayernallee; HSA auf Hochhaus 37-40 m über Grund						
AC 2.1	11. OG	nein	unter Anl.	$5,3 \cdot 10^{-4}$	$7,3 \cdot 10^{-4}$	
AC 2.2	12. OG	nein	unter Anl.	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$4,3 \cdot 10^{-3}$
AC 2.3	vor Anl.	ja	5	$1,3 \cdot 10^{-1}$	$1,4 \cdot 10^{-1}$	
AC 2.4	Boden	nein	160	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	
AC 2.5	Boden	ja	180	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$9,1 \cdot 10^{-3}$	
AC 2.6	3. OG	ja	60	$8,3 \cdot 10^{-3}$	$8,3 \cdot 10^{-3}$	
Kleinmarschierstraße; HSA auf Wohnhaus 19 m über Grund						
AC 3.1	5. OG	nein	unter Anl.	$9,8 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	
AC 3.2	4. OG	nein	10	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$6,5 \cdot 10^{-4}$ DECT
<b>Bielefeld</b>						
Dornberger Str.; HSA auf Feuerwehrturm 15-17 m über Grund						
BI 1.1	1. OG	nein	unter Anl.	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$2,4 \cdot 10^{-2}$
BI 1.2	Boden	ja	30	$8,3 \cdot 10^{-4}$	$8,3 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-3}$
BI 1.3	EG	nein	20	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$
Deckertstraße; HSA auf Hochhaus 42 m über Grund						
BI 2.1	12. OG	nein	unter Anl.	$2,0 \cdot 10^{-5}$	$5,2 \cdot 10^{-3}$	$9,0 \cdot 10^{-5}$
BI 2.2	7. OG	nein	unter Anl.	$8,0 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$7,3 \cdot 10^{-5}$
BI 2.3	EG	nein	unter Anl.	$2,8 \cdot 10^{-6}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$
Lüneburger Straße; HSA auf Hochhaus 26 m über Grund						
BI 3.1	EG	ja	125	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$7,5 \cdot 10^{-5}$	$7,0 \cdot 10^{-6}$
BI 3.2	EG	ja	125	$3,5 \cdot 10^{-5}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$2,2 \cdot 10^{-5} +$ $4,0 \cdot 10^{-4}$ DECT
BI 3.3	5. OG	nein	unter Anl.	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$4,4 \cdot 10^{-4}$
<b>Bonn</b>						
Sportplatz Am Stingenberg; HSA auf Mast 15 m über Grund						
BN 1.1	1. OG	ja	25	$6,4 \cdot 10^{-4}$	$6,4 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$
BN 1.2	1. OG	ja	50	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	

Kirchstraße; HSA auf Wohnhaus 14 m über Grund						
BN 2.1	4. OG	ja	25	$5,6 \cdot 10^{-3}$	$5,6 \cdot 10^{-3}$	$9,4 \cdot 10^{-4} + 6,0 \cdot 10^{-6}$ DECT
BN 2.2	EG	nein	105	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	
BN 2.3	EG	nein	140	$3,1 \cdot 10^{-5}$	$3,1 \cdot 10^{-5}$	
BN 2.4	1. OG	ja	45	$5,8 \cdot 10^{-3}$	$5,8 \cdot 10^{-3}$	
BN 2.5	4. OG	nein	unter Anl.	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-5}$ DECT
Siegburger Straße; HSA auf Schulgebäude 24 m über Grund						
BN 3.1	1. OG	ja	90	$3,2 \cdot 10^{-4}$	$3,2 \cdot 10^{-4}$	
BN 3.2	Boden	ja	55	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$
BN 3.3	2. OG	ja	20	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	
BN 3.4	1. OG	ja	185	$3,2 \cdot 10^{-4}$	$3,2 \cdot 10^{-4}$	
Dortmund						
Wambeler Hellweg						
DO 1.1	3. OG	nein	unter Anl.	$2,9 \cdot 10^{-5}$	$9,0 \cdot 10^{-5}$	$3,4 \cdot 10^{-4} + 1,5 \cdot 10^{-4}$ DECT
DO 1.2	4. OG	ja	40	$7,0 \cdot 10^{-4}$	$8,0 \cdot 10^{-4}$	
DO 1.3	2. OG	ja	90	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$2,3 \cdot 10^{-4}$	
DO 1.4	2. OG	nein	165	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	
DO 1.5	2. OG	nein	230	nicht gemessen	$4,8 \cdot 10^{-4}$	
Brandisstraße; HSA auf Fabrikgebäude 18-21 m über Grund						
DO 2.1	3. OG	ja	40	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$
DO 2.2	EG	ja	40	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	
DO 2.3	EG	ja	80	$7,0 \cdot 10^{-3}$	$7,0 \cdot 10^{-3}$	
Lange Fuhr; HSA auf Hochhaus 25-30 m über Grund						
DO 3.1	7. OG	nein	unter Anl.	$6,4 \cdot 10^{-4}$	$6,5 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$
DO 3.2	7. OG	nein	unter Anl.	$3,3 \cdot 10^{-3}$	$4,9 \cdot 10^{-3}$	
DO 3.3	4. OG	nein	unter Anl.	$6,9 \cdot 10^{-5}$	$6,9 \cdot 10^{-5}$	
DO 3.4	EG	nein	unter Anl.	$1,4 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$	
Düsseldorf						
Bingener Weg; HSA auf Hochhaus 28 m über Grund						
D 1.1	EG	nein	190	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$8,2 \cdot 10^{-6}$
D 1.2	2. OG	ja	105	$1,7 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	
D 1.3	7. OG	nein	unter Anl.	$9,0 \cdot 10^{-3}$	$9,2 \cdot 10^{-3}$	$4,7 \cdot 10^{-4} + 2,0 \cdot 10^{-4}$ DECT
D 1.4	7. OG	nein	unter Anl.	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$5,5 \cdot 10^{-4} + 1,0 \cdot 10^{-6}$ DECT
D 1.5	EG	nein	unter Anl.	$3,3 \cdot 10^{-5}$	$3,3 \cdot 10^{-5}$	
D 1.6	EG	nein	240	$1,9 \cdot 10^{-5}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$ DECT

Kronprinzenstraße; HSA auf Wohnhaus 27-32 m über Grund						
D 2.1	2. OG	ja	35	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$5,4 \cdot 10^{-5} + 1,0 \cdot 10^{-6}$ DECT
D 2.2	2. OG	nein	45	$8,8 \cdot 10^{-4}$	$8,8 \cdot 10^{-4}$	
Krefeld						
Hochstraße; HSA auf Kaufhaus 17-28 m über Grund						
KR 1.1	4. OG	nein	unter Anl.	$3,2 \cdot 10^{-2}$	$3,3 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$
KR 1.2	5. OG	ja	50	$2,6 \cdot 10^{-2}$	$2,6 \cdot 10^{-2}$	
KR 1.3	4. OG	ja	20	$8,4 \cdot 10^{-3}$	$8,5 \cdot 10^{-3}$	
KR 1.4	3. OG	nein	80	$3,5 \cdot 10^{-2}$	$3,5 \cdot 10^{-2}$	
Inrather Straße; HSA auf Wohnhaus 22 m über Grund						
KR 2.1	EG	nein	120	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$6,0 \cdot 10^{-6}$ DECT
KR 2.2	Boden	nein	110	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$7,0 \cdot 10^{-6}$
KR 2.3	2. OG	ja	90	$5,4 \cdot 10^{-3}$	$5,4 \cdot 10^{-3}$	
KR 2.4	3. OG	nein	unter Anl.	$3,4 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-5}$ DECT
KR 2.5	DG	ja	75	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$6,0 \cdot 10^{-6}$ DECT
Münster						
Ludgeriplatz; HSA auf Dach eines 5-stöckigen Wohnhauses						
MS 1.1	4. OG	nein	unter Anl.	$5,2 \cdot 10^{-3}$	$5,2 \cdot 10^{-3}$	
MS 1.2	7. OG	ja	110	$8,5 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	
MS 1.3	4. OG	nein	30	$4,3 \cdot 10^{-4}$	$4,3 \cdot 10^{-4}$	
MS 1.4	6. OG	nein	60	$8,3 \cdot 10^{-4}$	$8,3 \cdot 10^{-4}$	
MS 1.5	6. OG	ja	60	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$8,0 \cdot 10^{-6}$
Klemensstraße; HSA auf Hochhausdach 41 m						
MS 2.1	12. OG	nein	unter Anl.	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$	
MS 2.2	10. OG	nein	unter Anl.	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$7,0 \cdot 10^{-4}$	
MS 2.3	5. OG	ja	220	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$4,9 \cdot 10^{-3}$	
Oberhausen						
Bismarckstraße; HSA auf Schulgebäude 28-30 m über Grund						
OB 1.1	Boden	ja	60	$7,4 \cdot 10^{-3}$	$7,4 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-5}$
OB 1.2	1. OG	nein	100	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$	
Egelsfothstraße; HSA auf 4-stöckigem Schulgebäude						
OB 2.1	Boden	ja	65	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$
OB 2.2	1. OG	ja	60	$6,1 \cdot 10^{-4}$	$6,1 \cdot 10^{-4}$	
Siegen						
Schweriner Straße; HSA auf Mast 49-57 m						
SI 1.1	13. OG	ja	40	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$4,4 \cdot 10^{-3}$
SI 1.2	Boden	ja	50	$8,1 \cdot 10^{-4}$	$8,1 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$

Wuppertal						
Frankfurter Straße; HSA auf Wohnhaus 16 m über Grund						
W 1.1	2. OG	ja	65	$2,9 \cdot 10^{-3}$	$2,9 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-2}$ DECT
W 1.2	2. OG	nein	unter Anl.	$9,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-4} + 3,0 \cdot 10^{-3}$ DECT
W 1.3	3. OG	nein	7	$4,5 \cdot 10^{-2}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	$8,2 \cdot 10^{-5}$ DECT
Else-Lasker-Schüler-Straße; HSA auf Schulgebäude 20 m über Grund						
W 2.1	3. OG	nein	210	$3,2 \cdot 10^{-4}$	$5,9 \cdot 10^{-3}$	
W 2.2	Boden	nein	180	$6,2 \cdot 10^{-5}$	$8,3 \cdot 10^{-5}$	
W 2.3	Boden	ja	115	$8,6 \cdot 10^{-3}$	$8,6 \cdot 10^{-3}$	
W 2.4	EG	ja	55	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	
W 2.5	3. OG	ja	6	$9,3 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-4}$
W 2.6	EG	nein	40	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	
Bahnstraße; HSA auf Wohnhaus 21 m über Grund						
W 3.1	Boden	ja	20	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$
W 3.2	3. OG	nein	15	$8,4 \cdot 10^{-4}$	$8,5 \cdot 10^{-4}$	
W 3.3	1. OG	nein	5	$9,0 \cdot 10^{-5}$	$9,0 \cdot 10^{-5}$	$1,7 \cdot 10^{-4} + 1,5 \cdot 10^{-5}$ DECT
W 3.4	3. OG	nein	unter Anl.	$2,4 \cdot 10^{-4}$	$2,4 \cdot 10^{-4}$	$3,5 \cdot 10^{-3}$ DECT
W 3.5	EG	ja	50	$3,5 \cdot 10^{-4}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$	

Tab. 3.2 Ergebnisse der Messungen in den Kommunen

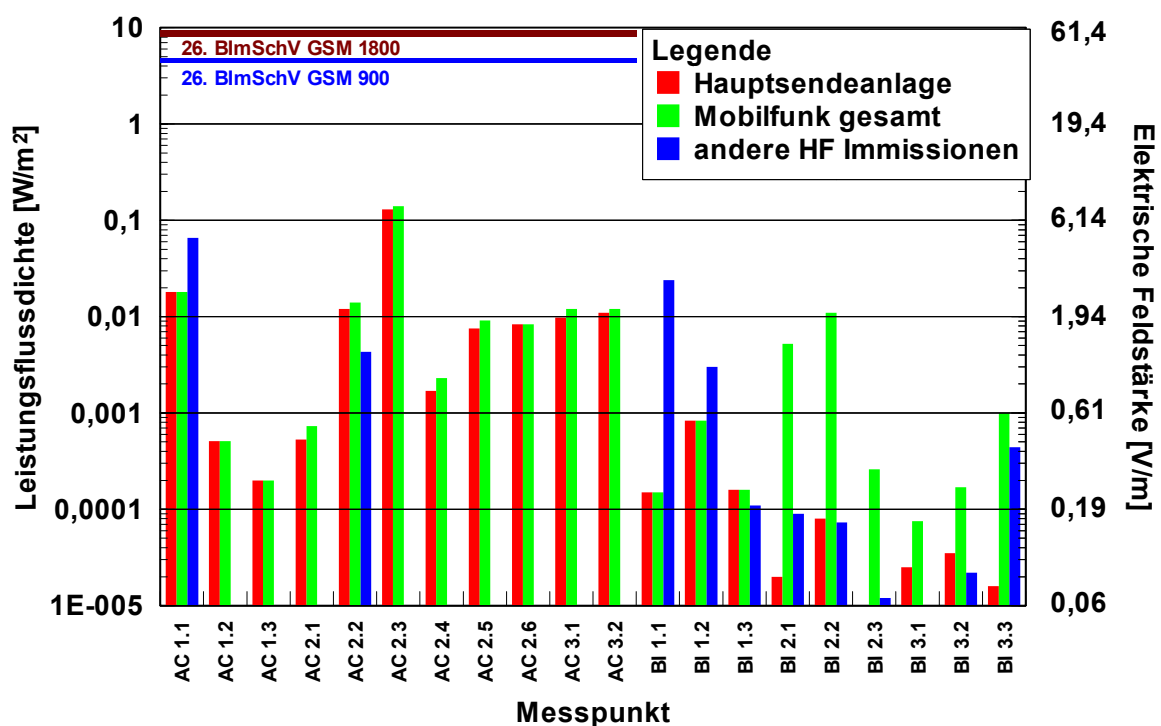


Abb. 3.13 Messergebnisse für Aachen und Bielefeld

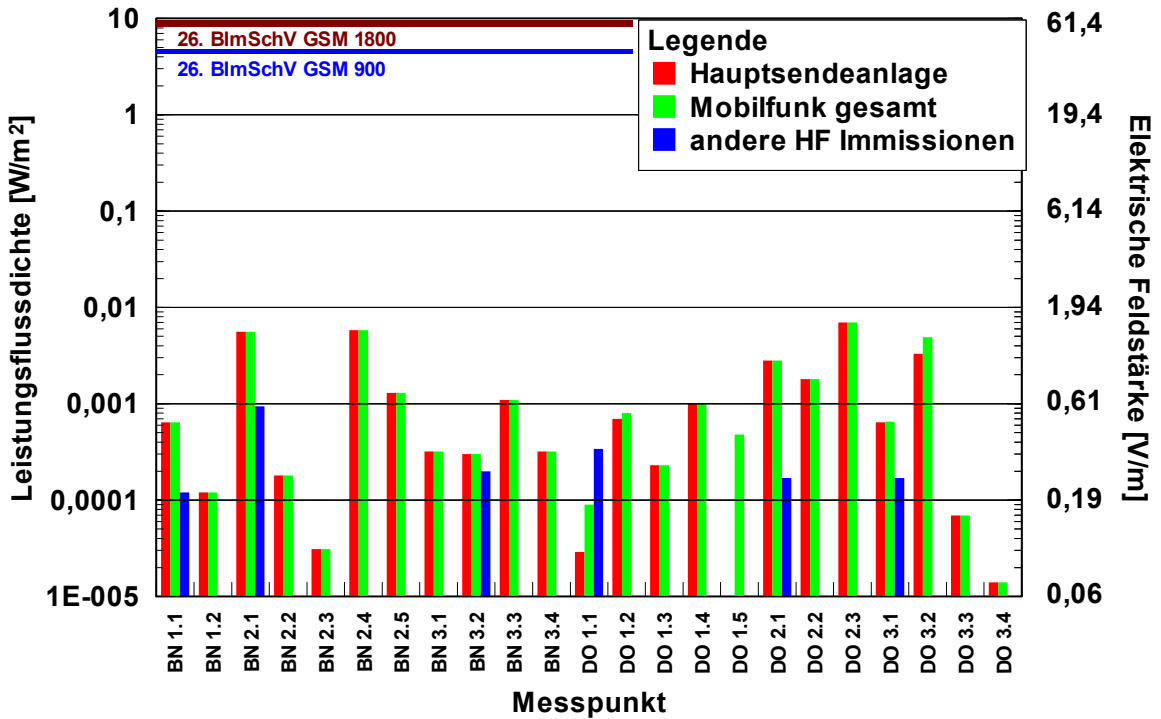


Abb. 3.14 Messergebnisse für Bonn und Dortmund

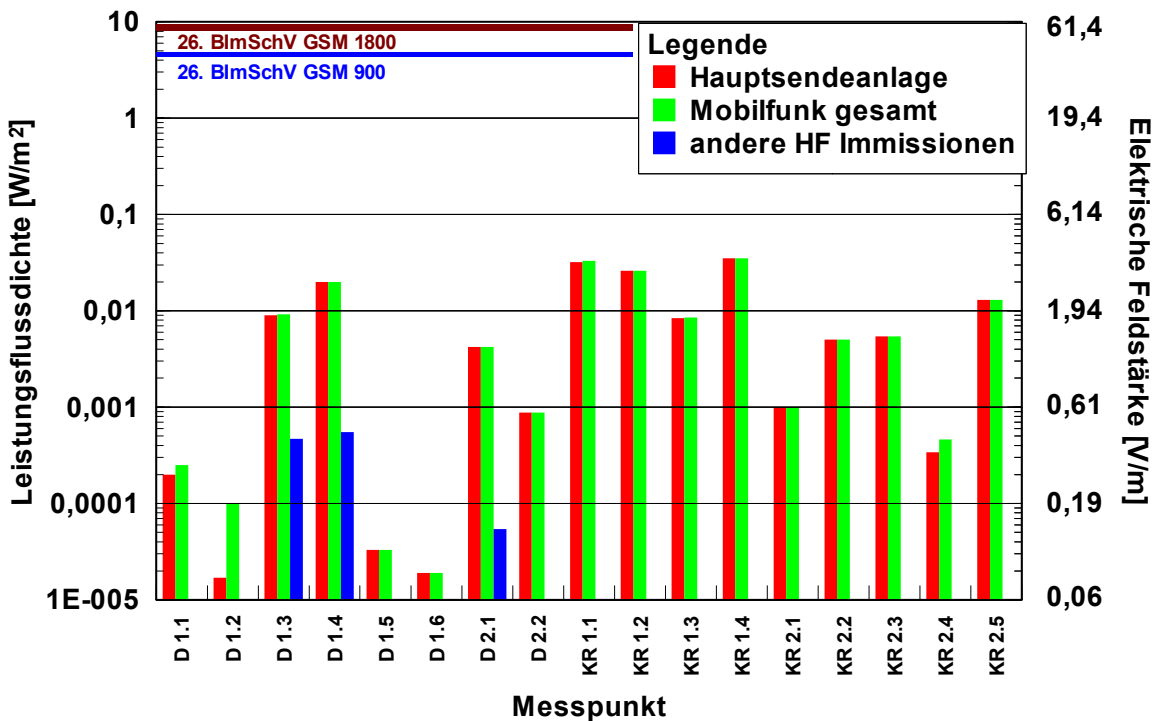


Abb. 3.15 Messergebnisse für Düsseldorf und Krefeld

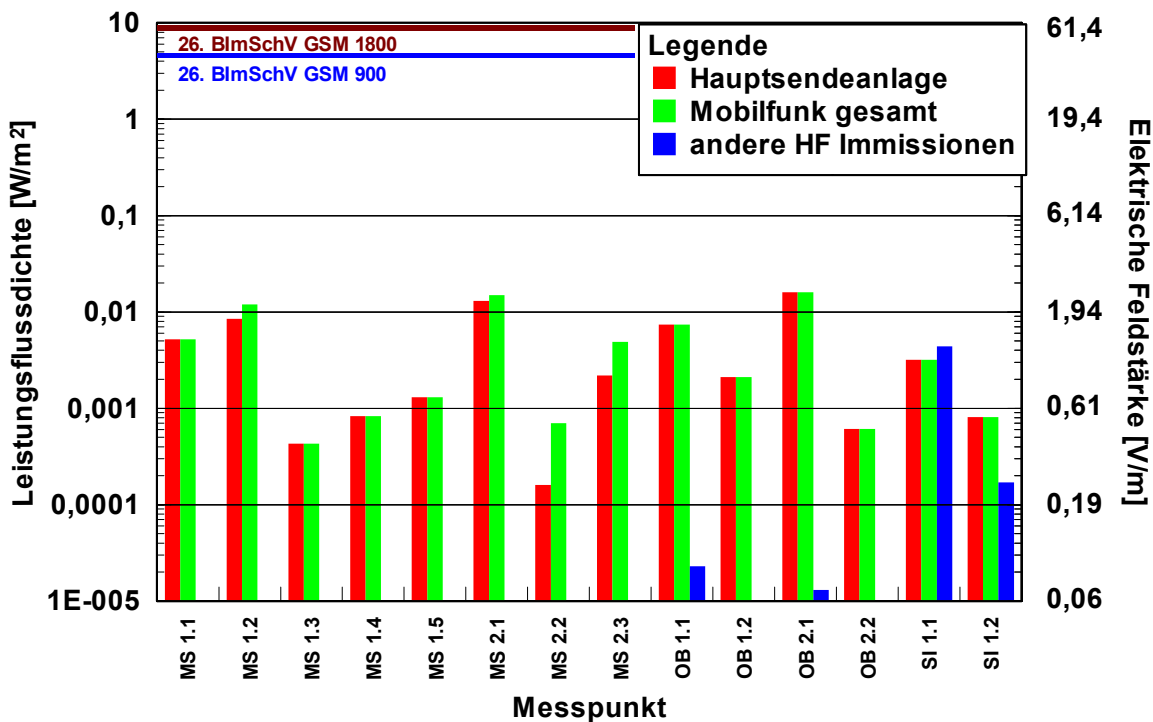


Abb. 3.16 Messergebnisse für Münster, Oberhausen und Siegen

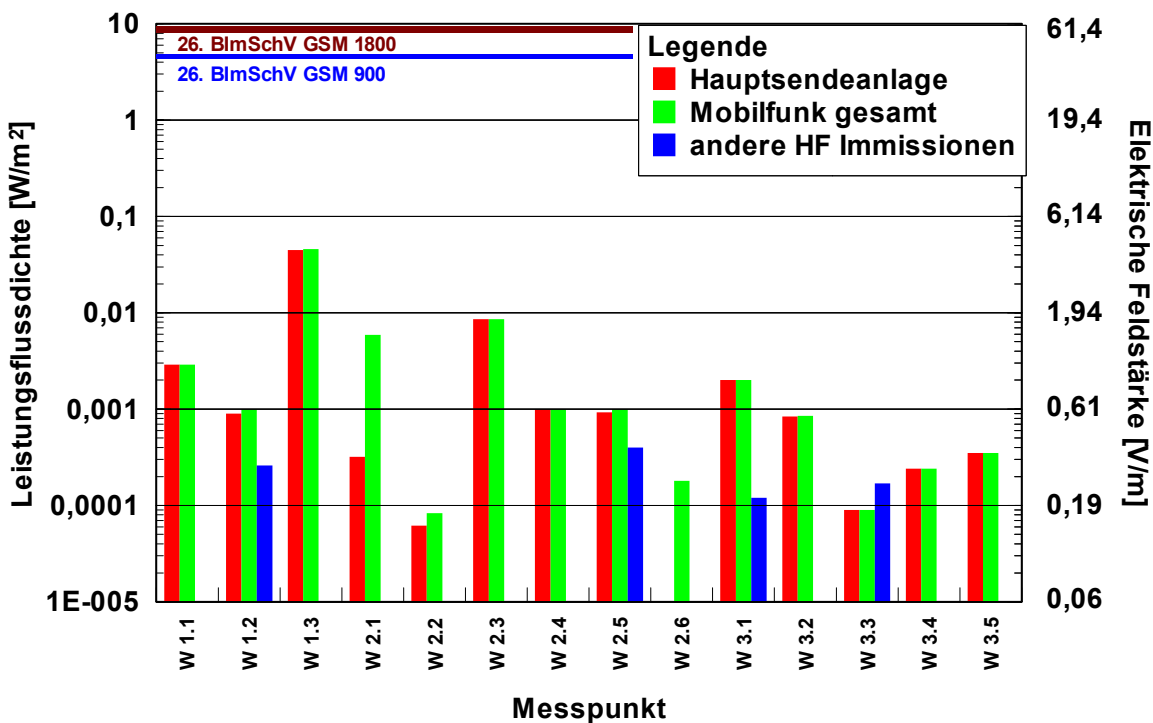


Abb. 3.17 Messergebnisse für Wuppertal

### 3.3.1.2 Auswertung der Messergebnisse

Aus den Messergebnissen lassen sich folgende Beobachtungen ableiten:

- Alle gemessenen Mobilfunkimmissionen liegen deutlich, d.h. bezüglich der elektrischen Leistungsflussdichte um mindestens den Faktor Zehn, von einer Ausnahme abgesehen auch durchgängig um mindestens den Faktor Hundert unter den gesetzlichen Grenzwerten der 26. BImSchV. Die Schweizer Vorsorgewerte an Orten mit empfindlicher Nutzung werden jedoch an einigen Stellen nahezu erreicht und an einem Ort sogar überschritten. Insofern werden die Ergebnisse der Abschätzungen nach [EMF 1] bestätigt, nach denen nicht pauschal davon ausgegangen werden kann, dass überall die Schweizer Vorsorgewerte problemlos unterschritten werden.
- Die Spannweite der Messergebnisse ist mit fünf Zehnerpotenzen bezüglich der elektrischen Leistungsflussdichte sehr groß. Der höchste durch die HSA gemessene Wert beträgt  $1,3 \cdot 10^{-1} \text{ W/m}^2$  (AC 2.3), der niedrigste gemessene Wert ist  $1,3 \cdot 10^{-6} \text{ W/m}^2$  (W 2.6).
- Von den Punkten, an denen die größten Immissionen gemessen wurden, sollen hier zwei herausgegriffen und erläutert werden:
  - AC 2.3 befindet sich auf dem Dach eines Hochhauses direkt vor einem Dachaufbau, auf dem eine umfangreiche Anlage mehrerer Betreiber errichtet ist. Obwohl nicht in direkter Hauptstrahlrichtung, sind trotzdem wegen des geringen Höhenunterschiedes und des kleinen Abstandes die Immissionen vergleichsweise hoch.
  - W 1.3 befindet sich zwar innerhalb eines Gebäudes (Dachstuhl), ist aber relativ dicht an der Sendeanlage und fast auf gleicher Höhe (vermutlich Hauptstrahlrichtung). Die Dämpfung des Dachstuhlmaterials ist nicht mit der einer Stahlbetonwand zu vergleichen sondern geringer; deswegen kommt es auch hier zu relevanten Immissionen.
- Die starke Abhängigkeit der Ausrichtung eines Messpunktes zur Sendeantenne bezüglich der Höhe (Haupt- oder Nebenstrahlrichtung) lässt sich besonders gut in Dortmund beobachten: An einem weiter entfernten Messpunkt (DO 2.3, 80 m) wurden höhere Immissionen gemessen (Hauptstrahlrichtung) als an zwei wesentlich näher gelegenen Messpunkten (DO 2.1, 40 m, DO 2.2, 40 m). Von diesen beiden ist der tiefer gelegene deutlich schwächer exponiert.
- Im allgemeinen zeigen die Messergebnisse, dass an Orten mit direkter Sicht zur Anlage höhere Immissionen vorliegen als an Orten vergleichbarer Entfernung und Lage ohne Sicht. Hierbei gibt es aber ein paar bemerkenswerte Ausnahmen: Beispiele sind KR 2.2 und KR 1.4, die 110 m bzw. 80 m von der Anlage entfernt sind und keine direkte Sicht haben. Durch Reflexion, Beugung oder direkte Ausrichtung zu einem Sektor bzw. zur Hauptstrahlrichtung sind die Immissionen hier jedoch höher als an vergleichbaren oder sogar näher gelegenen Orten mit direkter Sicht (z.B. DO 2.3, BN 3.3).
- Sehr oft ist die Einschätzung zu hören, dass aufgrund der leuchtturmartigen Abstrahlcharakteristik der Sendeantennen, verbunden mit der Dämpfung durch die Gebäudedecke, die Immission in Wohnungen direkt unter den Sendeantennen am geringsten im Vergleich mit umliegenden, auch weiter entfernten Orten sei. Die hier ermittelten Messungen zeigen, dass dies oftmals so sein kann, aber *keineswegs pauschal immer gilt*. Zum Beispiel wurden an den Messpunkten AC 2.2 D 1.3, D 1.4, KR 1.1, AC 3.1 und MS 2.1 Immissionen

gemessen, die wesentlich größer als an den Messpunkten BI 1.1, BI 2.1, BI 3.3 und DO 1.1 sind. Trotzdem liegen auch diese Immissionen weit unter den Grenzwerten der 26. BImSchV und sogar unter den Schweizer Vorsorgewerten. Es wird betont, dass es sich hierbei eindeutig *nur um Immissionen durch die Anlage auf dem Dach* handelt. Immissionen umliegender Anlagen wurden ausgeklammert. Eine vergleichende Aufstellung hierzu ist in Abb. 4.7 gegeben.

Prinzipiell sind diese Erkenntnisse nach den in Kapitel 3.2 untersuchten Einflussfaktoren nicht gänzlich unerwartet: Schon anhand von z.B. Bild 3.11 wurde abgeschätzt, dass die Immissionen direkt unter der Anlage bei verschiedenen Antennen aufgrund der Nebenkeulen relevante Werte annehmen können. Hier ist allerdings noch zusätzlich die Dämpfung des Dachmaterials einzubeziehen.

Es wird hierbei als interessant erachtet, im Rahmen einer separaten Untersuchung den Grund bzw. die Einflussfaktoren zu identifizieren, die dafür verantwortlich sind, dass die Immission in der Wohnung direkt unter der Anlage sehr unterschiedlich, d.h. bis zu drei Zehnerpotenzen bezüglich der elektrischen Leistungsflussdichte, variieren können. Nach gegenwärtiger Erkenntnislage können folgende Faktoren in Betracht kommen:

- Die Sendeantennen bzw. ihre Abstrahlcharakteristik: Hierbei gibt es, wie in Kapitel 3.2 gezeigt, erhebliche Unterschiede bezüglich der Abstrahlung nach unten;
  - Das Material des Daches; sicherlich machen sich die unterschiedlichen Dämpfungswerte von einer Stahlbetondecke im Vergleich zu einem Ziegeldach bemerkbar;
  - Die Antennenkonstruktion; hier ist unter Umständen relevant, ob die Antennen direkt auf dem Dach mit nur einigen zehn Zentimetern Abstand zwischen Antennenunterkante und Dachhaut steht, oder ob die Antennen auf einem Dachaufbau (z.B. für Fahrstuhlschacht) stehen, der eine zusätzliche dämpfende Wirkung hat;
  - Reflexionen an umliegenden Gebäuden, die dafür sorgen könnten, dass die Strahlung nicht durch das Dach, sondern durch das Fenster ins Rauminnere gelangt. Allerdings wurden relativ hohe Immissionen auch innerhalb von freistehenden oberen Etagen gemessen, bei denen Reflexionen durch umliegende Gebäude nicht relevant sind (z.B. AC 2.2, DO 3.2, KR 1.1);
  - Beugungserscheinungen von nahe am Dachrand installierten Antennen an der Dachkante ins Gebäudeinnere des darunter liegenden Geschosses;
  - Evtl. auch Einkopplungen in metallische Dachkonstruktionen (Rohre, Leitungen) und Sekundärabstrahlung von diesen.
- Im allgemeinen könnte man davon ausgehen, dass die Immissionen durch eine auf dem Dach betriebene Anlage innerhalb des Gebäudes nach tieferen Stockwerken hin wegen der größeren Gebäudedämpfung stetig abnimmt. Durch Reflexionen an umliegenden, ähnlich hohen Bauten kann sich dieser Sachverhalt aber umkehren. Ein Beispiel hierfür sind die Messpunkte BI 2.1-2.3, die innerhalb eines Hochhauses gemessen wurden, wobei andere gleich hohe Häuser in der näheren Umgebung standen. Direkt unter dem Dach sind die Immissionen durch die Hauptsendeanlage geringer als in der Gebäudemitte im 7. OG. Dies ist durch Reflexionen an den umliegenden Hochhäusern erklärbar. Im Gegensatz dazu stellt DO 3.1-3.4 ein *freistehendes* Hochhaus dar ohne ähnlich hohe Bauten in der Umgebung. Hier nimmt die Immission stetig mit der Geschosstiefe ab.



### **3.3.1.3 Vergleich der Mobilfunkimmissionen zu Immissionen durch andere HF-Quellen**

An einigen Messpunkten wurde zusätzlich zur Immission durch Mobilfunk Sendeanlagen auch die Immission durch andere HF-Quellen im Frequenzbereich 10 kHz bis ca. 3 GHz gemessen. Dieser Frequenzbereich umfasst insbesondere die leistungsstarken Sendeanlagen von Hörrundfunk (LW, MW, KW und UKW) sowie Fernsehrundfunk. Die Immissionen durch Hör- und Fernsehrundfunk gehören an vielen Messpunkten zu den stärksten Außer-Mobilfunkimmissionen.

Die Ergebnisse der Messungen sind in den Abb. 3.13 bis 3.17 enthalten. Durch die Gegenüberstellung zu den Mobilfunkimmissionen kann man die Relation der anderen HF-Immissionen einschätzen.

Das Ergebnis ist uneinheitlich: Es gibt sowohl Messpunkte, an denen andere HF-Immissionen dominieren, als auch solche, an denen eindeutig die Mobilfunkimmissionen dominieren. Dies ist verständlicherweise abhängig vom Vorhandensein eines leistungsstarken Nicht-Mobilfunksenders vor Ort.

Einige Ergebnisse sollen hier herausgegriffen werden:

- Am Messpunkt AC 1.1 liegen die Mobilfunkimmissionen über dem Durchschnitt; andere HF-Immissionen sind allerdings noch größer. Sie stammen hier zum überwiegenden Teil von einer Amateurfunkanlage, die am selben Mast installiert ist wie auch die Mobilfunkantennen. Diese Anlage kann mit unterschiedlichen Leistungen in drei Frequenzbändern senden; hier wurden als worst case die maximal möglichen Immissionen aller drei Bänder addiert.
- In ca. 1 km Entfernung vom Messpunktes BI 1.1 steht die Hör- und Fernsehrundfunk Sendeanlage Hünenburg. Die Immissionen durch diese Anlage überschreiten, obwohl am Messpunkt BI 1.1 keine direkte Sicht auf den Rundfunkturm besteht, die Mobilfunkimmissionen um mehr als den Faktor 100 bezüglich der elektrischen Leistungsflussdichte. Interessanterweise sind die diesbezüglichen Immissionen an tiefer gelegenen Messpunkten des selben Standortes signifikant kleiner.
- Auch am Messpunkt SI 1.1 sind auf dem Mast der Mobilfunkantennen Rundfunkantennen mit installiert. Die Immissionen übersteigen die vom selben Mast ausgehenden Mobilfunkimmissionen.
- Zu signifikanten Immissionen durch andere HF-Quellen kommt es auch am Standort AC 2.2 in der obersten Etage eines Wohnhauses. Aufgrund der exponierten Lage sind solche Messpunkte oftmals insgesamt höheren Immissionen ausgesetzt, die u.U. von der Anlage auf dem Dach (siehe oben), mit Sicherheit aber auch von umliegenden Mobilfunk- und anderen HF-Sendeanlagen stammt, die man in tieferen Geschossen des selben Hauses nicht mehr "sieht".
- An vielen anderen Messpunkten, wie z.B. BI 2.1-2.3, BN 1.1, BN 2.1, DO 2.1, DO 3.1 D 1.3-1.4 und D 2.1 sind die Mobilfunkimmissionen signifikant größer als andere HF-Immissionen. Entscheidend für die Relation von Mobilfunk- zu anderen Immissionen ist wie erwähnt der Fakt, wie dicht sich der Messpunkt an den jeweiligen Sendeanlagen (Mobilfunk oder andere HF) befindet. In einem Großstadtinnenbereich, z.B. Düsseldorf, beträgt der typische Abstand zwischen zwei Basisstation nur wenige Hundert Meter, wohin-

gegen direkt im Stadtzentrum kaum leistungsstarke andere Sendeanlagen stehen. Von daher ist an solchen Messpunkten mit einer Dominanz der Mobilfunkimmissionen zu rechnen. Die Situation kehrt sich um auf ländlichem Gebiet oder im Stadtrandgebiet, wo die Zellgrößen bei Mobilfunk größer werden und andererseits Rundfunk-Füllsender oder sogar Grundnetzsender vorhanden sind, die obschon weiter entfernt, einen sehr viel größeren Immissionsbeitrag am Messpunkt liefern können.

### 3.3.1.4 Immissionen durch Schnurlostelefone nach dem DECT Standard

Bei den anderen HF-Immissionen im letzten Abschnitt sind DECT Anlagen ausgeklammert worden, weil sie keine "externen" Sendeanlagen darstellen, sondern als "interner Sender" in Wohnungen betrieben werden. An einigen Messpunkten innerhalb von Wohnungen konnten neben den Mobilfunkimmissionen und externen HF Quellen auch Immissionen durch DECT Telefone in der Wohnung (und in angrenzenden Wohnungen oder Gebäuden) gemessen werden. Abb. 3.18 stellt die Immissionen durch DECT denjenigen von Mobilfunk (Hauptsendeanlage) gegenüber. Hierbei handelt es sich jedoch nicht um ein Querschnitt über alle Messpunkte, sondern es wurden nur an denjenigen Messpunkten DECT Immissionen aufgenommen, an denen diese *signifikant* waren.

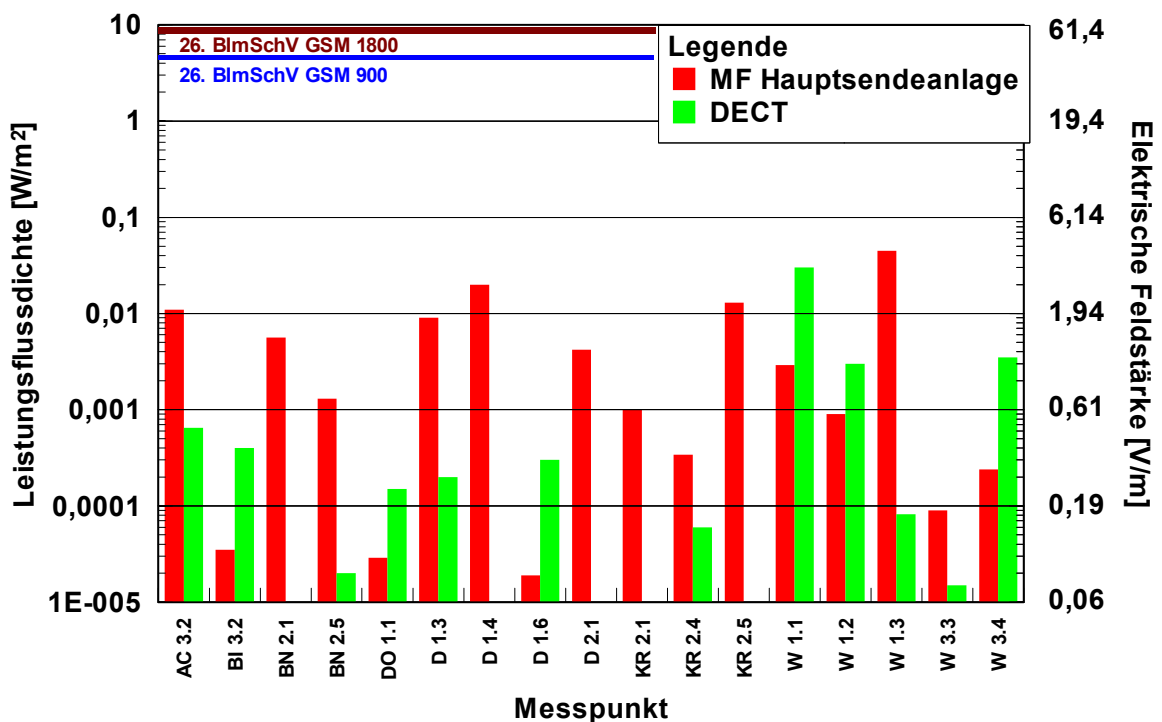


Abb. 3.18 Vergleich von Immissionen durch die Mobilfunk Hauptsendeanlage und DECT in Wohnungen

Abb. 3.18 zeigt, dass in Abhängigkeit vom verwendeten Gerätetyp der DECT Anlage und der Ausrichtung des Messpunktes die Immissionen durch DECT ähnlich groß oder sogar erheblich größer sein können als durch die benachbarte Mobilfunk Hauptsendeanlage.

### 3.3.2 Spezialfall: Freistehende Anlage

Innerhalb des Projektes wurden detailliertere Untersuchungen an freistehenden Anlagen durchgeführt. Insbesondere interessierte dabei die Abstandsabhängigkeit der Immission. Bei einer völlig freistehenden Anlage, wie typischerweise auf dem Lande vorhanden, werden sich keine Reflexionen oder Dämpfungen durch Sichthindernisse im Ausbreitungsweg bemerkbar machen; dies stellt einen wesentlichen Unterschied zur Situation in einem innerstädtischen Gebiet dar.

Abb. 3.19 zeigt eine erste untersuchte Konfiguration eines freistehenden Mastes: Feldweg und Grasweg bilden einen Winkel von etwa 90°. Die diesen Sektor ausleuchtende Basisstationsantenne ist schräg in den durch Feldweg und Grasweg aufgespannten Sektor gerichtet; zeigt jedoch etwas mehr in Richtung Feldweg. Die Höhe der Antenne ist ca. 36 m über Grund.

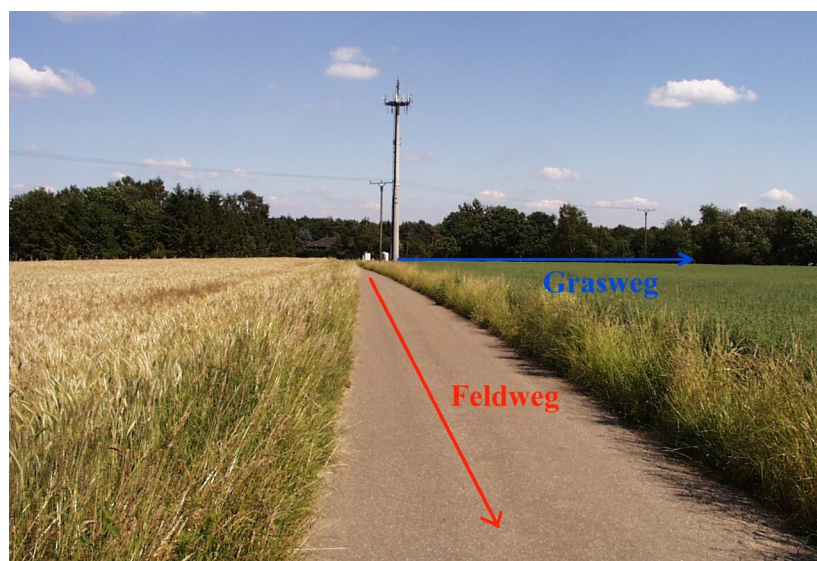


Abb. 3.19 Untersuchte Konfiguration für den Spezialfall "Freistehende Anlage"

Die Messungen wurden mit dem frequenzselektiven Spektrumanalysator durchgeführt; es wurde nur die Immission derjenigen Sektorantenne aufgenommen, die für den zu untersuchenden Sektor interessant war. Außerdem wurde nur die Immission des ersten Kanals (BCCH), der ohne Leistungsregelung arbeitet, berücksichtigt.

Die Messungen wurden in Schritten von 10 m durchgeführt. Nullpunkt ist jeweils der Mast. Auf dem Grasweg konnte ortsbedingt die Immissionen nur bis zu einer Entfernung von 160 m aufgenommen werden, auf dem Feldweg hingegen bis 250 m. In anderen Raumrichtungen konnte wegen der angrenzenden Felder nicht gemessen werden.

Abb. 3.20 zeigt das Ergebnis:

Durch die logarithmische Darstellung sehen die äquidistanten 10 m Schritte bei unterschiedlichen Abständen unterschiedlich gedehnt aus. Die logarithmische Darstellung wurde aber deswegen gewählt, um eine Vergleichbarkeit mit den Abschätzungen nach Kapitel 3.2 zu erreichen. Die Punkte, an denen Messwerte aufgenommen wurden, sind mit Datenmarkern gekennzeichnet.

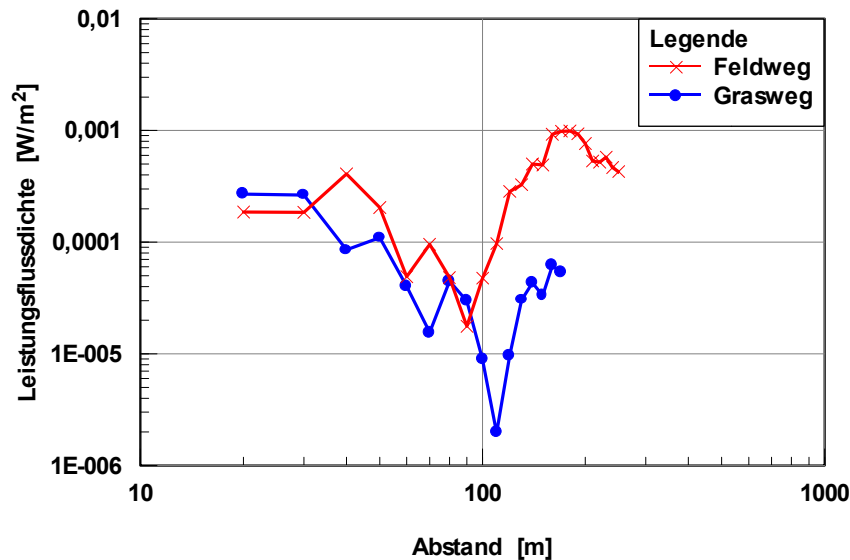


Abb. 3.20 Ergebnisse der Messung an der freistehenden Anlage nach Abb. 3.19

Der prinzipielle Verlauf der Leistungsflussdichte über der Entfernung, wie ihn z.B. Abb. 3.5 theoretisch vorgibt, findet sich in der Realität wieder. Auf dem Feldweg ist bis zu einem Bereich von etwa 100 m sehr gut der Einfluss der Nebenzipfel, der zu einem unruhigen Verlauf der Immission führt, zu sehen. Danach beginnt die Hauptstrahlrichtung; ab ca. 170 m nimmt die Immission gleichmäßig ab.

Beim Feldweg ist der Verlauf prinzipiell ähnlich; hier endet die Kurve jedoch gerade beim Beginn der Hauptstrahlrichtung. Die gemessenen Immissionen liegen insgesamt etwas niedriger als beim Feldweg. Dies ist erklärbar aus der Tatsache, dass der Grasweg durch die Sektorantenne etwas schlechter ausgeleuchtet war als der Feldweg. Außerdem können sich hier bereits abschattende Einflüsse der Baumreihe direkt am Grasweg bemerkbar machen. Außerdem scheinen die Maximal- und Minimalwerte im Bereich der Nebenzipfel von ihrer Lage etwas verschieden zu sein. Hierfür ist sicherlich verantwortlich, dass das Richtdiagramm der Sektorantenne nicht bei allen Azimutwinkeln die selbe Nebenzipfelcharakteristik (Elevationschnitt) aufweist, sondern unsymmetrisch ist.

Eine weitere Messung einer freistehenden Anlage wurde an den Messpunkten BN 1.1-1.2 durchgeführt. Hierbei ist die betrachtete Sektorantenne in ca. 15 m (Unterkante Antenne) über Grund montiert. Die Immission wurde auf einer Linie aufgenommen, die ca. 10° abseits der Hauptstrahlrichtung ist. Abb. 3.21 zeigt das Ergebnis.

Drei Beobachtungen sind bemerkenswert, die die Richtigkeit der Abschätzungen von Kapitel 3.2 unterstreichen: Durch die geringere Anlagenhöhe (ca. 15 m in Abb. 3.21 im Vergleich zu ca. 36 m in Abb. 3.20) ist der Bereich, der von der Hauptstrahlrichtung erfasst wird, wesentlich näher an die Antenne gerückt (vgl. hierzu Abb. 3.7). Gleichzeitig ist die Immission größtmäßig kleiner als von der zuerst betrachteten Anlage, was auf eine geringere Kanalsendeleistung, geringeren Downtilt oder auf einen geringeren Gewinn der Antenne hindeutet. Außerdem erscheinen bei der zweiten Anlage die Immissionen im Bereich der Nebenzipfel stärker als im Hauptstrahlungsbereich.

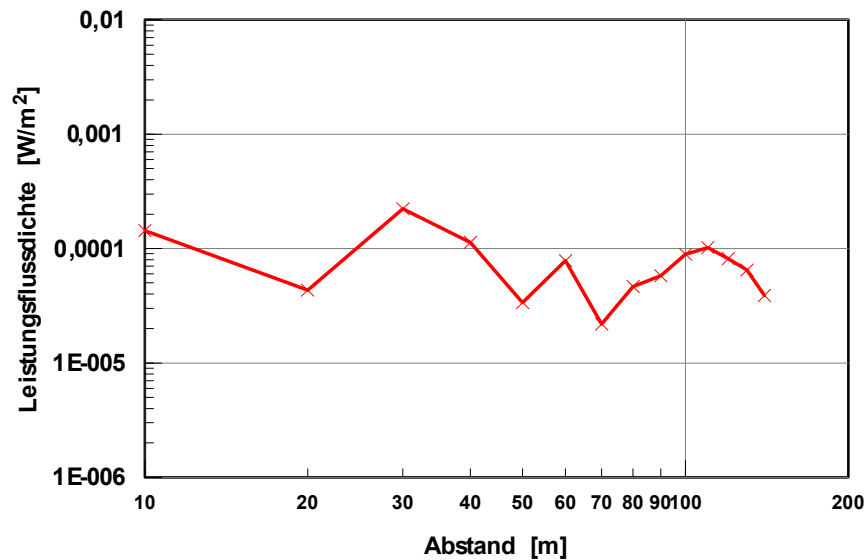


Abb. 3.21 Ergebnisse der Messung an der Freistehenden Anlage am Messpunkt BN 1.1-1.2

Als drittes Beispiel wurden in einem Vorgängerprojekt [KUN 01], wenn auch unter anderer Zielsetzung, ähnliche Untersuchungen in *innerstädtischem* Gelände durchgeführt, wobei hier die Immissionen über einen größeren Abstand von der Quelle aufgenommen wurden. Eine mobilfunkähnliche Antenne wurde dabei auf ein Gebäude von etwa 12 m Höhe montiert. Die Antenne hatte eine sehr breite Öffnung in der Elevation ( $27^\circ$ ). Dies kann als übliche Mobilfunkantenne mit einem sehr starken Downtilt aufgefasst werden; hierdurch wäre ein weiteres Vorrücken des Hauptstrahlrichtungsbereiches hin zu kleineren Abständen zu erwarten.

Abb. 3.22 links zeigt als Übersicht das gemessene Szenario. Die Strahlrichtung der Antenne ist eingezeichnet; sie ist nicht genau entlang der Route gerichtet. Abb. 3.22 rechts zeigt einen Blick von der Sendeantenne entlang der gemessenen Route. Entlang der Route war die Antenne jeweils sichtbar, so dass es sich auch hier um eine "freistehende Anlage" handelt.

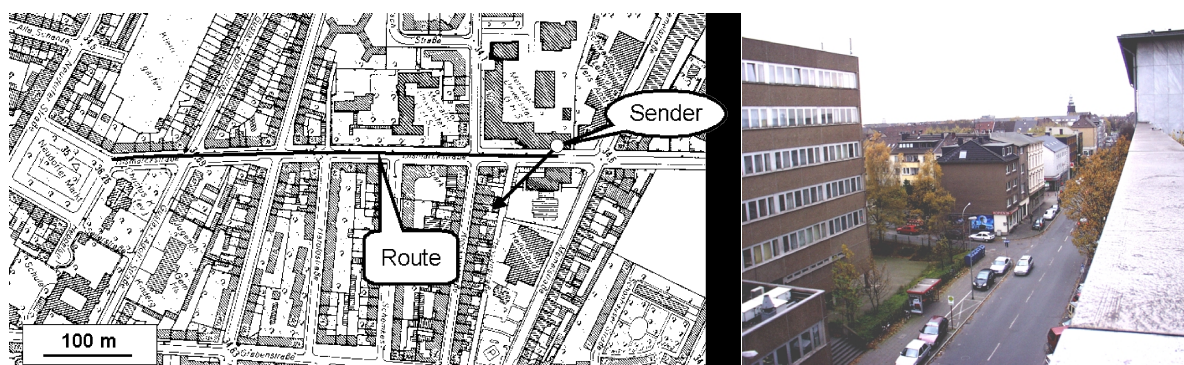


Abb. 3.22 Gemessene Route (links) und Blick vom Senderort entlang der Route (rechts)

Das Messergebnis ist in Abb. 3.23 dargestellt:

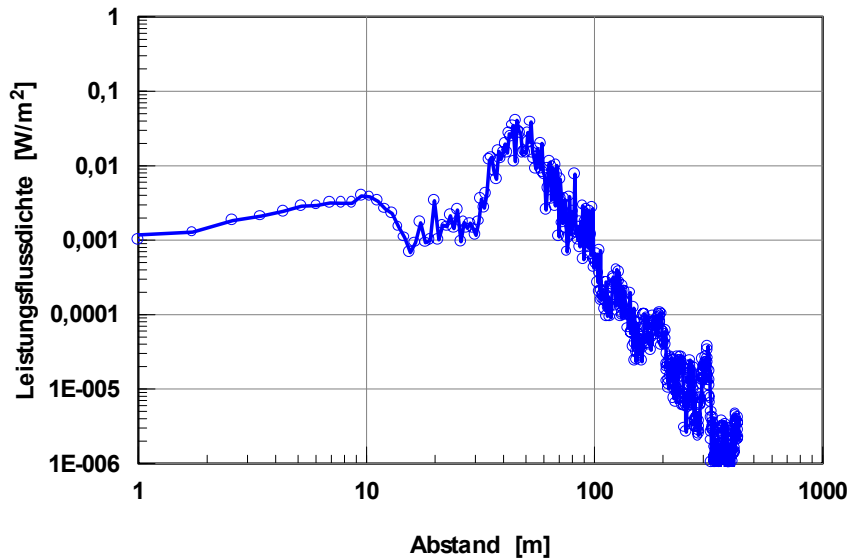


Abb. 3.23 Messergebnis für das Messszenario aus Abb. 3.22

Aufgrund der Tatsache, dass die verwendete Antenne im Nebenzipfelbereich ( $180^\circ$  bis etwa  $100^\circ$ , siehe Abb. 3.3) nur einen dominanten Nebenzipfel aufweist, sind die Schwankungen im Entfernungsbereich vor der Hauptstrahlrichtung (1 m bis ca. 30 m) diesmal nicht stark ausgeprägt. Durch den starken Downtilt beginnt die Hauptstrahlrichtung schon in ca. 45 m Entfernung von der Antenne. Sehr gut ist der gleichmäßige Abfall der Leistungsflussdichte für größere Entfernungen zu erkennen. Der Abfall ist etwa proportional mit  $d^{-4,6}$ , wobei  $d$  der Abstand ist.

### 3.3.3 Spezialfall: Wohnung

Neben der Messung der Immission im Umfeld einer freistehenden Anlage stellt die Messung der Immission *in einer Wohnung* einen weiteren typischen Fall dar. Oft ist die Feststellung der Immission innerhalb von Wohnungen sogar der weitaus häufigere und interessierendere Fall, da Wohnungen im Gegensatz zum Freiraum Orte sind, an denen nicht nur mit vorübergehendem Aufenthalt von Personen gerechnet werden muss. Faktisch ist die überwiegende Anzahl der in diesem Projekt durchgeführten Messungen in Innenräumen vorgenommen wurden.

Die Immissionsverteilung in Innenräumen unterscheidet sich stark von der im Freiraum mit Sicht zur Anlage und ungehinderter Wellenausbreitung. Das liegt in erster Linie daran, dass in Innenräumen folgende Vorgänge eine Rolle spielen:

- **Dämpfung:** Wenn keine direkte Sicht zur Anlage besteht, wird die Strahlung der Mobilfunkanlage an Wänden, Decken oder anderen Sichthindernissen gedämpft. Die Dämpfung ist abhängig von der Art des Hindernisses (vor allem Material und Dicke) und vom Einfallswinkel der Strahlung.
- **Reflexion:** Die Strahlung einer Mobilfunkanlage gelangt gerade in städtischen Gebieten nicht allein über einen direkten Weg (mit eventuellen Dämpfungen durch Sichthindernisse) zum Immissionsort, sondern wird an zahlreichen feststehenden (Gebäude o.ä.) und

beweglichen (Autos o.ä.) Objekten reflektiert und zum Immissionsort geleitet. Diesen Vorgang nennt man Mehrwegeausbreitung. Durch den Wegunterschied der einzelnen Ausbreitungspfade überlagern sich die Wellenanteile mit einem den Wegunterschied repräsentierenden Phasenunterschied. Dieser ist von Immissionsort zu Immissionsort verschieden und kann (bewegte Reflexionsobjekte) auch zeitlich variieren. Das führt dazu, dass die Immission ortsabhängig und zeitabhängig stark schwanken kann (Fading).

Ein Spezialfall ist die Bildung stehender Wellen durch Reflexionen an Wänden und Überlagerung mit der einfallenden Welle, was ebenfalls zu einer starken örtlichen Schwankung der Immission führt.

- **Beugung:** An (Gebäude-) Kanten werden elektromagnetische Wellen gebeugt; somit kann auch dann eine relevante Immission an einem Ort vorliegen, der keine direkte Sicht zum Sender hat.

Um einen Eindruck von der Größenordnung möglicher kleinstskaligen Variationen der Immissionen in Innenräumen zu bekommen, wurden detaillierte Messungen in einem Innenraum durchgeführt. Hierbei ist zu beachten, dass die Person des Messenden an sich auch wesentlich zur Verzerrungen und Unregelmäßigkeiten im Immissionsverlauf beiträgt. Um diesen Faktor auszuschließen, wurde quasi unter Laborbedingungen mit einem automatischen Scannersystem gearbeitet, das in einem Innenraum auf einer Strecke von 1,36 m in Schritten von 2 cm die Immission aufnahm und protokollierte. Die Sendeantenne (1,9 GHz, vergleichbar mit GSM 1800) befand sich im gleichen Gebäude eine Etage höher. Die Empfangsantenne hatte eine omnidirektionale Richtcharakteristik, um aus unterschiedlichen Raumrichtungen einfallende Signale exakt berücksichtigen zu können.

Abb. 3.24 zeigt den Verlauf der Leistungsflussdichte über den abgescannten Bereich. Deutlich sind die ortsabhängigen, kleinstskaligen Schwankungen zu erkennen, die durchaus einen Faktor 100 (bezüglich der Leistungsflussdichte) ausmachen können. Die absoluten Werte sind bei dieser Messung nicht von Belang, sondern nur die relativen Schwankungen.

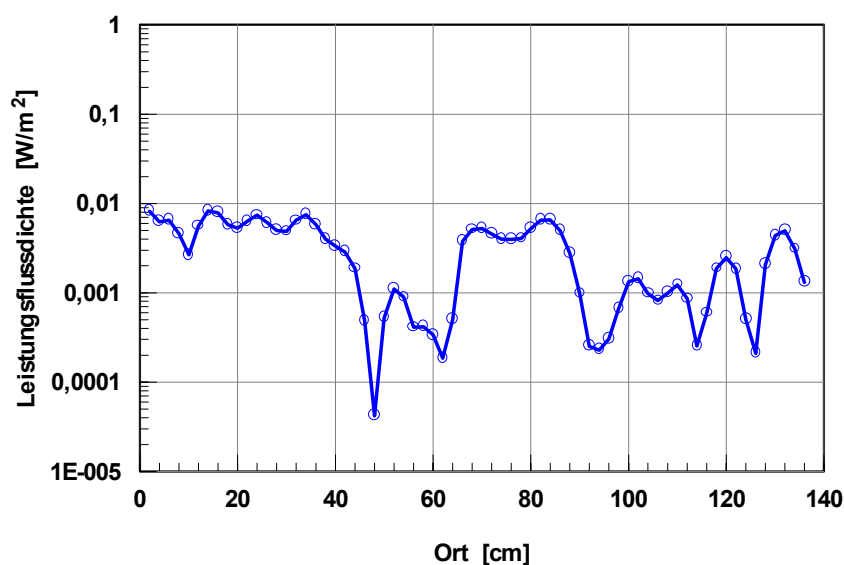


Abb. 3.24 Immissionsverlauf in einem Innenraum über einer Strecke von 1,36 m; Frequenz 1,9 GHz

Die hier dokumentierten Schwankungen bestätigen die Notwendigkeit, bei der Messung der Immissionen vor allem in Innenräumen eine geeignete Methodik zur Ermittlung des Maximums anzuwenden (z.B. Schwenkmethode mit Max Hold, siehe [EMF 2]).

Wie eingangs bemerkt, spielen bezüglich der konkret vorliegenden Immissionssituation vor allem in Innenräumen die Dämpfungen von Gebäudematerialien eine wichtige Rolle. Allerdings sind Dämpfungsmessungen in Innenräumen mit einem großen Fehler behaftet. Es ist nur sehr eingeschränkt möglich, an einem Messpunkt, der freie Sicht (Fenster) zur Sendeanlage hat, die Immission zu ermitteln und mit derjenigen zu vergleichen, die 2 m weiter seitlich vorliegt, wo eine Raumwand die Sicht zum Sender behindert und aus dem Unterschied die Dämpfung der Raumwand zu bestimmen. Ursache ist auch hierbei wieder der stark unregelmäßige Feldverlauf, so dass man beim ermittelten Immissionsunterschied zwischen Fenster/Wand nicht sagen kann, ob tatsächlich die Wand dafür verantwortlich war oder man bei der Messung an der Wand gerade ein Minimum der schwankenden Immissionskurve gefunden hat. Solche Dämpfungsbestimmungen sind deswegen besser unter Laborbedingungen, z.B. in einer Absorberkammer oder in einem Wellenleitersystem zu bestimmen, wo Fehler durch umliegende Reflexionen begrenzt werden können.

Eine sehr umfangreiche und praxisrelevante Abhandlung zu solchen Messungen unter Laborbedingungen und den dabei erzielten Ergebnissen enthält z.B. [PAU 00]. Auch in [BOR 98] gibt es diesbezügliche Aussagen; hier sind aus messtechnisch ermittelten Materialparametern Dämpfungsberechnungen durchgeführt worden.

Schließlich gibt es unter dem Vorbehalt des oben Gesagten einige Erfahrungswerte der zahlreich durchgeführten Messungen: So dämpft normales Fensterglas bei senkrechtem Einfall der Mobilfunkstrahlung (Anlage direkt sichtbar) nicht nennenswert; beschichtetes Fensterglas jedoch (z.B. in klimatisierten Büros) kann hingegen 20 dB bis 30 dB Dämpfung aufweisen (dies entspricht einem Faktor von 100 bis 1000 bezüglich der Leistungsflussdichte). Eine Gebäudeaußenwand hat typischerweise Dämpfungen im Bereich von 5 dB bis 10 dB (Faktor 3 bis 10). Diese Angaben gelten nur für den mobilfunktypischen Frequenzbereich.

Eine weitere Beobachtung aus der Messpraxis ist, dass, vor allem bei größeren Abständen zur Anlage und direkter Sicht, die Immission an der der Anlage zugewandten Balkon- oder Fensterseite am größten ist und ins Rauminnere sehr schnell abnimmt. Auf der abgewandten Wohnungsseite ist die Leistungsflussdichte oft um den Faktor 10 bis 100 kleiner. Diese Feststellung gilt jedoch nicht immer: Bei den Messungen wurde an einigen Orten mit *geringer* Entfernung zur Antenne (einige zehn Meter) festgestellt, dass die Immissionsverteilung innerhalb der gesamten Wohnung nicht den typisch starken Abfall vom Fenster in Rauminnere aufwies und die Immission auch an der abgewandten Wohnungsseite noch signifikant war.



### 3.3.4 Langzeitmessung

#### 3.3.4.1 Hintergrund der Langzeitmessung

Wohingegen eine *Augenblicksmessung* (mit Spektrumanalysator oder Breitbandmessgerät) in der Regel nur eine Aussage über den zum momentanen Messzeitpunkt herrschenden Immissionswert geben kann und die *Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung* einen worst case Wert ergibt, der in der Regel selten oder überhaupt nicht erreicht wird, ist es vielfach von Interesse, eine Aussage über die aktuelle Immissionssituation über einen längeren Zeitraum, z.B. über ein 24 Stunden Intervall zu bekommen. Hieraus lassen sich Aussagen darüber ableiten, wann mit hohen und wann mit niedrigen Immissionen zu rechnen ist und welche Faktoren darin eingehen.

Eine Langzeitmessung macht vor allem deswegen Sinn, weil sich bei vielen Anlagen in der Tat die durch sie verursachten Immissionen an einem festen Messort mit der Zeit ändern können. Hierfür gibt es vor allem zwei Gründe:

1. Bei GSM ist bei mehrkanaligen Sendeanlagen ist ab dem zweiten Kanal eine sog. intelligente Leistungsregelung integriert, die dafür sorgt, dass
  - nur dann gesendet wird, wenn Gespräche zu übertragen sind,
  - in Gesprächspausen das Sendesignal ausgetastet wird (sofern DTX = Discontinuous Transmission aktiviert),
  - nur in denjenigen Zeitschlitz gesendet wird, in denen ein Gespräch läuft, und
  - die Sendeleistung von Zeitschlitz zu Zeitschlitz unterschiedlich sein kann entsprechend der Verbindungsqualität zwischen Handy und Basisstation (intelligente Leistungsregelung).

UMTS Anlagen verfügen ebenfalls über eine Leistungsregelung.

2. Beim Mobilfunk gelangen die Signale der Basisstation in der Regel auf verschiedenen Wegen, z.B. direkter Pfad, indirekter Pfad durch Reflexionen an Gebäuden und Gegenständen usw. zum Immissionsort (Mehrwegeausbreitung). Verändern sich die Ausbreitungsbedingungen, z.B. durch Bewegung von Personen und Autos, kann dadurch die Immission an einem festen Punkt zeitlich sehr stark schwanken (Fading).

Um einen Eindruck von den zeitlichen Änderungen der Immissionen zu bekommen, wurde für vorliegendes Projekt eine 24 Stunden Messung durchgeführt.

#### 3.3.4.2 Durchführung der Messung

Bei einkanaligen Anlagen werden vor allem bei Immissionsorten in unmittelbarer Nähe der Anlage die zeitlichen Schwankungen eher gering sein, da die Immission durch den BCCH-Kanal vorgegeben ist, dessen Sendesignal aber nicht mit der Zeit schwankt. Um einen deutlichen Einfluss der Leistungsregelung sichtbar zu machen, wurde für die 24 Stunden Messung eine Station herausgesucht, bei der drei Netzbetreiber jeweils eine Anlage mit je zwei bis drei Sektoren und zwei bis vier Kanälen pro Sektor betreiben.

Die Messung wurde mit einem Breitbandmessgerät durchgeführt. Wegen der Empfindlichkeitseinschränkungen typischer Breitbandmessgeräte [EMF 2] wurde ein Messpunkt herausgesucht, an dem die Immissionen deutlich über der Empfindlichkeitsschwelle des Messgerätes lagen. Ein Breitbandmessgerät wurde deswegen verwendet, da einige dieser Geräte über eine automatisierte Messwertaufnahme über einen bestimmten Zeitraum und Abspeicherung in einen internen Messwertspeicher verfügen. Spektrumanalysatoren verfügen im Allgemeinen über diese Möglichkeit nicht; hierfür wäre zusätzlich eine entsprechende aufwändige Messgerätesteuere- und -auswertesoftware zu entwickeln.

Für die Messungen wurde das Gerät EMR-300 mit E-Feld Sonde Typ 8 der Firma Wandel & Goltermann verwendet. Über einen Zeitraum von 24 Stunden wurde in äquidistanten Zeitschritten von jeweils einer Minute ein (Augenblicks-) Messwert aufgenommen.

### ***3.3.4.3 Messergebnis und Auswertung***

Abb. 3.25 zeigt das Ergebnis der Messung. Als Immissionsgröße ist hier die elektrische Feldstärke dargestellt. Die diskret aufgenommenen Messwerte sind nicht durch Linien verbunden, sondern als Punkte dargestellt.

Folgende Trends lassen sich ablesen:

1. Es kann eine deutliche tageszeitliche Schwankung nachgewiesen werden. In der Zeit zwischen etwa 2 Uhr nachts und 6 Uhr morgens ist die Immission auf einem gleichbleibend niedrigen Pegel. Sie scheint als eine Art "Grundbelastung" nur durch die Aussendungen der BCCH Kanäle bestimmt zu sein. Starke Schwankungen gibt es in dieser "Ruhezeit" nicht.
2. Insgesamt sind die Immissionen zwischen 10 Uhr vormittags und 22 Uhr abends auf einem wesentlich höheren Niveau. Die höchsten Immissionen wurden in der Zeit zwischen 16 Uhr und 18 Uhr am Nachmittag gemessen. In der gesamten Zeit zwischen 10 Uhr und 22 Uhr schwankt die Immission zeitlich sehr stark, was einerseits auf eine aktive Leistungsregelung und auf Fadingeffekte hinweist, andererseits aber auch die Notwendigkeit unterstreicht, keine kurzzeitigen Augenblicksmessungen mit dem breitbandigen Feldstärkemessgerät als ausreichend zu betrachten, sondern entweder Langzeitmessungen durchzuführen oder die gemessenen Augenblickswerte auf die Immissionen bei maximaler Anlagenauslastung zu extrapolieren [EMF 2].

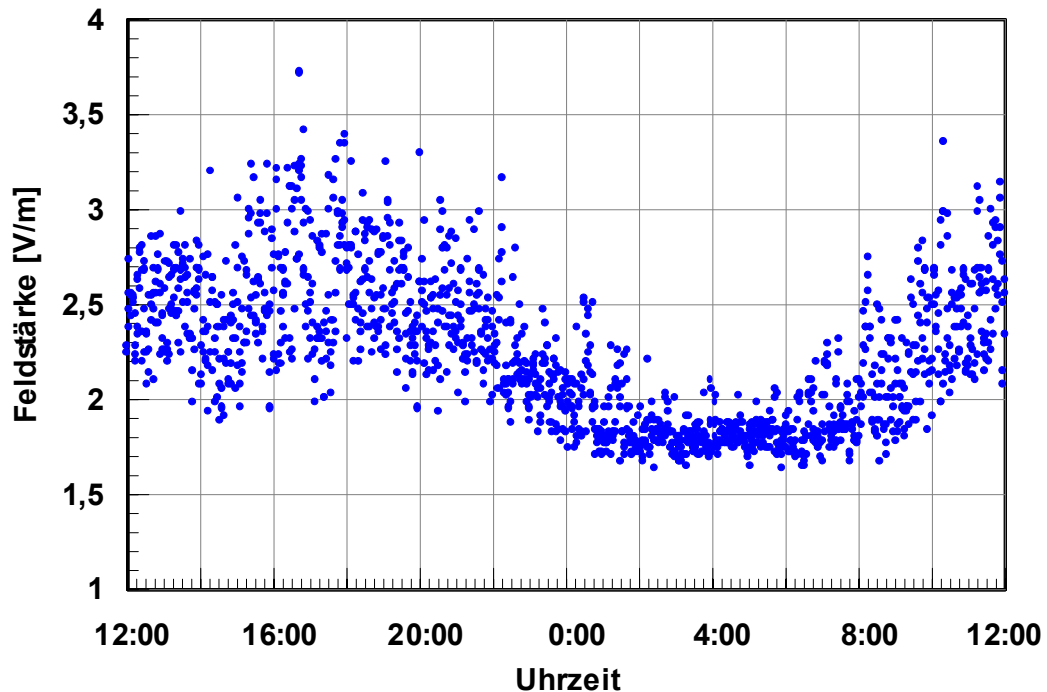


Abb. 3.25 Feldstärkeschwankungen an einem fixen Messpunkt innerhalb eines 24 Stunden Intervalls. Der zeitliche Mittelwert beträgt etwa 2,3 V/m

#### 3.3.4.4 Kontinuierliches Feldstärkemonitoring

Die interessanten Ergebnisse der 24 Stunden Messung legen die Idee einer über 24 Stunden hinausgehenden Messung im Sinne eines kontinuierlichen Monitorings nahe. 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 sichere 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.

Die Möglichkeit eines solchen Monitorings wird auch explizit in der freiwilligen Selbstverpflichtung der Netzbetreiber vom 07. Dezember 2001 sowie im darauf aufbauenden Positionspapier der Bundesregierung vom 10.12.2001 angesprochen.

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 in erster Linie, dass aus Kostengründen als Messgeräte *Breitbandmessgeräte* verwendet werden müssen. Diese haben, wie bereits in [EMF 2] dargelegt, oftmals eine Empfindlichkeitsschwelle von etwa 1 V/m. Das bedeutet, dass die kontinuierlich aufgenommene Immissionslinie nur dann "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 Punkte gewählt, d.h. Punkte innerhalb von Kindergärten, Schulen o.ä. Diese liegen oftmals in einer solchen Orientierung zur Sendeanlage, dass die 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.
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.

Ein kontinuierliches Feldmonitoring macht deswegen nur dann Sinn, wenn Messpunkte gefunden werden können, die sowohl im Mittelpunkt des Interesses betroffener Gruppen stehen, als auch Immissionen aufweisen, die deutlich über der Dynamikschwelle der verwendeten Feldstärkemessgeräte sind. Bei Nichtzutreffen auch nur eines der beiden Kriterien sinkt die Akzeptanz für ein solches Monitoring; und es muss hinterfragt werden, ob Einzelmessungen nicht die sinnvollere und kostengünstigere Variante sind.

### **3.3.5 Zusammenfassung**

1. Die messtechnisch ermittelten Immissionen in den am Projekt beteiligten Kommunen zeigen eine große Schwankungsbreite von fünf Zehnerpotenzen bezüglich der elektrischen Leistungsflussdichte. Die für Deutschland gesetzlich festgelegten Grenzwerte der 26. BImSchV werden an allen Messpunkten deutlich unterschritten. Allerdings sind die Immissionen an einigen ausgewählten Orten immerhin so groß, dass die Vorsorgewerte der Schweizer NISV für Orte mit empfindlicher Nutzung nahezu erreicht oder in einem Falle sogar überschritten werden.
2. Die höchsten Werte wurden dort erreicht, wo der laterale Abstand zur Anlage minimal war und sich der Messpunkt fast auf gleicher Höhe mit den Sendeantennen befand.

3. Aus den Ergebnissen lässt sich ersehen, dass Reflexionen und Beugungserscheinungen an umliegenden Gebäuden oftmals eine wichtige Rolle spielen, so dass auch Messpunkte, die an sich keine direkte Sicht haben, relevante Immissionen aufweisen können.
4. Ein interessantes Ergebnis der Messungen ist die Tatsache, dass auch an Orten direkt unterhalb der Anlage (darunter liegende Wohnungen) die Spannbreite der gemessenen Immissionen sehr groß ist; sie umfasst mehr als drei Zehnerpotenzen bezüglich der Leistungsflussdichte. Somit kann nicht pauschal davon ausgegangen werden, dass in diesen Wohnungen die Immission grundsätzlich wesentlich geringer ist als bei anderen Punkten im Umfeld der Anlage. Gründe für diese Beobachtung können in den verwendeten Antennen, in Beugungserscheinungen sowie im unterschiedlichen Dämpfungsverhalten von Dachmaterialien liegen. Es wird als sinnvoll erachtet, diese Tatsache näher zu untersuchen. Trotzdem wurden auch an diesen Stellen die Grenzwerte der 26. BImSchV sicher eingehalten und sogar die Schweizer Vorsorgewerte unterschritten.
5. Die große Schwankungsbreite der Messergebnisse zeigt, dass die relevanten Einflussfaktoren komplex zusammenwirken und nicht isoliert betrachtet werden dürfen.
6. Externe andere Hochfrequenzquellen, wie z.B. Sender vom Hör- und Fernsehrundfunk, können zu den Gesamtmissionen am Messpunkt einen relevanten Beitrag leisten und teilweise sogar höhere Immissionen erzeugen als durch eine nahegelegene Mobilfunkstation. Die Relation von externen HF-Immissionen und Mobilfunkmissionen ist stark davon abhängig, wie weit der nächste externe Sender steht bzw. ob sich der Messpunkt im Stadtinneren befindet (hohe Dichte von Mobilfunksendern, selten Rundfunksender innerhalb des Stadtgebietes) oder in Stadtrandgebieten bzw. in ländlichen Gebieten (geringere Dichte von Mobilfunksendern, andere HF-Sender häufiger möglich).
7. Eine leistungsstarke interne HF-Quelle innerhalb von Wohnungen ist das DECT Schnurlostelefon. Die dadurch verursachten Immissionen liegen häufig über denen von direkt angrenzenden Mobilfunkanlagen.
8. Bei exemplarischen Detailmessungen an freistehenden Anlagen können die rechen-technisch abgeschätzten, prinzipiellen Verläufe (starke Schwankungen im durch die Nebenzipfel ausgeleuchteten Bereich, gleichmäßiger Abfall im Hauptstrahlungsbereich) reproduziert werden. Ebenfalls gut nachweisbar sind der Einfluss von Masthöhe und Downtilt.
9. Die stark in Abhängigkeit des Ortes schwankenden Immissionen innerhalb von Innenräumen bestätigen die Notwendigkeit, zur Ermittlung der maximalen Immission eine geeignete Messmethodik zur Maximalwertsuche anzuwenden. Typische Dämpfungsparameter sind bei Vor-Ort Messungen nur sehr unzuverlässig zu ermitteln; hierzu sind Untersuchungen unter Laborbedingungen notwendig.
10. Eine 24-Stunden Messung zeigt eine interessante zeitliche Variation im Tagesverlauf. In der Umgebung der hier untersuchten mehrkanaligen Mobilfunkanlage sind deutliche Schwankungen der Immission in Abhängigkeit der Tageszeit zu beobachten. Nachts ist die Immission auf einen konstanten, niedrigen Pegel abgesunken. Die Höchstwerte sind in der Nachmittagszeit zu beobachten, schwanken aber sehr stark.

## 4 Typisierbarkeit

### 4.1 Hintergrund der Typisierung

Ein Schwerpunkt des Berichtes bildet die Auseinandersetzung mit der Frage der *Typisierbarkeit* von Mobilfunkanlagen. Hierbei wird untersucht, inwieweit sich Mobilfunkanlagen in bestimmte *Anlagenklassen* zusammenfassen lassen. Ziel ist es, eine Klassifizierung nach bestimmten Kategorien dergestalt vorzunehmen, dass eine *Übertragbarkeit* von typischen Immissionen im Umkreis der Anlage auf andere Anlagen des selben Typs ermöglicht wird. Sofern diese Möglichkeit besteht, würde eine solche Anlagenklassifizierung im Hinblick auf ein Immissionskataster zu einer deutlichen Vereinfachung der Betrachtung führen. Außerdem könnte hiermit den Kommunen eine Möglichkeit an die Hand gegeben werden, schon bei der Planungsvorlage durch die Netzbetreiber auf *vereinfachte* Art und Weise Abschätzungen über die spätere Immissionssituation vornehmen zu können.

Bei der Beurteilung der durch die Netzbetreiber vorgelegten Planungen für neue Anlagen sind seitens der Kommunen *aus technischer Sicht* vor allem zwei Fragen vordringlich:

1. Mit *welchen (ortsbezogenen) Immissionen* wird im Umkreis der geplanten Anlagen zu rechnen sein?
2. Wie kann das Anlagenkonzept gestaltet werden, so dass eine *Minimierung* der Immissionen (ortsbezogen und/oder insgesamt) erreicht wird? In der Praxis ist der Grad der Minimierung hierbei von Kommune zu Kommune derzeit sehr unterschiedlich gefasst: Wohingegen einige Kommunen generell schärfere Grenzwerte als die der 26. BImSchV ansetzen, wenden andere diese lediglich für "sensible Orte" an. Ein dritter Ansatz ist die generelle Forderung, die Immission "so gering wie möglich" zu halten, ohne jedoch von der 26. BImSchV abweichende Grenzwerte aufzustellen oder besondere Orte auszusparen.

Prinzipiell enthalten die in diesem Projekt durchgeführten Untersuchungen bereits eine ausführliche Beantwortung beider Fragestellungen: Typische ortsbezogene Immissionen im Umkreis der Anlage sind in Kapitel 3.2 theoretische abgeschätzt und in Kapitel 3.3 umfangreich messtechnisch dokumentiert worden. Möglichkeiten zur Reduzierung der ortsbezogenen und Gesamtmission sind in [EMF 1] ausführlich diskutiert.

Die Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass die Immissionen von einer Reihe von Einflussfaktoren abhängen, die komplex zusammenwirken und deswegen in vielen Fällen eine *Einzelfallprüfung* unumgänglich machen, sofern verlässliche Informationen über die konkret vorliegende Immissionssituation gefordert sind. Hier besteht seitens der Kommunen ein verständliches Interesse, den Anteil der Einzelfallprüfungen und damit den Gesamtaufwand für die Beurteilung der geplanten Anlagen stark einzugrenzen, indem z.B. Anlagen in Anlagenklassen gleichen Typs zusammengefasst werden. Inwieweit eine solche Typbildung möglich ist, wird nachfolgend untersucht.

Bezüglich einer Typbildung gibt es prinzipiell zwei mögliche Ansätze: Aus Aufwandsgründen wäre es vorteilhaft, lediglich die von den Netzbetreibern vorgelegten *anlagenbezogenen* Parameter in die Beurteilung bzw. Typbildung mit einzubeziehen und eine aufwändige Prüfung der konkreten Vor-Ort Bedingungen wie Art und Abstand der umliegenden Bebauungen auszusparen. Hierbei hat sich jedoch durch die theoretischen Abschätzungen und die Ergebnisse der Messungen gezeigt, dass die Lage des *Immissionsortes* entscheidend zu der konkret

vorliegenden Immissionssituation beiträgt. Daher ist es sinnvoll, bei der Typbildung sowohl anlagenbezogene, als auch immissionsortbezogene Parameter einzubeziehen. Dies setzt zwar eine Kenntnis der Gegebenheiten vor Ort und damit in gewissem Maße eine Einzelfallbetrachtung voraus, ist aber hinsichtlich einer Realisierung wesentlich erfolversprechender als eine Beschränkung auf die anlagenbezogenen Parameter.

## **4.2 Herangehensweise**

Das Problem der Typisierung wurde wie folgt bearbeitet:

Durch Ortsbegehungen wurde sich ein Überblick über die Vielfalt unterschiedlicher Mobilfunk Sendeanlagen verschafft. Wichtig war hier, dass verschiedene Morphographieklassen (Landnutzungsklassen) einbezogen wurden (städtisches Gebiet, ländliches Gebiet usw.), da anzunehmen ist, dass Mobilfunk Sendeanlagen je nach Morphographiekategorie unterschiedlich konfiguriert sein können.

In einem zweiten Schritt wurden mit Hilfe der in Kapitel 3.2 dargelegten theoretischen Abschätzungen und der ermittelten Anlagenvielfalt Anlagenarten definiert. Prinzipiell wurde dabei nicht nur die Sendeanlage, sondern auch die umliegenden Immissionsorte in die Klassifizierung einbezogen.

Die Vorschläge der Kommunen, die für die Messpunkte der Vorortmessungen eingegangen waren, wurden dahingehend aufgeteilt, dass für jede definierte Klasse einige Messpunkte zur Verfügung standen.

Abschließend wurden die vor Ort durchgeführten Messungen gemäß der gewählten Klassifizierung ausgewertet und Schlussfolgerungen bezüglich einer Typisierbarkeit gezogen.

Bei der Vorstellung des Gesamtprojektes bei den Netzbetreibern T-Mobile, Mannesmann Vodafone, E-Plus und O2 wurde insbesondere auch auf die Frage der Typisierung eingegangen und die diesbezüglichen Meinungen der Betreiber eingeholt. Alle Betreiber sahen die Beschäftigung mit dieser Problematik als interessant und auch für sie nützlich an, da sich durch solche Vereinheitlichungen unter Umständen die Netzplanung und die Inbetriebnahme vor Ort vereinfachen würde. Allerdings wurden von drei der vier Betreiber erhebliche Zweifel bezüglich einer Realisierbarkeit geäußert. Grund dafür ist, dass auch bei ähnlichen Morphographieklassen eine Vielfalt an unterschiedlichen Anlagenkonstellationen existiert, die sich signifikant bezüglich Kanalzahl, Downtilt, Ausrichtung und Antennentyp unterscheidet. Vor allem bei den schon längere Zeit bestehenden und ursprünglich unter anderen Randbedingungen geplanten D-Netzen sei nahezu jede Anlage hinsichtlich ihrer Parameter individuell. Lediglich ein Netzbetreiber plane für etwa 50-60 % seiner Standorte die Anlagen nach einem einheitlichen Standard bezüglich der Anlagenparameter.

### 4.3 Vorstellung der ausgewählten Typen und Erklärung

Eine sinnvolle Typauswahl muss der Hauptanforderung nach Praktikabilität genügen: Bei der Vielzahl der ermittelten Einflussfaktoren (senderseitig und empfängerseitig) wäre die Zahl der zu unterscheidenden Typen immens hoch: Selbst bei sehr konservativer Rechnung unter der Annahme lediglich senderseitiger Parameter ergäben 4 Netzbetreiber (nur GSM) x 5 unterschiedliche Kanalanzahlen x 20 verschiedene Antennentypen x 5 Downtiltstufen immerhin 2000 unterschiedliche Typen; hier sind empfängerseitige Parameter noch nicht einbezogen. Eine solche Anzahl von Typen ist jedoch nicht mehr praktikabel, da dies dann tatsächlich einer Einzelfallprüfung gleichkäme.

Die Idee besteht vielmehr darin, möglichst wenige, aber sinnvolle Typen zu definieren und dabei soviel sender- und empfängerseitige Parameter wie möglich implizit einzubeziehen. In der Auswertung wird dann gezeigt, ob und in welchen Fehlertoleranzen diese Typbildung sinnvoll ist.

Folgende Grundüberlegungen sind Basis für die Typklassifizierung:

- Mit den Ergebnissen von Kapitel 3.2 hat sich gezeigt, dass die *absolute Sendeleistung* entscheidend in die ortsbezogene Immission eingeht. Die Sendeleistung wird wesentlich durch die Zahl der insgesamt verwendeten Frequenzkanäle bestimmt. Die maximale Kanalanzahl wird in der Regel durch das maximale Verkehrsaufkommen bestimmt. Dieses ist in der Stadt, gerade im innerstädtischen Bereichen bzw. im Stadtzentrum, größer als in ländlichen Bereichen. Von daher macht eine Unterscheidung nach *morphographischen* Aspekten Sinn, d.h. die Frage, ob die Anlage sich im Großstadtzentrum (meistens Hochhäuser), im städtischen Kernbereich, im Kleinstadtbereich oder im ländlichen Bereich befindet. Für diese Unterscheidung spricht auch die Tatsache, dass hierbei implizit die Zahl der Netzbetreiber einbezogen wird: Große, exponierte Gebäude (Hochhäuser) im Großstadtzentrum sind sehr oft mehrfach genutzte Standorte. In ländlichen Bereichen kommt, vor allem bei an Häusern montierten Anlagen, ein site sharing eher selten vor.
- In eine solche Untergliederung nach morphographischen Bereichen werden implizit auch erste Unterscheidungen bzgl. der Nähe angrenzender Gebäude einbezogen: Bei einer auf ein Haus installierten Anlage in dörflicher Umgebung grenzen umliegende, gleich hohe Häuser sicher näher an als an ein Hochhaus im Großstadtzentrum, bei dem vergleichbare Hochhäuser weiter voneinander entfernt stehen.
- Auch der *Downtilt* ist ein entscheidender Einflussfaktor: Dieser ist in innerstädtischen Gebieten aufgrund der kleineren Funkzellen und der erforderlichen schärferen Abgrenzung zu Nachbarzellen in der Regel größer als in ländlichen Gebieten. Außerdem ist anzunehmen, dass in Abhängigkeit von der Landnutzungs-kategorie auch verschiedene Antennentypen eingesetzt werden. Auch hier ist deswegen eine Unterteilung nach morphologischen Gesichtspunkten sinnvoll.
- Aufgrund der Richtcharakteristik der verwendeten Sendeantennen spielt der *Höhenunterschied* zwischen Senderort und Empfängerort eine große Rolle. Orte, die sich in gleichem (lateralen) Abstand vom Sender befinden und auf gleicher bzw. geringfügig niedrigerer (Downtilt) Höhe befinden, d.h. in der Hauptstrahlungsrichtung, werden deutlich stärker bestrahlt als gleich weit entfernte Orte, die sehr viel tiefer (oder auch höher) liegen.



Die morphographischen Einflussfaktoren werden berücksichtigt, in dem für *den Senderort als Hauptklassen* entsprechend drei unterschiedliche Arten von Gebäuden definiert werden:

- Hochhäuser im Großstadtinnenbereich oder Trabantenstadtbereich,
- mehrgeschossige "Normalhäuser" im Großstadt- oder Großstadtrandbereich oder im Gewerbe-/Industriegebiet,
- kleine Häuser (ein- oder zweigeschossig) im Kleinstadt- oder ländlichen Bereich.

Die Unterteilung in die drei Hausgrößen mit entsprechend typischen Verbreitungsgebieten berücksichtigt (falls relevant) auch unterschiedliche Arten von Bodenreflexionen zwischen Sender und Empfänger.

Die Lage des *Empfängerortes* bezüglich der Höhe wird entsprechend der Frage, ob sich der Immissionsort in Hauptstrahlrichtung befindet oder nicht, als *Unterklasse* zu den drei Hauptklassen definiert. Vorgeschlagen wird die Klassifizierung x.1: im Hauptstrahlbereich (d.h. abhängig von der Entfernung auf gleicher Höhe oder geringfügig tiefer als die Sendeanlage), x.2: im Nebenzipfelbereich (d.h. sehr viel niedriger oder auch, obwohl eher selten, höher als die Sendeanlage), und x.3: im selben Gebäude unter der Sendeanlage.

Als Spezialfall zu den drei gewählten Gebäudeformen kann jeweils noch der freistehende Mast definiert werden. Ein Mast kann aber bezüglich der Immission in angrenzenden Gebäuden im ersten Ansatz wie eine Sendeanlage auf einem entsprechend hohen Gebäude aufgefasst werden. Unterschiede zur Sendeanlage auf einem Gebäude wird es allerdings für Orte unterhalb des Mastes geben, sofern diese freie Sicht zum Sender haben und sich nicht innerhalb eines Gebäudes befinden (also z.B. ein Spielplatz). Hierfür wird ein Spezialtyp definiert.

Der Parameter lateraler Abstand wird ebenso wie die Sichtverhältnisse zur Anlage als freier Parameter verwendet.

Nach diesen Überlegungen für eine Typauswahl als Kombination zwischen sender- und empfangsseitigen Parametern ergibt sich die folgende Einteilung:

- |          |   |
|----------|---|
| Typ 1.1: | Sender auf Hochhaus, Empfängerort im Hauptstrahl (d.h. je nach Entfernung gleich hoch oder geringfügig tiefer)                  |
| Typ 1.2: | Sender auf Hochhaus, Empfängerort im Nebenzipfelbereich (d.h. je nach Entfernung wesentlich tiefer oder auch höher)             |
| Typ 1.3: | Sender auf Hochhaus, Empfängerort im gleichen Gebäude wie Sender, d.h. unter der Anlage   |
| Typ 2.1: | Sender auf Normalhaus Großstadt, Empfängerort im Hauptstrahl (d.h. je nach Entfernung gleich hoch oder geringfügig tiefer)      |
| Typ 2.2: | Sender auf Normalhaus Großstadt, Empfängerort im Nebenzipfelbereich (d.h. je nach Entfernung wesentlich tiefer oder auch höher) |
| Typ 2.3: | Sender auf Normalhaus Großstadt, Empfängerort im gleichen Gebäude wie Sender, d.h. unter der Anlage                             |

- Typ 3.1: Sender auf Kleinhaus Land/Kleinstadt, Empfängerort im Hauptstrahl (d.h. je nach Entfernung gleich hoch oder geringfügig tiefer)
- Typ 3.2: Sender auf Kleinhaus Land/Kleinstadt, Empfängerort im Nebenzipfelbereich (d.h. je nach Entfernung wesentlich tiefer oder auch höher)
- Typ 3.3: Sender auf Kleinhaus Land/Kleinstadt, Empfängerort im gleichen Gebäude wie Sender, d.h. unter der Anlage
- Typ 4: Spezialfall: Freistehender Mast, Freiraum unter der Anlage mit freier Sicht

In den Abb. 4.1 bis 4.4 sind die ausgewählten Typen beispielhaft dargestellt.



Abb. 4.1 Typklassifizierung 1.1 bis 1.3



Abb. 4.2 Typklassifizierung 2.1 bis 2.3



Abb. 4.3 Typklassifizierung 3.1 bis 3.3



Abb. 4.4 Spezialtyp 4

Es ist verständlich, dass durch diese Klassifizierung lange nicht alle, sondern nur wesentliche vorkommenden Konfigurationen abgedeckt werden können. Ungenügend berücksichtigt ist z.B. der freistehende Mast im ländlichen Gebiet, der u.a. zur Abdeckung von Autobahnen o.ä. eingesetzt wird. Hierbei sind jedoch oftmals die angrenzenden Bebauungen relativ weit entfernt und deswegen aus Immissionssicht nicht so interessant wie bei städtischen Bereichen. Außerdem ist das Modell des freistehenden Mastes bereits in Kapitel 3.3.2 charakterisiert.

#### 4.4 Auswertung der Ergebnisse

In Tabelle 4.1 sind die Zuordnungen der einzelnen Messpunkte zu den Typen sowie die Messwerte enthalten. Die Ortsangabe kennzeichnet den Standort des *Senders*.

An manchen Stellen ist es aufgrund des unbekanntem aktuellen Downtilts sehr schwer möglich, einen Messort eindeutig dem Hauptstrahl- oder Nebenzipfelbereich zuzuordnen. In diesem Fall erfolgt eine Zuordnung zu beiden möglichen Typen.

Als Messergebnis wird hier die *Immission der Hauptsendeanlage (HSA)* angegeben, da nur diese sinnvollerweise in die Typbildung eingehen kann. Anders ausgedrückt kann bei einer Typklassifizierung eine geplante HSA nicht für die Immission bereits bestehender, umliegender NSA verantwortlich gemacht werden. Der Einfluss der NSA ist, z.B. durch den standortspezifischen Sicherheitsfaktor, geeignet einzubeziehen. Die angegebene Immission der HSA ist auf maximale Anlagenauslastung extrapoliert.

Bei Messpunkten, die sich *im* Gebäude der Anlagen befinden, wird zusätzlich die Geschosshöhe angegeben. "ganz oben" bezeichnet das Stockwerk direkt unterhalb der Antenne.

Messort Messpunkt	Typ	Sicht zur HSA?	Entfernung [m]	Immission durch HSA [ $W/m^2$ ]	Bemerkung
<b>Aachen</b>					
Raafstraße					
AC 1.1	3.2	ja	10	$1,8 \cdot 10^{-2}$	
AC 1.2	3.2	ja	10	$5,1 \cdot 10^{-4}$	
AC 1.3	3.2 (3.1)	nein	20	$2,0 \cdot 10^{-4}$	
Bayernallee					
AC 2.1	1.3	nein	11. OG	$5,3 \cdot 10^{-4}$	
AC 2.2	1.3	nein	ganz oben	$1,2 \cdot 10^{-2}$	
AC 2.3	Sonderfall (1.2)	ja	5	$1,3 \cdot 10^{-1}$	direkt vor Anlage
AC 2.4	1.2	nein	160	$1,7 \cdot 10^{-3}$	
AC 2.5	1.2	ja	180	$7,5 \cdot 10^{-3}$	
AC 2.6	1.2 (1.1)	ja	60	$8,3 \cdot 10^{-3}$	
Kleinmarschierstraße					
AC 3.1	2.3	nein	ganz oben	$9,8 \cdot 10^{-3}$	
AC 3.2	2.2 (2.1)	nein	10	$1,1 \cdot 10^{-2}$	
<b>Bielefeld</b>					
Dornberger Str.					
BI 1.1	3.3	nein	-	$1,5 \cdot 10^{-4}$	
BI 1.2	3.2	ja	30	$8,3 \cdot 10^{-4}$	
BI 1.3	3.2	nein	20	$1,6 \cdot 10^{-4}$	
Deckertstraße					
BI 2.1	1.3	nein	ganz oben	$2,0 \cdot 10^{-5}$	
BI 2.2	1.3	nein	Gebäudemitte	$8,0 \cdot 10^{-5}$	
BI 2.3	1.3	nein	Erdgeschoss	$2,8 \cdot 10^{-6}$	
Lüneburger Straße					
BI 3.1	1.2 (1.1)	ja	125	$2,5 \cdot 10^{-5}$	
BI 3.2	1.2 (1.1)	ja	125	$3,5 \cdot 10^{-5}$	
BI 3.3	1.3	nein	ganz oben	$1,6 \cdot 10^{-5}$	
<b>Bonn</b>					
Sportplatz Am Stingenberg					
BN 1.1	2.2	ja	25	$6,4 \cdot 10^{-4}$	
BN 1.2	2.2	ja	50	$1,2 \cdot 10^{-4}$	

Kirchstraße					
BN 2.1	3.1 (3.2)	ja	25	$5,6 \cdot 10^{-3}$	
BN 2.2	3.2 (3.1)	nein	105	$1,8 \cdot 10^{-4}$	
BN 2.3	3.2 (3.1)	nein	140	$3,1 \cdot 10^{-5}$	
BN 2.4	3.1	ja	45	$5,8 \cdot 10^{-3}$	
BN 2.5	3.3	nein	ganz oben	$1,3 \cdot 10^{-3}$	
Siegburger Straße					
BN 3.1	2.1 (2.2)	ja	90	$3,2 \cdot 10^{-4}$	
BN 3.2	2.2	ja	55	$3,0 \cdot 10^{-4}$	
BN 3.3	2.1	ja	20	$1,1 \cdot 10^{-3}$	
BN 3.4	2.1 (2.2)	ja	185	$3,2 \cdot 10^{-4}$	
Dortmund					
Wambeler Hellweg					
DO 1.1	2.3	nein	ganz oben	$2,9 \cdot 10^{-5}$	
DO 1.2	2.2	ja	40	$7,0 \cdot 10^{-4}$	
DO 1.3	2.1 (2.2)	ja	90	$2,3 \cdot 10^{-4}$	
DO 1.4	2.1	nein	165	$1,0 \cdot 10^{-3}$	
Brandisstraße					
DO 2.1	2.2 (2.1)	ja	40	$2,8 \cdot 10^{-3}$	
DO 2.2	2.2	ja	40	$1,8 \cdot 10^{-3}$	
DO 2.3	2.1	ja	80	$7,0 \cdot 10^{-3}$	
Lange Fuhr					
DO 3.1	1.3	nein	ganz oben	$6,4 \cdot 10^{-4}$	
DO 3.2	1.3	nein	ganz oben	$3,3 \cdot 10^{-3}$	
DO 3.3	1.3	nein	Gebäudemitte	$6,9 \cdot 10^{-5}$	
DO 3.4	1.3	nein	Erdgeschoss	$1,4 \cdot 10^{-5}$	
Düsseldorf					
Bingener Weg					
D 1.1	1.2	nein	190	$2,0 \cdot 10^{-4}$	
D 1.2	1.2 (1.1)	ja	105	$1,7 \cdot 10^{-5}$	
D 1.3	1.3	nein	ganz oben	$9,0 \cdot 10^{-3}$	
D 1.4	1.3	nein	ganz oben	$2,0 \cdot 10^{-2}$	
D 1.5	1.3	nein	Erdgeschoss	$3,3 \cdot 10^{-5}$	
D 1.6	1.1	nein	240	$1,9 \cdot 10^{-5}$	
Kronprinzenstraße					
D 2.1	2.2	ja	35	$4,2 \cdot 10^{-3}$	
D 2.2	2.2	nein	45	$8,8 \cdot 10^{-4}$	

<b>Krefeld</b>					
Hochstraße					
KR 1.1	1.3	nein	ganz oben	$3,2 \cdot 10^{-2}$	
KR 1.2	1.1 (1.2)	ja	50	$2,6 \cdot 10^{-2}$	
KR 1.3	1.2	ja	20	$8,4 \cdot 10^{-3}$	
KR 1.4	1.1 (1.2)	nein	80	$3,5 \cdot 10^{-2}$	
Inrather Straße					
KR 2.1	2.1 (2.2)	nein	120	$1,0 \cdot 10^{-3}$	
KR 2.2	2.1 (2.2)	nein	110	$5,0 \cdot 10^{-3}$	
KR 2.3	2.2 (2.1)	ja	90	$5,4 \cdot 10^{-3}$	
KR 2.4	2.3	nein	ganz oben	$3,4 \cdot 10^{-4}$	
KR 2.5	2.1	ja	75	$1,3 \cdot 10^{-2}$	
<b>Münster</b>					
Ludgeriplatz					
MS 1.1	2.3	nein	nicht ganz oben	$5,2 \cdot 10^{-3}$	
MS 1.2	2.1 (2.2)	ja	110	$8,5 \cdot 10^{-3}$	
MS 1.3	2.2	nein	30	$4,3 \cdot 10^{-4}$	
MS 1.4	2.1 (2.2)	nein	60	$8,3 \cdot 10^{-4}$	
MS 1.5	2.1 (2.2)	ja	60	$1,3 \cdot 10^{-3}$	
Klemensstraße					
MS 2.1	2.3	nein	ganz oben	$1,3 \cdot 10^{-2}$	
MS 2.2	2.3	nein	2 Stock tiefer	$1,6 \cdot 10^{-4}$	
MS 2.3	2.1	ja	220	$2,2 \cdot 10^{-3}$	
<b>Oberhausen</b>					
Bismarckstraße					
OB 1.1	2.2	ja	60	$7,4 \cdot 10^{-3}$	
OB 1.2	2.1 (2.2)	nein	100	$2,1 \cdot 10^{-3}$	
Egelsfothstraße					
OB 2.1	3.1	ja	65	$1,6 \cdot 10^{-2}$	
OB 2.2	3.1	ja	60	$6,1 \cdot 10^{-4}$	beschichtete Fenster!
<b>Siegen</b>					
Schweriner Straße					
SI 1.1	1.1 (1.2)	ja	40	$3,2 \cdot 10^{-3}$	
SI 1.2	4	ja	50	$8,1 \cdot 10^{-4}$	

<b>Wuppertal</b>					
Frankfurter Straße					
W 1.1	3.1 (3.2)	ja	65	$2,9 \cdot 10^{-3}$	
W 1.2	3.3	nein	ganz oben	$9,0 \cdot 10^{-4}$	
W 1.3	3.1	nein	7	$4,5 \cdot 10^{-2}$	
Else-Lasker-Schüler-Straße					
W 2.1	2.1	nein	210	$3,2 \cdot 10^{-4}$	
W 2.2	2.1 (2.2)	nein	180	$6,2 \cdot 10^{-5}$	
W 2.3	2.1	ja	115	$8,6 \cdot 10^{-3}$	
W 2.4	2.2	ja	55	$1,0 \cdot 10^{-3}$	
W 2.5	2.2	ja	6	$9,3 \cdot 10^{-4}$	
W 2.6	2.2	nein	40	$1,3 \cdot 10^{-6}$	
Bahnstraße					
W 3.1	2.2	ja	20	$2,0 \cdot 10^{-3}$	
W 3.2	2.2	nein	15	$8,4 \cdot 10^{-4}$	
W 3.3	2.2	nein	5	$9,0 \cdot 10^{-5}$	
W 3.4	2.3	nein	ganz oben	$2,4 \cdot 10^{-4}$	
W 3.5	2.2	ja	50	$3,5 \cdot 10^{-4}$	

Tab. 4.1 Klassifizierung der Messpunkte nach Typen und Ergebnisse

In den Abb. 4.5 bis 4.7 sind die Immissionswerte für Messpunkte gleichen Typs zusammengefasst und grafisch aufbereitet. Messpunkte, die nicht sicher einem Typ zugeordnet werden konnten, sind besonders gekennzeichnet. Die Entfernungsangabe des Messpunktes zum Sender ist Tabelle 4.1 zu entnehmen.



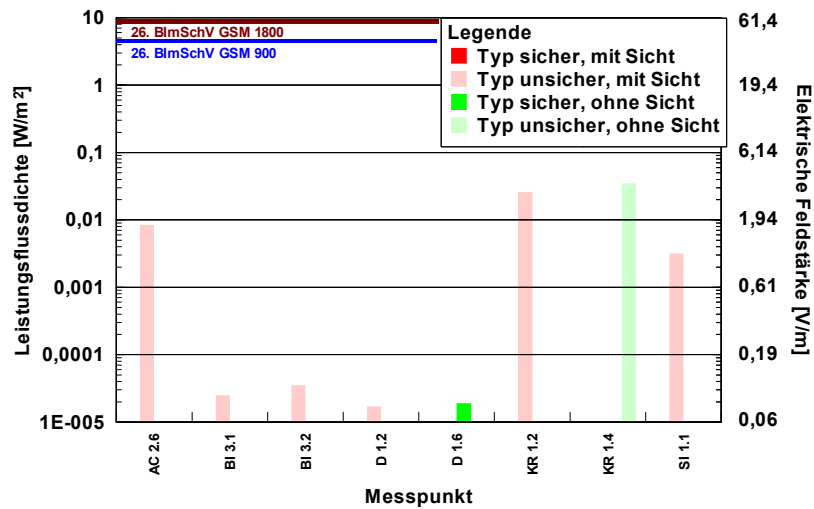


Abb. 4.5a Ergebnisse für Typ 1.1

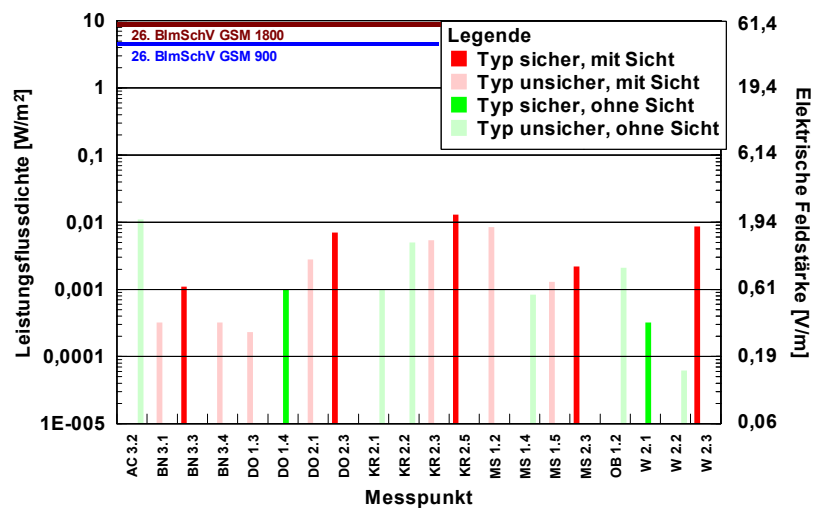


Abb. 4.5b Ergebnisse für Typ 2.1

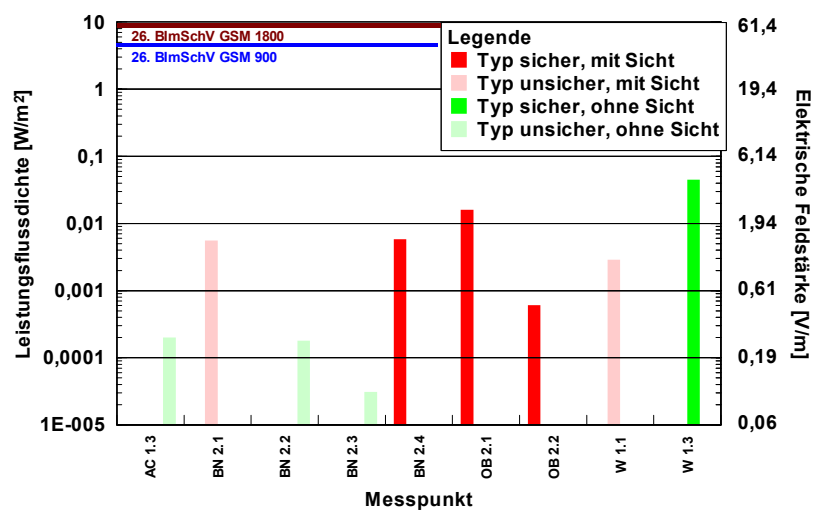


Abb. 4.5c Ergebnisse für Typ 3.1

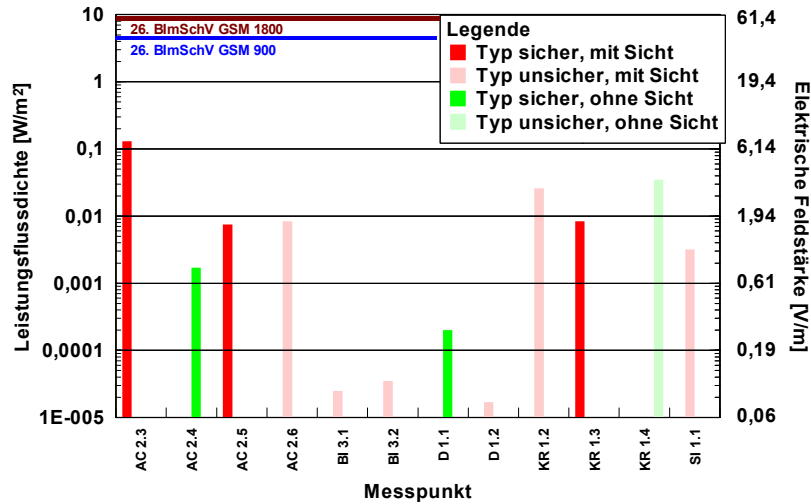


Abb. 4.6a Ergebnisse für Typ 1.2

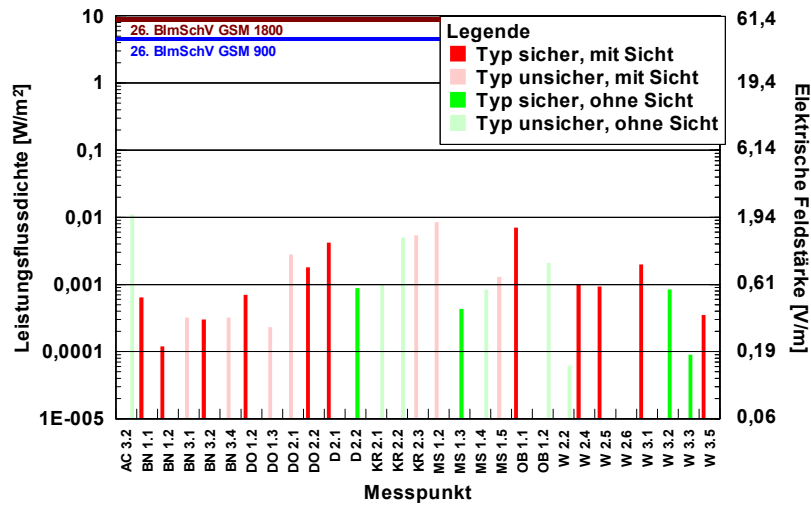


Abb. 4.6b Ergebnisse für Typ 2.2

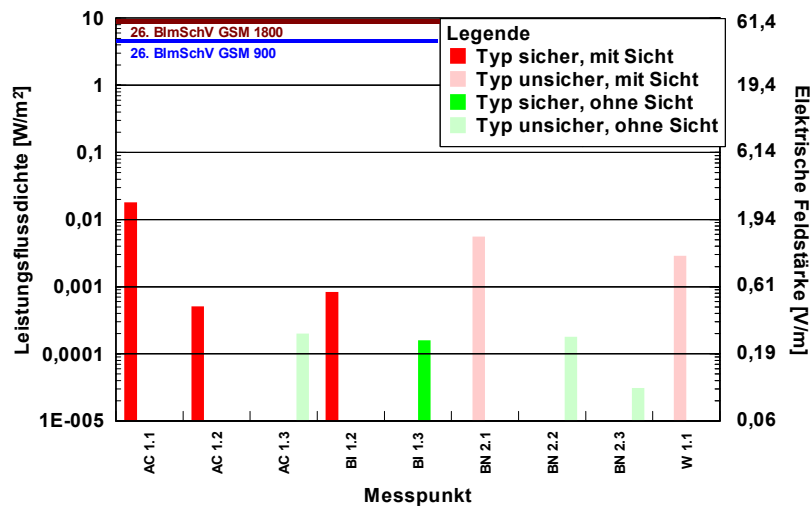


Abb. 4.6c Ergebnisse für Typ 3.2

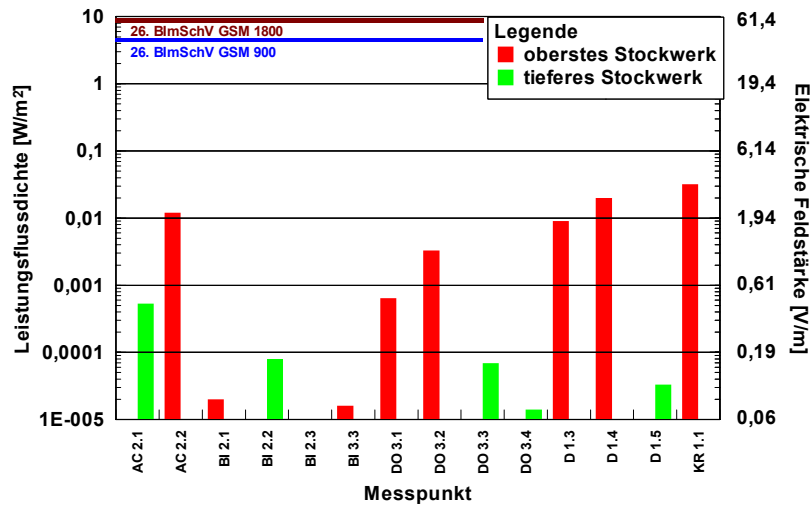


Abb. 4.7a Ergebnisse für Typ 1.3

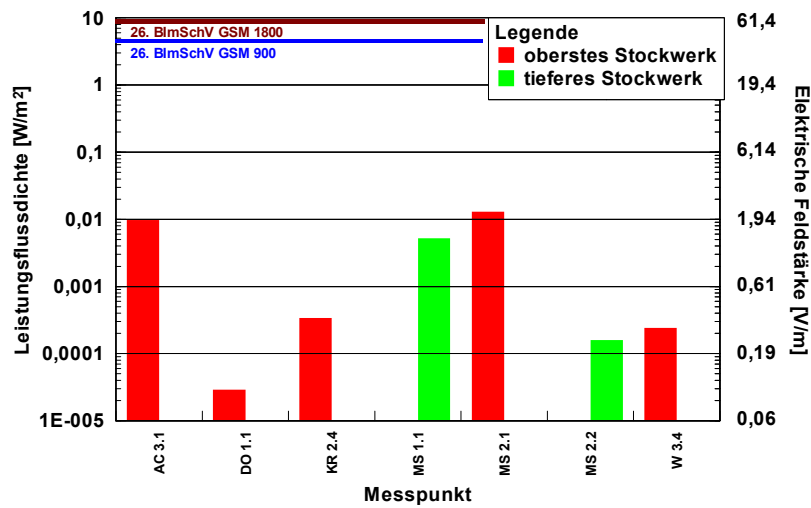


Abb. 4.7b Ergebnisse für Typ 2.3

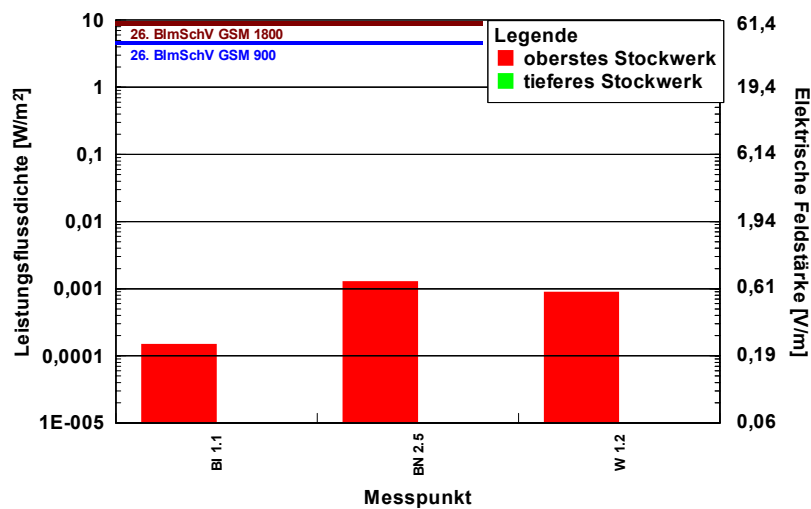


Abb. 4.7c Ergebnisse für Typ 3.3

Aus den Ergebnissen ergibt sich kein einheitliches Bild.

Am deutlichsten wird dies aus dem Vergleich der Immissionen für Messpunkte, die unmittelbar unter der Anlage liegen (Typ 1.3, 2.3 und 3.3, Abb. 4.7). Hier sind auch innerhalb ein und desselben Typs (z.B. Typ 1.3, Abb. 4.7a) Unterschiede von mehr als drei Zehnerpotenzen bezüglich der Leistungsflussdichte festzustellen. Auf diese Besonderheit wurde bereits in Kapitel 3.3 eingegangen: Die These, dass die Immissionen durch eine Anlage in Wohnungen direkt unterhalb der Anlage *immer* besonders gering sind, ist damit eindeutig widerlegt. Es existieren vielmehr Stationen, bei denen dies der Fall ist, aber auch wieder andere, wo dies nicht zutrifft. Die mögliche Schwankungsbreite ist dabei enorm.

Der Trend der großen Schwankungsbreite setzt sich auch bei den anderen Typen fort. Für Messpunkte, die außerhalb der Hauptstrahlungsrichtung sind (Typ 1.2, 2.2 und 2.3, Abb. 4.6) ist dies beispielsweise an Typ 2.2, Abb. 4.6b ersichtlich, da hierfür die meisten sicheren Typklassifizierungen vorliegen. Selbst wenn die unsicheren Typklassifizierungen nicht berücksichtigt werden, bleibt eine sehr große Schwankungsbreite bestehen, die auch nicht durch unterschiedliche Entfernungen zu begründen ist. So ist z.B. BN 1.2 50 m von der Anlage entfernt und OB 1.1 60 m, die Immissionen haben aber fast zwei Zehnerpotenzen Unterschied. Bedeutsam ist ebenfalls, dass Messpunkte ohne direkte Sicht zum Sender ähnliche oder höhere Werte aufweisen können wie Messpunkte mit direkter Sicht bei ähnlichem Abstand.

Die Auswertung der Typen 1.1, 1.2 und 1.3 (Abb. 4.5) ergibt ein ähnlich uneinheitliches Bild.

Damit muss festgestellt werden, dass offensichtlich die Varianz der unterschiedlichen Anlagen einerseits sowie die verschiedenen Lagen von möglichen Immissionsorten andererseits zu groß ist, um eine stark vereinfachte Typbildung zuzulassen. Insofern ist eine Einzelfallprüfung, die ggf. mit Messungen zu unterstützen ist, nicht umgehbar, sofern detaillierte Einschätzungen über die vorherrschende Immissionssituation gefordert sind. Es verbleibt hier allerdings die Aussage, dass alle Messpunkte mit großem Sicherheitsabstand unter den deutschen Grenzwerten der 26. BImSchV liegen, obwohl die Messpunkte oftmals schon nach Gesichtspunkten maximaler Immissionen ausgewählt wurden.

Unter Zuhilfenahme der gemessenen und dokumentierten Immissionen ist es jedoch möglich, andere Typklassifizierungen aufzustellen und zu überprüfen. Es bleibt jedoch fraglich, ob das Ergebnis wesentlich anders aussieht als das hier dargestellte.

#### **4.5 Kriterien zur Immissionsabschätzung und -minimierung**

Obwohl sich eine *Vereinfachung* der Beurteilung von geplanten Anlagen mittels *Typenbildung* als nicht realisierbar herausgestellt hat, lassen sich trotzdem in gewissem Maße allgemeine *Kriterien* zur Abschätzung der vorliegenden Immissionssituation und zur Minimierung der Immission aufstellen.

Gemäß den in Kapitel 3.2 erläuterten Einflussfaktoren dienen zur *Beurteilung der zu erwartenden Immissionsverteilung* folgende Kriterien:

anlagenbezogen:

- Sendeleistung (Kanalzahl, Kanalsendeleistung, Betreiberzahl),
- Höhe der Anlage über Grund,
- verwendete Antennen und ihre Ausrichtung,
- Downtilt der Antennen

immissionsortbezogen:

- lateraler Abstand zur Anlage,
- Höhe des Immissionsortes über Grund,
- horizontale Ausrichtung zur Anlage,
- Sichthindernisse (unter Berücksichtigung von Reflexions- und Beugungseffekten)

Bei der Anwendung dieser Kriterien im Rahmen der Netzplanung ist zu berücksichtigen, dass die Einflussfaktoren komplex zusammenwirken und nicht isoliert voneinander betrachtet werden dürfen.

Zur *Reduzierung der ortsbezogenen Immission sowie der Gesamtimmission* lassen sich theoretisch folgende *prinzipielle* Schlüsse ableiten:

1. Die Sendeantennen sind möglichst hoch zu setzen (siehe [EMF 1]). Freistehende Gebäude sind zu bevorzugen (umliegende Gebäude sollten tiefer sein und einen möglichst hohen lateralen Abstand besitzen).
2. Aus Immissionsgesichtspunkten ist die Einfachnutzung eines Standortes einer Mehrfachnutzung durch mehrere Netzbetreiber (site sharing) vorzuziehen (geringere Sendeleistung).
3. Die Anzahl der möglichen Frequenzkanäle ist gering zu halten (geringe Sendeleistung).
4. Die Sendeleistung pro Kanal ist möglichst gering zu halten. Mehr Anlagen mit geringerer maximaler Sendeleistung bringen für die Gesamtimmission Vorteile (siehe [EMF 1]).
5. Der Downtilt der Antenne ist möglichst klein zu wählen.
6. Es sind Antennentypen zu verwenden, die ein möglichst geringes Nebenzipfelniveau haben, da nachgewiesen werden kann, dass bei manchen Antennen die ortsbezogene Immission bei geringem Abstand durch die Nebenzipfel höher sein kann als durch die Hauptstrahlrichtung im größeren Abstand.

Die praktische Umsetzung dieser allgemeinen Aussagen kann jedoch aus verschiedenen Gründen problematisch sein. So wurde z.B. in [EMF 1] bereits darauf hingewiesen, dass der Downtilt keine frei wählbare Größe ist, sondern aus funkplanungstechnischen Gründen (Interferenzminimierung) weitgehend vorgegeben ist. Gleiches gilt für die Anzahl der Kanäle pro Mobilfunkanlage (erforderliche Systemkapazität für eine Zelle). Außerdem führen die Möglichkeiten 2-4 zur Verringerung der Sendeleistung (kein Site sharing, wenige Kanäle, geringe Sendeleistung) unter der Voraussetzung der Gewährleistung einer weiterhin flächendeckenden Versorgung gleicher Systemkapazität zu einer entsprechend steigenden Zahl der Basisstationsstandorte, was wiederum bei den betroffenen Bürgern Konfliktpotenzial erzeugt.

Die Einbeziehung des Parameters lateraler Abstand würde rein theoretisch zu der Forderung führen, Anlagen in möglichst großer Entfernung von angrenzenden Bebauungen zu errichten. Diese Forderung ist in der praktischen Diskussion wenig hilfreich, da oftmals die Bebauung (z.B. im Innenstadtbereich) sehr dicht ist. Ein diesbezüglicher Ansatz, zur Versorgung eines Stadtgebietes die Anlagen weit außerhalb der Stadt zu installieren, macht jedoch technisch keinen Sinn, da

- sinnvollerweise eine Anlage dort stehen muss, wo die Nutzer sind, d.h. dort, wo auch mobil telefoniert wird,
- die Interferenz in Nachbarzellen steigt, und
- zur Versorgung des weit entfernten Stadtbereiches eine ungleich höhere Sendeleistung notwendig wäre und damit die Gesamtmission (und je nach örtlichen Gegebenheiten u.U. auch die ortsbezogene Immission) im direkten Umfeld der Anlage *ansteigen* würde.

*Praktikable* Empfehlungen für den Netzaufbau, die einerseits das Ziel einer Immissionsminimierung verfolgen, andererseits aber netzbetreiberseitig realisierbar und technisch sinnvoll sind, lassen sich demzufolge nur unter Einschränkungen formulieren:

1. Die Mobilfunkanlagen sind auf möglichst hohe, alleinstehende (keine dicht angrenzenden Häuser mit ähnlicher Höhe) Gebäude zu installieren. Die Antennen sollten möglichst nicht unter dem mittleren Dachniveau der umliegenden Bebauung stehen.

*Einschränkungen:* Reduzierung der Systemkapazität durch größere Zellausdehnung bei gleicher Kanalzahl, Erhöhung der Interferenz mit Nachbarzellen (vor allem UMTS!), teilweise größere Sichtbarkeit der Antennen, Städtebild, baurechtliche Aspekte

2. Mehrere "kleine" Sendeanlagen mit geringer Leistung ("verteiltes" Senderkonzept) sind aus Immissionssicht sinnvoller als wenige Anlagen hoher Sendeleistung ("konzentriertes" Senderkonzept).

*Einschränkungen:* Kostengesichtspunkte, Finden geeigneter Standorte, mehr Antennen

3. Vor allem in dicht bebauten Gebieten sollte, sofern kein besonders exponierter Standort nach Punkt 1 zur Verfügung steht, von einem Site sharing abgerückt werden. Allerdings ist ein Site sharing nicht generell abzulehnen; in dünn besiedelten Gebieten oder bei genügendem Abstand zu angrenzenden Bauungen kann ein Site sharing aus Gründen der Minimierung der Standortzahl durchaus sinnvoll sein.

*Einschränkungen:* Finden geeigneter Standorte

4. Es sind, gerade bezüglich des Nebenzipfelbereiches, optimierte Antennen einzusetzen.

*Einschränkungen:* Entwicklungsaufwand, primär nur für neue Standorte anzuwenden

Ein Vorgehen nach den Punkte 2 und 3 erfordert die konstruktive Zusammenarbeit der Kommunen mit den Netzbetreibern bezüglich einer Standortsuche. Aufgrund der Einschränkungen werden die o.g. Empfehlungen nicht pauschal, sondern nur fallbezogen anwendbar sein.

## 4.6 Zusammenfassung

1. Die Zusammenfassung von Anlagenparametern und Bildung geeigneter Anlagentypen ist eine attraktive Idee bezüglich einer vereinfachten Betrachtung von zu erwartenden Immissionen im Umfeld von Mobilfunk Sendeanlagen und auf eine Immissionsminimierung.
2. Da außer den anlagenbezogenen Einflussfaktoren vor allem auch die Lage des Immissionsortes entscheidenden Einfluss auf die ortsbezogene Immission hat, sind auch die immissionsortbezogenen Einflussfaktoren in die Betrachtung mit einzubeziehen.
3. Aufgrund verschiedener anlagenbezogener Einflussfaktoren (Betreiber, Mehrfachnutzung, Sendeleistung pro Kanal, Kanalzahl, Antennentyp, Ausrichtung, Downtilt) und empfängerseitiger Einflussfaktoren (Höhe bzw. Höhenunterschied zur Anlage, Sichtverhältnisse, Ausrichtung zu den Sektorantennen, Entfernung) ergibt sich eine immense Vielfalt von Parametern, die eine Typbildung zu einer schwierigen Aufgabe machen.
4. Durch die Annahme von bestimmten Vereinfachungen ist es möglich, für gewisse Standortklassen (morphographische Klassen: Innenstadtbereich mit Hochhäusern, Großstadttinnen- und Randbereich bzw. Gewerbegebiet, kleinstädtisches bzw. ländliches Gebiet) Parameter sinnvoll zusammenzufassen. Es wurden Typen gebildet, die sowohl senderseitige, als auch empfängerseitige Parameter vereinen. Natürlich werden durch die hierbei getroffenen Vereinfachungen einzelne Einflussfaktoren nicht ausreichend berücksichtigt.
5. Einer diesbezüglichen Typklassifizierung wurden die Messpunkte der Vorortmessungen unterzogen. Bei der Auswertung zeigt sich jedoch ein sehr uneinheitliches Bild mit sehr großen Schwankungsbreiten für Messpunkte gleichen Typs. Hieraus muss der Schluss gezogen werden, dass die gewählten Vereinfachungen zu grob sind und eine sehr viel feinere Typuntergliederung notwendig wäre. Dieser Trend läuft aber einer Typisierung zuwider, da die Anzahl der Typen aus Praktikabilitätsgründen auf ein sinnvolles Maß zu begrenzen ist; ansonsten beständen keine Vorteile gegenüber einer Einzelfallbetrachtung.
6. Als Ergebnis muss gefolgert werden, dass die Idee einer praktikablen Typbildung aufgrund der immensen Anlagenvielfalt und der unterschiedlichen Lage möglicher Immissionsorte nicht realisierbar ist. Deswegen bleibt in vielen Fällen, sofern zuverlässig die Größe der Immission in der Umgebung der Anlage bestimmt werden soll, nur die Einzelfallprüfung bzw. eine orientierende Messung.
7. Obwohl sich eine Vereinfachung der Immissionsbeurteilung mittels *Typenbildung* als nicht realisierbar herausgestellt hat, lassen sich trotzdem in gewissem Maße allgemeine *Kriterien* zur Abschätzung der vorliegenden Immissionssituation aufstellen. Es sind dies die bereits in Kapitel 3.2 herausgearbeiteten anlagen- und immissionsortbezogenen Einflussfaktoren.
8. Bezüglich einer Minimierung der Gesamtmission lassen sich nur unter Einschränkungen praktikable Empfehlungen aufstellen, die vor allem die Exponiertheit des Standortes, die Bevorzugung des "verteilten" Senderkonzeptes, der Verzicht auf Site sharing in dicht besiedelten Gebieten und die Optimierung der Sendeantennen betreffen. Ein Vorgehen nach diesen Empfehlungen wird wegen Einschränkungen nicht pauschal, sondern nur fallbezogen möglich sein und erfordert die konstruktive Zusammenarbeit der Kommunen mit den Netzbetreibern bezüglich einer Standortsuche.

## 5 Zusammenfassung

1. Der vorliegende Abschlussbericht bezieht sich auf die durch Mobilfunk Basisstationen verursachten elektromagnetischen Immissionen. Es werden sowohl messtechnische, als auch begleitend numerische Untersuchungen vorgenommen.
2. Im Gegensatz zu vielen ähnlich gearteten Untersuchungen bzw. Einzelmessungen zeichnet sich die vorliegende Studie dadurch aus, dass sie Immissionen von Mobilfunk Basisstationen *systematisch* untersucht und die Möglichkeiten einer *Typisierung* erörtert. Die umfangreichen Messungen wurden nicht primär an frei zugänglichen Orten, sondern vor allem in an die Anlagen angrenzenden Wohnungen durchgeführt, wo vor allem bei hoch gelegenen Senderstandorten in der Regel mit höheren Immissionen zu rechnen ist als auf Bodenniveau im Freien. In die Betrachtung werden auch Immissionen umliegender Mobilfunkstationen sowie anderer externer und interner Hochfrequenzquellen einbezogen.
3. In die ortsbezogene Immission durch Mobilfunk Sendeanlagen gehen zahlreiche Einflussfaktoren ein, die sowohl anlagenbezogen, als auch immissionsortbezogen sind. Es sind dies:

anlagenbezogen:

- Sendeleistung (Kanalzahl, Kanalsendeleistung, Betreiberzahl),
- Höhe der Anlage über Grund,
- verwendete Antennen und ihre Ausrichtung,
- Downtilt der Antennen

immissionsortbezogen:

- lateraler Abstand zur Anlage,
- Höhe des Immissionsortes über Grund,
- horizontale Ausrichtung zur Anlage,
- Sichthindernisse (unter Berücksichtigung von Reflexions- und Beugungseffekten)

Anhand von einfachen numerischen Abschätzungen werden die unterschiedlichen Einflussfaktoren in ihrer Auswirkung auf die ortsbezogene Immission diskutiert. Repräsentative Verläufe von zu erwartenden Immissionen sind angegeben.

4. Anhand der Messungen, die an 24 Messstandorten in zehn Kommunen durchgeführt wurden, lassen sich die unterschiedlichen Auswirkungen der Einflussfaktoren auf die ortsbezogene Immission prinzipiell bestätigen.
5. Die messtechnisch ermittelten Immission weisen eine große Schwankungsbreite (fünf Zehnerpotenzen bezüglich der elektrischen Leistungsflussdichte) auf. Die Grenzwerte der 26. BImSchV werden für alle Messpunkte sicher eingehalten. Einige Messpunkte unterschreiten die in der Schweiz angewendeten Vorsorgewerte für Orte mit empfindlicher Nutzung knapp, nur ein Messwert liegt über dem Vorsorgewert. Dieser weist einen sehr geringen lateralen Abstand zur Sendeanlage auf und befindet sich fast auf gleicher Höhe mit den Sendeantennen.
6. Reflexionen und Beugungserscheinungen an umliegenden Gebäuden können oftmals eine wichtige Rolle spielen, so dass auch Messpunkte, die an sich keine direkte Sicht haben, relevante Immissionen aufweisen können.



7. Ein interessantes Ergebnis der Messungen ist die Tatsache, dass auch an Orten direkt unterhalb der Anlage (darunter liegende Wohnungen) die Spannbreite der gemessenen Immissionen sehr groß ist; sie umfasst mehr als drei Zehnerpotenzen bezüglich der Leistungsflussdichte. Somit kann nicht pauschal davon ausgegangen werden, dass in diesen Wohnungen die Immission grundsätzlich wesentlich geringer ist als bei anderen Punkten im Umfeld der Anlage. Gründe für diese Beobachtung können in den verwendeten Antennen, in Beugungserscheinungen sowie im unterschiedlichen Dämpfungsverhalten von Dachmaterialien liegen. Es wird als sinnvoll erachtet, diese Tatsache näher zu untersuchen. Trotzdem wurden auch an diesen Stellen die Grenzwerte der 26. BImSchV sicher eingehalten und sogar die Schweizer Vorsorgewerte unterschritten.
8. Die große Schwankungsbreite der Messergebnisse zeigt, dass die relevanten Einflussfaktoren komplex zusammenwirken und nicht isoliert betrachtet werden dürfen.
9. Externe andere Hochfrequenzquellen, wie z.B. Sender vom Hör- und Fernsehgrundfunk, können zu den Gesamtmissionen am Messpunkt einen relevanten Beitrag leisten und teilweise sogar höhere Immissionen erzeugen als durch eine nahegelegene Mobilfunkstation. Die Relation von externen HF-Immissionen und Mobilfunkmissionen ist stark davon abhängig, wie weit der nächste externe Sender steht bzw. ob sich der Messpunkt im Stadttinneren befindet (hohe Dichte von Mobilfunksendern, selten Rundfunksender innerhalb des Stadtgebietes) oder in Stadtrandgebieten bzw. in ländlichen Gebieten (geringere Dichte von Mobilfunksendern, andere HF-Sender häufiger möglich).
10. Eine leistungsstarke interne HF-Quelle innerhalb von Wohnungen ist das DECT Schnurlostelefon. Die dadurch verursachten Immissionen liegen häufig über denen von direkt angrenzenden Mobilfunkanlagen.
11. Bei exemplarischen Detailmessungen an freistehenden Anlagen können die rechen-technisch abgeschätzten, prinzipiellen Verläufe (starke Schwankungen im durch die Nebenzipfel ausgeleuchteten Bereich, gleichmäßiger Abfall im Hauptstrahlungsbereich) reproduziert werden. Ebenfalls gut nachweisbar sind der Einfluss von Masthöhe und Downtilt.
12. Die stark in Abhängigkeit des Ortes schwankenden Immissionen innerhalb von Innenräumen bestätigen die Notwendigkeit, zur Ermittlung der maximalen Immission eine geeignete Messmethodik zur Maximalwertsuche anzuwenden. Typische Dämpfungsparameter sind bei Vor-Ort Messungen nur sehr unzuverlässig zu ermitteln; hierzu sind Untersuchungen unter Laborbedingungen notwendig.
13. Eine 24-Stunden Messung zeigt eine interessante zeitliche Variation im Tagesverlauf. In der Umgebung der hier untersuchten mehrkanaligen Mobilfunkanlage sind deutliche Schwankungen der Immission in Abhängigkeit der Tageszeit zu beobachten. Nachts ist die Immission auf einen konstanten, niedrigen Pegel abgesunken. Die Höchstwerte sind in der Nachmittagszeit zu beobachten, schwanken aber sehr stark.
14. Die Zusammenfassung von Anlagenparametern und Bildung geeigneter Anlagentypen ist eine attraktive Idee bezüglich einer vereinfachten Betrachtung von zu erwartenden Immissionen im Umfeld von Mobilfunk Sendeanlagen und auf eine Immissionsminimierung.

15. Da außer den anlagenbezogenen Einflussfaktoren vor allem auch die Lage des Immissionsortes entscheidenden Einfluss auf die ortsbezogene Immission hat, sind auch die immissionsortbezogenen Einflussfaktoren in die Betrachtung mit einzubeziehen.
16. Aufgrund verschiedener anlagenbezogener Einflussfaktoren (Betreiber, Mehrfachnutzung, Sendeleistung pro Kanal, Kanalzahl, Antennentyp, Ausrichtung, Downtilt) und empfangenseitiger Einflussfaktoren (Höhe bzw. Höhenunterschied zur Anlage, Sichtverhältnisse, Ausrichtung zu den Sektorantennen, Entfernung) ergibt sich eine immense Vielfalt von Parametern, die eine Typbildung zu einer schwierigen Aufgabe machen.
17. Durch die Annahme von bestimmten Vereinfachungen ist es jedoch möglich, für gewisse Standortklassen (morphographische Klassen: Innenstadtbereich mit Hochhäusern, Großstadttinnen- und Randbereich bzw. Gewerbegebiet, kleinstädtisches bzw. ländliches Gebiet) Parameter sinnvoll zusammenzufassen. Es wurden Typen gebildet, die sowohl sendenseitige, als auch empfangenseitige Parameter vereinen. Natürlich werden durch die hierbei getroffenen Vereinfachungen einzelne Einflussfaktoren nicht ausreichend berücksichtigt.
18. Einer diesbezüglichen Typklassifizierung wurden die Messpunkte der Vorortmessungen unterzogen. Bei der Auswertung zeigt sich jedoch ein sehr uneinheitliches Bild mit sehr großen Schwankungsbreiten für Messpunkte gleichen Typs. Hieraus muss der Schluss gezogen werden, dass die gewählten Vereinfachungen zu grob sind und eine sehr viel feinere Typuntergliederung notwendig wäre. Dieser Trend läuft aber einer Typisierung zuwider, da die Anzahl der Typen aus Praktikabilitätsgründen auf ein sinnvolles Maß zu begrenzen ist; ansonsten beständen keine Vorteile gegenüber einer Einzelfallbetrachtung.
19. Als Ergebnis muss kritisch eingeschätzt werden, dass die Idee einer praktikablen Typbildung aufgrund der immensen Anlagenvielfalt und der unterschiedlichen Lage möglicher Immissionsorte nicht realisierbar ist. Deswegen bleibt in vielen Fällen, sofern zuverlässig die Größe der Immission in der Umgebung der Anlage bestimmt werden soll, nur die Einzelfallprüfung bzw. eine orientierende Messung.
20. Obwohl sich eine Vereinfachung der Immissionsbeurteilung mittels *Typenbildung* als nicht realisierbar herausgestellt hat, lassen sich trotzdem in gewissem Maße allgemeine *Kriterien* zur Abschätzung der vorliegenden Immissionssituation aufstellen. Es sind dies die unter Punkt 3 aufgeführten anlagen- und immissionsortbezogenen Einflussfaktoren.
21. Bezüglich einer Minimierung der Gesamtmission lassen sich nur unter Einschränkungen praktikable Empfehlungen aufstellen, die vor allem die Exponiertheit des Standortes, die Bevorzugung des "verteilten" Senderkonzeptes, der Verzicht auf Site sharing in dicht besiedelten Gebieten und die Optimierung der Sendeantennen betreffen. Ein Vorgehen nach diesen Empfehlungen wird wegen Einschränkungen nicht pauschal, sondern nur fallbezogen möglich sein und erfordert die konstruktive Zusammenarbeit der Kommunen mit den Netzbetreibern bezüglich einer Standortsuche.

## **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 Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (MUNLV) des Landes Nordrhein-Westfalen, für die Initiierung und finanzielle Förderung vorliegenden Untersuchungsvorhabens. Frau Dr. Stöcker-Meier, der Projektleiterin auf Seiten des MUNLV, sei besonders für die gute Unterstützung und persönliche Betreuung gedankt.

Zum Gelingen des Vorhabens beigetragen haben die beteiligten Kommunen Aachen, Bielefeld, Bonn, Düsseldorf, Dortmund, Krefeld, Münster, Oberhausen, Siegen und Wuppertal sowie das Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen, das Staatliche Umweltamt Düsseldorf und der Deutsche Städtetag durch die Diskussionen, Anregungen und die konstruktive Kritik während den Arbeitsgruppensitzungen und in zahlreichen Gesprächen.

Den oben aufgeführten Kommunen wird darüber hinaus vor allem auch für ihre Mitarbeit beim Vorschlag geeigneter Standorte für die Vorortmessungen, die Auswahl der Messpunkte und die Organisation der Messungen vor Ort gedankt. Dies erforderte in vielen Fällen einen umfangreichen organisatorischen Aufwand, da der Großteil der Messungen innerhalb von Wohnungen durchgeführt wurde und hier entsprechende Ansprechpartner gefunden werden und ein Zugang organisiert werden musste. Dadurch ist eine Vielzahl von unterschiedlichen Messpunkten zusammengekommen, die einen repräsentativen Querschnitt über Nordrhein-Westfalen darstellen.

Nicht zuletzt hat auch die konstruktive Mitarbeit der Mobilfunk Netzbetreiber T-Mobile, Mannesmann-Vodafone, E-Plus und O2 einen großen Anteil am Gesamtprojekt. Dies betrifft vor allem die Zurverfügungstellung der technischen Daten der betrachteten Anlagen, ohne die eine exakte Ermittlung der Immission bei maximaler Anlagenauslastung nicht möglich gewesen wäre. Darüber hinaus sei den Netzbetreibern auch für die vielen fachlichen Diskussionen gedankt.

In diesem Projekt wurde auch eine Station des im Aufbau befindlichen UMTS Netzes einbezogen. Dank gilt hier der Firma Mobilcom Multimedia für den Aufbau und das Vorhalten eines Testsenders zum Zeitpunkt der Messungen.

## 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.
- [BFS 01] **Bundesamt für Strahlenschutz**, *Strahlenthema: Mobilfunk und Sendetürme*, November 2001.
- [BOR 98] **Chr. Bornkessel, U. Kullnick, H.-P. Neitzke und H. Voigt**, *Maßnahmenkatalog zur Verminderung der elektromagnetischen Umweltbelastung*, Studie im Auftrag des MURL NRW, IMST GmbH, Kamp-Lintfort (1998).
- [EMF 1] **Chr. Bornkessel, J. Kunisch und J. Pamp**, *Elektromagnetische Felder in NRW: Einfluss von Grenzwertverschärfungen auf die Gesamtmission*, Abschlussbericht IMST GmbH, Kamp-Lintfort (2002).
- [EMF 2] **Chr. Bornkessel, A. Schramm und M. Neikes**, *Elektromagnetische Felder in NRW: Messverfahren zur Ermittlung der Immissionen durch Mobilfunk Basisstationen*, Abschlussbericht IMST GmbH, Kamp-Lintfort (2002).
- [KUN 01] **J. Kunisch, E. Zollinger, S. Weitz, J. Simons und J. Pamp**, *Wideband Directional Channel Measurements within the IST ASILUM Project*, DVE ITG Diskussionssitzung "Systeme mit intelligenten Antennen, TU Ilmenau, Ilmenau, 16.03.2001.
- [NISV] **NISV**, *Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung*, Schweizerischer Bundesrat, 23. Dezember 1999.
- [PAU 00] **P. Pauli und D. Moldan**, *Reduzierung hochfrequenter Strahlung im Bauwesen*, Broschüre, Neubiberg (2000).
- [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.
- [WIE 01] **M. Baldauf, A. Herschlein und W. Wiesbeck**, *Schutzabstände in der Mobilkommunikation*, Frequenz, vol. 55, No. 11-12, S. 310-316 (2001).

## Abkürzungsverzeichnis

BImSchV	Bundes-Immissionsschutzverordnung
BCCH	Broadcast Control Channel (engl.) → Sende-Kontrollkanal
DTX	Discontinuous Transmission (engl.) → Sprachausstattung in Sprechpausen
GSM	Global System for Mobile Communications (eng.) → Globales System für Mobilkommunikation
HSA	Hauptsendeanlage
NSA	Nebensendeanlage
RegTP	Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System (eng) → Universelles Mobiltelekommunikationssystem

## Verzeichnis häufig verwendeter Symbole

$d$	lateraler Abstand
$h_S$	Senderhöhe
$h_E$	Empfängerhöhe
$r$	radialer Abstand
$C(\theta, \psi)$	normierte Richtcharakteristik einer Antenne
$G_{(i)}$	(isotroper) Gewinn
$P$	Leistung
$S$	elektrische Leistungsflussdichte
$\psi$	Azimut
$\theta$	Elevation