



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit

SCHRIFTENREIHE REAKTORSICHERHEIT UND STRAHLENSCHUTZ

**BESTIMMUNG DER EXPOSITION DER PERSONENGRUPPEN,
DIE IM RAHMEN DES PROJEKTES „QUERSCHNITTSSTUDIE
ZUR ERFASSUNG UND BEWERTUNG MÖGLICHER
GESUNDHEITLICHER BEEINTRÄCHTIGUNGEN DURCH
DIE FELDER VON MOBILFUNKBASISSTATIONEN“
UNTERSUCHT WERDEN.**

BMU - 2006-683



WIR STEuern UM AUF ERNEUERBARE ENERGIEN.

BMU – 2006-683

**„Bestimmung der Exposition der Personengruppen,
die im Rahmen des Projektes „Querschnittsstudie
zur Erfassung und Bewertung möglicher
gesundheitlicher Beeinträchtigungen durch die
Felder von Mobilfunkbasisstationen“ untersucht
werden.“**

ECOLOG

Institut für sozial-ökol. Forschung und Bildung gGmbH

Nieschlagstraße 26

30449 Hannover

IMPRESSUM

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

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

Herausgeber:

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

Referat RS I 2

Postfach 12 06 29

53048 Bonn

ISSN 1612-6386

Erscheinungsjahr: 2006



Schlussbericht zum Forschungsvorhaben

Bestimmung der Exposition von Personengruppen, die im Rahmen des Projektes "Querschnittsstudie zur Erfassung und Bewertung möglicher gesundheitlicher Beeinträchtigungen durch die Felder von Mobilfunkbasisstationen" untersucht werden

H.-P. Neitzke, J. Osterhoff, K. Peklo, H. Voigt und T. Wohlatz

ECOLOG-Institut für sozial-ökologische Forschung und Bildung gGmbH

Laufzeit des Vorhabens

1.2.2003 bis 31.1.2005

Danksagung

Das Forschungsvorhaben wurde aus Mitteln des Deutschen Mobilfunkforschungsprogramms finanziert. Die fachliche Betreuung erfolgte durch die AG Nichtionisierende Strahlung im Bundesamt für Strahlenschutz. Den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Arbeitsgruppe sei an dieser Stelle für kritische Diskussionen und Anregungen gedankt.

Ein besonderer Dank für intensive und kollegiale Zusammenarbeit geht an die Koordinatorin der epidemiologischen Querschnittsstudie Dr. G. Berg, Universität Bielefeld, sowie ihre Kolleginnen und Kollegen aus Bielefeld, Heidelberg, Mainz und München. Die gemeinsamen Sitzungen waren nicht nur fachlich sondern auch atmosphärisch außerordentlich anregend.

Etliche Kolleginnen und Kollegen haben das Projekt kritisch und konstruktiv begleitet. Stellvertretend für alle anderen danken wir Dr. C. Bornkessel, IMST Kamp-Lintfort, Dr. H. Brüggemeyer, Gewerbeaufsicht Hannover, und Prof. Dr. R. Frentzel-Beyme, Umweltforschungs- und Technologiezentrum Universität Bremen, für ihre Unterstützung.

Wichtige Arbeiten im Rahmen dieses Projekts wären nicht möglich gewesen, wenn uns nicht engagierte Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter in den Verwaltungen zahlreicher Städte und Gemeinden bei der Organisation von Wohnungen für Messungen unterstützt und die Wohnungsinhaber nicht so viel Geduld und Verständnis für unsere Arbeit aufgebracht hätten. Dafür danken wir ihnen.

Schließlich gebührt auch unseren Kolleginnen und Kollegen aus anderen Arbeitsbereichen im ECOLOG-Institut Dank für ihre Nachsicht, wenn die ein oder andere gemeinsame Mittagspause durch Diskussionen über Messverfahren und Ausbreitungsmodelle 'gesprengt' wurde, vor allem aber für ihre Einsicht in die Notwendigkeit, das Projekt über den Förderzeitraum hinaus weiterzuführen, um die Nutzung der Ergebnisse im Rahmen der epidemiologischen Querschnittsstudie zu gewährleisten.

Inhalt

	Seite	
I	Aufgabenstellung, Planung und Projektdurchführung	1
I.1	Aufgabenstellung	1
I.2	Voraussetzungen	2
I.3	Planung und Ablauf des Projekts	3
I.4	Wissenschaftliche Ausgangslage	5
I.4.1	Anforderungen an die HF-Expositionserfassung im Rahmen einer epidemiologischen Querschnittsstudie	5
I.4.2	Stand der Forschung	7
I.4.2.1	Messtechnische Verfahren zur Bestimmung der HF-Immissionen in der Umgebung von Funksendeanlagen	7
I.4.2.2	Verfahren zur Berechnung der HF-Immissionen in der Umgebung von Funksendeanlagen	10
I.5	Kooperationen	13
II	Ergebnisse und Ergebnisverwertung	14
II.1	Ergebnisse des Projekts	14
II.1.1	Messtechnische Bestimmung der Mobilfunk-Immissionen in Wohnungen	14
II.1.1.1	Messverfahren	14
II.1.1.2	Überprüfung der Messgeräte und des Messverfahrens	16
II.1.1.3	Ergebnisse der HF-Messungen in Wohnungen in der Umgebung von Mobilfunkbasisstationen	16
II.1.2	Rechnerische Abschätzung der Mobilfunk-Expositionen in Wohnungen	25
II.1.2.1	Rechenmodell I: Freiraumausbreitung, Transmissionsfaktoren für die Umgebung, Sichtbarkeit der Sendeantennen	26
II.1.2.2	Rechenmodell II: Freiraumausbreitung, räumliche Orientierung der Fenster und Wände, Einfallswinkel der elektromagnetischen Welle, Transmissionseigenschaften der Umgebungsbebauung und von Wänden, Sichtverhältnisse vor den Fenstern	32
II.2	Verwertung der Ergebnisse	46
III	Erfolgskontrollbericht	47
III.1	Beitrag zu den förderpolitischen Zielen	47
III.2	Wissenschaftliche Ergebnisse und Erfahrungen	47
III.3	Fortschreibung des Verwertungsplans	48
IV	Zusammenfassungen	49
IV.1	Kurzfassung des Abschlussberichts	49
IV.2	Summary	51
	Literatur	53

I Aufgabenstellung, Planung und Projektdurchführung

I.1 Aufgabenstellung

Im Rahmen des Deutschen Mobilfunkforschungsprogramms wird eine epidemiologische Querschnittsstudie durchgeführt, in der der Frage nachgegangen wird, ob es einen Zusammenhang zwischen dem Auftreten von unspezifischen Symptomen und Befindlichkeitsstörungen und den durch Mobilfunkbasisstationen verursachten Hochfrequenz- (HF-) Expositionen gibt. Vor diesem Hintergrund war eine Studie zur Machbarkeit einer zuverlässigen Ermittlung der Mobilfunk-Expositionen der Teilnehmer an der Querschnittsstudie durchzuführen. Da für die Querschnittsstudie in der ersten Phase mehr als 30.000 Teilnehmer, verteilt über ganz Deutschland, vorgesehen waren, schied die Möglichkeit von Messungen in jeder Teilnehmerwohnung aus. Ersatzweise sollten die Expositionen rechnerisch abgeschätzt werden, wobei allerdings nur Informationen und Daten benutzt werden konnten, die bereits verfügbar sind oder über einen, von den Teilnehmern an der Querschnittsstudie auszufüllenden, Fragebogen hinreichend verlässlich ermittelt werden können. Als zweite Phase der Querschnittsstudie ist eine Vertiefungserhebung mit rund 1000 Teilnehmern vorgesehen. In dieser Phase sind Messungen wahrscheinlich machbar, aber es ist ein rechnerisches Verfahren zur Vorabschätzung der Expositionen notwendig, um wahrscheinlich höher exponierte und wahrscheinlich geringer exponierte Wohnungen zu identifizieren.

Für das vorliegende Projekt ergaben sich vor diesem Hintergrund die folgenden Aufgabenpakete:

1. Auswertung der vorliegenden wissenschaftlichen Arbeiten zur Bestimmung von HF-Expositionen in Wohnungen und Überprüfung der Anwendbarkeit der benutzten Verfahren bzw. Formulierung der Anforderungen an eine vom Aufwand her durchführbare, hinreichend zuverlässige HF-Expositionsbestimmung im Rahmen epidemiologischer Studien;
2. Entwicklung eines Verfahrens zur Messung der hochfrequenten elektromagnetischen Felder von Mobilfunkstationen in Wohnungen, mit dem a) tatsächliche Immissionen in Wohnungen bestimmt werden können und das es b) erlaubt, mit vertretbarem Aufwand empirische Daten zu den HF-Expositionen in einer großen Zahl von Wohnungen zu sammeln, die als Grundlage und zur Überprüfung einer rechnerischen Expositionsabschätzung genutzt werden können; das Verfahren sollte zudem in der zweiten Phase der Vertiefungserhebung anwendbar sein;
3. Entwicklung eines Verfahrens zur näherungsweise Berechnung der Mobilfunk-Expositionen in Wohnungen auf der Basis der in der Standortdatenbank der Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post (RegTP) verfügbaren Anlagendaten und ergänzender Informationen zur Situierung der Wohnungen von Seiten der Teilnehmer an der epidemiologischen Querschnittsstudie.

I.2 Voraussetzungen

Zu den wichtigsten Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde, gehörte die Abstimmung der Zielsetzungen und der Vorgehensweise mit den Forschungsnehmern der epidemiologischen Querschnittsstudie. Das bedeutete vor allem ein flexibles Reagieren auf Änderungen in der Vorgehensweise im Rahmen der Querschnittsstudie und auf die Vorgaben, die sich aus der Datenlage ergaben. Zu Beginn der Arbeiten war u.a. nicht klar, welche Daten für Berechnungen der Immissionen in welcher Qualität zur Verfügung stehen würden. Der Zugriff auf die Standortdatenbank der Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post konnte erst Anfang des Jahres 2004 sichergestellt werden. Auch die Machbarkeit der Gewinnung von Daten und Informationen zu den Wohnungen der Teilnehmer an der Querschnittsstudie stand erst Anfang 2004 nach Durchführung eines Pretests fest.

Für die Entwicklung eines semi-empirischen Verfahrens zur rechnerischen Abschätzung der elektromagnetischen Immissionen in Wohnungen in der Umgebung von Mobilfunkbasisstationen waren umfangreiche Messungen durchzuführen. Da sich im Laufe des Projekts herausstellte, dass bestimmte Informationen, u.a. zur Sichtbarkeit von Sendeanennen von den Immissionsorten aus, im Rahmen der Querschnittsstudie nicht mit hinreichender Verlässlichkeit zu erheben waren, musste ein neues Berechnungsverfahren entwickelt werden, das ohne diese Informationen auskommt, und es wurden weit mehr Messungen erforderlich als ursprünglich geplant. Um die Parameter zu ermitteln, die in das Rechenmodell eingehen, wurden die Felder in rund 1100 Innenräumen vermessen. Dieser Umfang der Messungen war notwendig, um für unterschiedlichste Immissionssituationen eine hinreichende statistische Basis für die Bestimmung von Parametern zu haben, die die Verteilung der Immissionen beeinflussen (zur Auswahl der Messorte s. II.1.1.3). Die große Zahl von Messorten bedeutete nicht nur einen sehr hohen zeitlichen Aufwand für die Durchführung der Messungen sondern auch einen erheblichen Organisationsaufwand bei der Rekrutierung von Personen, die Ihre Wohnungen für Messungen zur Verfügung stellten. Durchführbar war dies nur durch eine enge Kooperation mit zahlreichen Städten und Gemeinden, die Wohnungsadressen bereit- und Kontakte zu den Wohnungsinhabern herstellten. Von den Kommunen wurden auch die Standortbescheinigungen zur Verfügung gestellt, denen ein Teil der Anlagendaten für die Berechnung entnommen wurde. Als 'Gegenleistung' erhielten die Kommunen und die Wohnungsinhaber Messberichte mit Erläuterungen der Ergebnisse.

I.3 Planung und Ablauf des Projekts

Aus der im Abschnitt I.1 beschriebenen Aufgabenstellung ergaben sich die folgenden Arbeitspakete:

1. Definition der Anforderungen an die Dosimetrie im Rahmen epidemiologischer Studien im Zusammenhang mit Expositionen durch HF-Anlagen (s. I.4.1);
2. Literaturstudie zu Verfahren zur Bestimmung von HF-Expositionen in Wohnungen und ihrer Anwendbarkeit im Rahmen epidemiologischer Studien (s. I.4.2);
3. Entwicklung eines Verfahrens zur Messung der hochfrequenten elektromagnetischen Felder in Wohnungen (s. II.1.1.1);
4. Überprüfung der Messgeräte und des Messverfahrens (s. II.1.1.2);
5. Bestimmung der Mobilfunk-Expositionen einer ausreichenden Zahl von Wohnungen (s. II.1.1.3);
6. Auswertung der Messungen im Hinblick auf die für die Immissionen in Innenräumen relevanten Parameter (s. II.1.2);
7. Entwicklung eines Verfahrens zur rechnerischen Abschätzung der Mobilfunk-Expositionen in Wohnungen (s. II.1.2);
8. Ermittlung der für das Rechenmodell erforderlichen Anlagen- und Ausbreitungsparameter (s. II.1.2);
9. Überprüfung der Güte des Näherungsverfahrens anhand von Messdaten (s. Kap. II.1.2);
10. Unterstützung der Forschungsnehmer der epidemiologischen Querschnittsstudie bei der Definition der Anforderungen an die Expositionsermittlung sowie bei der Beschaffung und Bewertung der für eine rechnerische Expositionsabschätzung erforderlichen Daten zu den Mobilfunkbasisstationen und den Immissionsorten (Wohnungen) (s. II.1.2.1);
11. Entwicklung eines Computerprogramms zur näherungsweise Berechnung der Mobilfunkimmissionen in den Wohnungen der Teilnehmer an der epidemiologischen Querschnittsstudie (s. II.1.2).

Die Methodik und die Ergebnisse der Arbeiten bei der Entwicklung von Verfahren für die HF-Dosimetrie im Rahmen epidemiologischer Studien wurden anlässlich des Fachgesprächs 'Dosimetrie bei epidemiologischen Studien um Basisstationen' am 15. März 2004 und des 2. Kolloquiums 'Epidemiologische Forschungsvorhaben zu hochfrequenten elektromagnetischen Feldern' am 4. Mai 2004 im Bundesamt für Strahlenschutz vorgestellt. Tabelle I.3.1 gibt einen Überblick über den zeitlichen Ablauf der im Rahmen des Projekts durchgeführten Arbeiten.

Tabelle I.3.1
Durchgeführte Arbeiten im Zeitraum 1.2.2003 bis 31.1.2005

Monat	Durchgeführte Arbeiten
02-05/2003	<ul style="list-style-type: none"> • Literaturstudie 'Epidemiologische Untersuchungen zu Gesundheitsrisiken in der Umgebung von Funksehdanlagen (insbesondere im Hinblick auf die Expositionserfassung) und Verfahren zur Erhebung der individuellen Exposition im Umfeld von Funksehdanlagen'. • Einrichtung einer Literaturdatenbank (auf der Basis der Datenbank EMFbase des ECOLOG-Instituts). • Definition der Anforderungen an die Dosimetrie im Rahmen epidemiologischer Studien im Zusammenhang mit Expositionen durch HF-Anlagen (insbesondere Mobilfunkbasisstationen). • Auswertung abgeschlossener bzw. laufender Messprogramme in einigen Bundesländern sowie Gesamtauswertung der bisher vom ECOLOG-Institut durchgeführten Gutachten zu den Expositionen in der Umgebung von Funksehdanlagen. • Recherche zur Verfügbarkeit bzw. Machbarkeit des Einsatzes von HF-Personendosimetern im Rahmen epidemiologischer Untersuchungen.
06/2003	Erprobung des Messsystems

Monat	Durchgeführte Arbeiten	
06/2003		Entwicklung eines Konzepts für die näherungsweise Berechnung der Mobilfunk-Immissionen in Wohnungen (Rechenmodell I) Auswertung der technischen Daten von Mobilfunkanlagen, zu denen bereits Unterlagen der Netzbetreiber bzw. der RegTP vorlagen
07/2003	Messungen in Hannover und Ritterhude Arbeiten im Rahmen der Messungen: - Kontaktaufnahme mit Kommunen, um Informationen über Mobilfunkstandorte und Zugang zu Wohnungen für Messungen zu erhalten - Organisation der Messungen - Vermessung der HF-Immissionen in Wohnungen und im Außenraum um Mobilfunkanlagen 1. Kolloquium 'Epidemiologische Forschungsvorhaben des BfS zu hochfrequenten elektromagnetischen Feldern'	
08/2003	Messungen in Hannover und Ritterhude	
09/2003	Messungen in Hannover, Ritterhude und Schenefeld	
10/2003	Messungen in Hannover, Ritterhude und Springe Abstimmungsgespräch mit den Forschungsnehmern der epidemiologischen Querschnittsstudie Auswertung der Messungen	
11/2003	Messungen in Celle, Fürth, Frankfurt, Mellendorf und Paderborn	Erprobung des Verfahrens für die näherungsweise Berechnung der Mobilfunk-Immissionen in Wohnungen (Rechenmodell I) anhand der Daten der bis dahin untersuchten Wohnungen
12/2003	Messungen in Gandesbergen und Seevetal	
01/2004	Auswertung der Messungen Abstimmungsgespräch mit den Forschungsnehmern 'Epidemiologische Querschnittsstudie'	
02/2004	Auswertung der Messungen	Bestimmung der empirischen Parameter zur Berechnung der Mobilfunk-Immissionen in Wohnungen (Rechenmodell I) für Siedlungsgebiete mit aufgelockerter Bebauung auf der Grundlage der vorliegenden Messdaten
03/2004	Messungen in Hannover Abstimmungsgespräch mit den Forschungsnehmern 'Epidemiologische Querschnittsstudie' BfS-Seminar 'Dosimetrie bei epidemiologischen Studien um Basisstationen'	
04/2004	Messungen in Bielefeld und Hannover Vergleich der Messverfahren in Zusammenarbeit mit dem IMST Abstimmungsgespräch mit den Forschungsnehmern 'Epidemiologische Querschnittsstudie'	Modifikation des Rechenmodells und des Computerprogramms für die näherungsweise Berechnung der Mobilfunk-Immissionen in Wohnungen (Rechenmodell II) Bestimmung der empirischen Parameter zur Berechnung der Mobilfunk-Immissionen in Wohnungen für Siedlungsgebiete mit unterschiedlicher Bebauung
05/2004	Messungen in Hannover Abstimmungsgespräch mit den Forschungsnehmern 'Epidemiologische Querschnittsstudie' 2. Kolloquium 'Epidemiologische Forschungsvorhaben des BfS zu hochfrequenten elektromagnetischen Feldern' Ergänzende Test-Messungen mit unterschiedlichen Messrastern	
06/2004 – 01/2005	Messungen in Bremen, Bullau, Erbach, Frankfurt, Hannover, Kleinheidorn, Kiel, Köln, Lehrte, Schköna, Steinhude, Wetzlar, Wunstorf, Würzburg	
11/2004 – 01/2005	Ergänzende Datenerhebungen (Lage von Wohnungen) an früheren Messorten	Modifikation des Rechenmodells II und des Computerprogramms zur näherungsweisen Berechnung der Mobilfunk-Immissionen in Wohnungen
01/2005		
Arbeiten nach Ende der Projektlaufzeit		
02-04/2005	Unterstützung der Forschungsnehmer der epidemiologischen Querschnittsstudie bei der Datenorganisation, Anpassung des Computerprogramms an die Datenstruktur, Überprüfung der Einsetzbarkeit eines HF-Personendosimeters im Rahmen der epidemiologischen Querschnittsstudie, Erstellung der Messberichte für die Kommunen und die Wohnungsinhaber, die Wohnungen für Messungen organisiert oder bereit gestellt hatten	

I.4 Wissenschaftliche Ausgangslage

I.4.1 Anforderungen an die HF-Expositionserfassung im Rahmen einer epidemiologischen Querschnittsstudie

Im Rahmen dieses Projekts sollte ein Verfahren zur Ermittlung der Hochfrequenz-Expositionen - insbesondere durch Mobilfunkbasisstationen - der Teilnehmer an einer epidemiologischen Querschnittsstudie entwickelt werden. Die allgemeinen Anforderungen an die HF-Dosimetrie im Rahmen epidemiologischer Studien wurden bereits im ersten Zwischenbericht formuliert. Da das Design der epidemiologischen Querschnittsstudie jetzt feststeht, können die Anforderungen weiter konkretisiert werden:

1. Abschätzung der Expositionen in einer großen Zahl von Wohnungen, messtechnische Überprüfung der Immissionen in ausgewählten Wohnungen

In der ersten Phase der epidemiologischen Querschnittsstudie sind die Expositionen in rund 30.000 Wohnungen, die repräsentativ über Deutschland verteilt sind, zu ermitteln. Messungen in einer so großen Zahl von Wohnungen sind wegen des damit verbundenen Aufwands nicht machbar. Auch detaillierte Rechnungen auf der Basis der genauen technischen Daten der Mobilfunkbasisstationen und unter Berücksichtigung der Einflüsse der Umgebung (Reflexion, Absorption, Beugung, Brechung, Streuung) auf die Immissionen sind nicht durchführbar. Es stehen zwar Rechenverfahren zur Verfügung, mit denen dies zumindest näherungsweise möglich ist (s. I.4.2), aber der Aufwand ist auch bei diesen Verfahren erheblich und, was entscheidend ist, es stehen weder die technischen Daten der Sendeanlagen noch die erforderlichen digitalisierten Stadtmodelle für detaillierte Berechnungen zur Verfügung. Andererseits sind einfache Expositionsmaße, wie der Abstand zwischen Sendeanlage und Immissionsort, ungeeignet (s. II.1.1.3).

In den Projektgesprächen mit den Forschungsnehmern der epidemiologischen Querschnittsstudie wurde die folgende Vorgehensweise festgelegt:

In der ersten Phase der Studie sind die Expositionen in rund 30.000 Wohnungen auf der Basis

- der in den Standortbescheinigungen der Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post (RegTP) verfügbaren Anlagendaten (s. II.1.2.1),
- einfacher erhobener Daten zum Immissionsort (s. II.1.2.1) und
- empirisch ermittelter Ausbreitungsfaktoren, die die Einflüsse der Umgebung auf die Immissionen berücksichtigen (s. II.1.2.2),

näherungsweise zu berechnen.

Die berechneten Immissionen werden zur Auswahl von ca. 1000 Teilnehmern an der Studie herangezogen, für die in der zweiten Phase der epidemiologischen Querschnittsstudie detaillierte Gesundheitsdaten durch Interviewer vor Ort erhoben werden. In den anhand der Immissionsrechnungen ausgewählten Wohnungen, die in dieser Phase ohnehin aufgesucht werden müssen, sollen dann Messungen zur Überprüfung der Immissionen durchgeführt werden. Ursprünglich war angedacht, hierfür das gleiche Messverfahren zu benutzen, mit dessen Hilfe im Rahmen dieses Projekts die für die näherungsweise Berechnung der Immissionen erforderlichen Ausbreitungsfaktoren bestimmt werden (s. II.1.1.1, II.1.1.2). Da mittlerweile jedoch ein geeignetes Personendosimeter verfügbar ist, mit dem individuelle Expositionen sehr einfach erfasst werden können, wird dieses wahrscheinlich zum Einsatz kommen.

2. Erfassung der tatsächlichen Expositionen

Die bisher durchgeführten Messungen an Mobilfunkanlagen hatten überwiegend einen immissionsschutzrechtlichen Hintergrund (s. z.B. Wuschek 2000, FHH/Umweltbehörde 2001, Bornkessel et al. 2002 b, BUWAL 2002, EM-Institut 2002 a, b, Metas 2002, Bochtler et al. 2003), d.h. es waren die maximal möglichen Immissionen an den jeweiligen Messorten zu ermitteln und mit den

gesetzlichen Grenzwerten zu vergleichen. Zur Ermittlung des maximalen Immissionswerts in einem Raum wird in der Regel die Schwenkmethode angewandt (Bornkessel et al. 2002 a, BUWAL 2002), bei der das Messvolumen mit einer Messantenne abgetastet wird. Dabei werden gleichzeitig die Vorzugsrichtung der Messantenne und die Polarisationsrichtung (horizontal, vertikal, $\pm 45^\circ$) variiert. Der Spektrumanalysator wird auf die Betriebsart 'Max hold' eingestellt und es werden mehrere Sweeps durchgeführt. Im Spektrum werden nur die Teile aktualisiert, in denen beim aktuellen Durchlauf ein höherer Wert festgestellt wird als bei vorangegangenen Durchläufen. Die Messergebnisse werden zudem auf maximal mögliche Auslastung der jeweiligen Sendeanlage hochgerechnet. Diese oft von kleinräumigen oder nur sehr kurzzeitig auftretenden Extremwerten (s. II.1.1.3) dominierten, auf maximal mögliche, aber nur selten auftretende, Sendeleistungen extrapolierten Immissionen sind als epidemiologisches Expositionsmaß nicht geeignet. In der epidemiologischen Querschnittsstudie sollen nach Absprache mit den Forschungsnehmern des Vorhabens die tatsächlichen Expositionen als räumlich und zeitlich gemittelte Immissionswerte bestimmt werden. Dabei sind die Beiträge aus allen Raumrichtungen und aller Polarisationsrichtungen zu berücksichtigen.

3. Erfassung der Expositionen an einem Daueraufenthaltort

Für epidemiologische Studien wäre eine personenbezogene Dosimetrie wünschenswert, mit der die Expositionen über 24 Stunden an unterschiedlichen Orten (Wohnung, Arbeitsplatz usw.) erfasst werden können. Zu Beginn des Projekts stand weder ein geeignetes Personendosimeter noch ein leicht zu transportierendes und zu bedienendes Messsystem, das hierfür eingesetzt werden könnte, zur Verfügung. Mittlerweile wird ein Personendosimeter für den Hochfrequenzbereich angeboten (Fa. Antennessa). Solche Geräte kommen unter Umständen im Rahmen einer Vertiefungserhebung zum Einsatz, wenn nur noch die Expositionen von ca. 1000 Personen zu erfassen sind. Für die Primärstudie mit 30.000 Teilnehmern ist eine Expositionserfassung mit Hilfe von Personendosimetern aufgrund des hohen finanziellen und zeitlichen Aufwands nicht machbar. Hier ist nur eine Expositionsabschätzung anhand eines geeigneten Berechnungsverfahrens möglich. Nachdem zunächst die Mittelwerte der Immissionen in den Wohnungen der Teilnehmer an der epidemiologischen Querschnittsstudie als Expositionsmaß geplant waren, wurde von den Forschungsnehmern der epidemiologischen Querschnittsstudie später vorgegeben, dass in der ersten Phase der Studie die Expositionen in den Schlafzimmern der Studienteilnehmer zu ermitteln sind, da das Schlafzimmer der Raum in der Wohnung ist, in dem sich erwachsene Personen in der Regel am längsten durchgehend aufhalten. Für die Expositionsklassifizierung sind also vor allem die nachts auftretenden Immissionen zu bestimmen bzw. abzuschätzen.

4. Getrennte Erfassung der Immissionen durch Mobilfunkanlagen und andere HF-Quellen

Für eine epidemiologische Untersuchung, die der Frage nachgeht, ob insbesondere die Felder von Mobilfunkbasisstationen zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen führen, ist eine eindeutige Unterscheidung der Expositionen durch Mobilfunkanlagen von Expositionen durch andere Anlagen und Geräte erforderlich.

Im Rahmen der Projektgespräche mit den Forschungsnehmern der epidemiologischen Querschnittsstudie wurde festgelegt, dass ein Verfahren zu entwickeln ist, mit dem die von Mobilfunkanlagen in Innenräumen (Schlafzimmern) verursachten Hochfrequenz-Immissionen ermittelt werden können. Da die UMTS-Netze zur Zeit der medizinischen Befragung der Teilnehmer an der Querschnittsstudie im September/Oktober 2004 nur in wenigen Gebieten ihren Betrieb aufgenommen hatten, wurde vereinbart, die Mobilfunkimmissionen über die Beiträge der GSM 900- und GSM 1800-Netze abzuschätzen. Andere Beiträge zu den Hochfrequenzimmissionen (Radio- und Fernsehsender, schnurlose Telefone) sollen zwar als mögliche Confounder berücksichtigt, aber

zumindest in der ersten Phase der Querschnittsstudie nicht explizit bestimmt werden. Unabhängig von dieser Festlegung wurden im Rahmen dieses Projekts jedoch auch Messungen in anderen Frequenzbereichen als den vom Mobilfunk belegten durchgeführt, um zu ermitteln, welche relativen Anteile die einzelnen Quellen an den Hochfrequenzimmissionen haben (s. II.1.1.3).

5. Ermittlung der aktuellen Expositionen

In der geplanten epidemiologischen Querschnittsstudie soll einem möglichen Zusammenhang zwischen Mobilfunk-Expositionen durch Basisstationen und akuten gesundheitlichen Beeinträchtigungen nachgegangen werden. Von Seiten der Forschungsnehmer der epidemiologischen Querschnittsstudie wird davon ausgegangen, dass für die zu untersuchenden Symptome die aktuellen und weniger historische Expositionen von Bedeutung sind. Messungen und Berechnungen im Rahmen der epidemiologischen Querschnittsstudie sollen daher die aktuellen Expositionen wiedergeben. Es entfällt die Aufgabe, Expositionen über längere Zeiträume in der Vergangenheit zu rekonstruieren, wie es bei Krankheiten mit langen Latenzzeiten unter Umständen notwendig wäre.

I.4.2 Stand der Forschung

I.4.2.1 Messtechnische Verfahren zur Bestimmung der HF-Immissionen in der Umgebung von Funksendeanlagen

In epidemiologischen Studien, die in der Vergangenheit möglichen Gesundheitsrisiken bei Anwohnern von Hochfrequenzsendeanlagen nachgingen, wurden die Expositionen in der Regel anhand des Abstands zwischen Sendeanlage und Immissionsort abgeschätzt (Maskarinec et al. 1994, Hocking et al. 1996, Dolk et al. 1997 a, b, McKenzie et al. 1998, Cooper et al. 2001, Michelozzi et al. 2002, Santini et al. 2002, 2003 a, b, Navarro et al. 2003). Nur von Hutter et al. (2002) wurden Messungen der hochfrequenten Felder für die Expositionsklassifizierung benutzt. Zur Machbarkeit einer zuverlässigen Dosimetrie im Rahmen epidemiologischer Studien gibt es einige grundsätzliche Überlegungen (s. z.B. Blettner et al. 2000, COST 281 2002, Leitgeb 2003, Schüz & Mann 2000, UB/DKFZ/UM 1999). Die in größerer Zahl durchgeführten punktuellen Messungen der HF-Immissionen in der Umgebung von Mobilfunkbasisstationen sind für die Beurteilung der Machbarkeit einer zuverlässigen Dosimetrie im Rahmen epidemiologischer Studien nur von begrenztem Nutzen, da das Ziel solcher Untersuchungen darin besteht, festzustellen, inwieweit Grenzwerte im 'worst case' ausgeschöpft werden. Die 'worst case'-Exposition ist aber kein gutes Maß für die tatsächliche Exposition (Olivier & Martens 2003).

In Deutschland wurden umfangreichere Messprogramme im Auftrag der zuständigen Landesbehörden in Hamburg, Nordrhein-Westfalen und Schleswig-Holstein durchgeführt (Wuschek 2000, FHH/Umweltbehörde 2001, Bornkessel et al. 2002 b). Die Ergebnisse dieser Messungen wurden veröffentlicht. In Bayern wurden im Auftrag des Landesamtes für Immissionsschutz in den Städten Augsburg und Regensburg Messungen durchgeführt, deren Ergebnisse über das Internet verfügbar sind (EM-Institut 2002 a, b). Auch das Informationszentrum Mobilfunk hat Messungen in mehreren Bundesländern durchführen lassen (s. z.B. IZMF 2003a, b).

Unabhängig von den Messprogrammen in einigen Bundesländern führt die Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post (RegTP) regelmäßig bundesweite Messungen der Hochfrequenzimmissionen durch. Die Messungen der RegTP erfolgen an willkürlich festgelegten Orten im öffentlichen Raum. Es wird nicht gezielt in der Umgebung von Mobilfunkstandorten gemessen und es werden keine Innenraummessungen durchgeführt. Bei den Untersuchungen im Auftrag von Landesbehörden Bayern, Hamburg und Nordrhein-Westfalen wurden dagegen gezielt Messungen im Umfeld von Mobilfunkbasisstationen durchgeführt. Außerdem wurde in Nordrhein-Westfalen an allen sowie in Bayern,

Hamburg und Schleswig-Holstein zumindest an einigen Mobilfunkanlagen auch in Innenräumen benachbarter Häuser gemessen.

Neben den Messprogrammen im staatlichen Auftrag gibt es eine große Zahl von Messungen und Standortuntersuchungen, die von wissenschaftlichen Instituten, Ingenieurbüros oder baubiologischen Büros im Auftrag von Kommunen, Verbänden oder Privatpersonen durchgeführt wurden. In der Zeitschrift *Öko-Test* wurden Ergebnisse von 28 Messungen überwiegend in Innenräumen an verschiedenen Orten in Deutschland und Österreich veröffentlicht (*Öko-Test* 2001). Im Raum Göttingen wurde in Zusammenarbeit zwischen dem BUND und einem Baubiologen eine Messaktion durchgeführt, bei der bisher in 30 Wohnungen gemessen wurde (BUND 2003). Das ECOLOG-Institut hat im Rahmen von Standortgutachten umfangreiche Messungen in Wohnungen und Büros durchgeführt (Neitzke & Voigt 2003).

Die methodische Vorgehensweise wird vor allem in den Untersuchungen des Instituts für Mobilfunk- und Satellitentechnik (IMST) ausführlich diskutiert (Bornkessel et al. 2002 a, Bornkessel & Pamp 2002). Ein Schwerpunkt in der IMST-Untersuchungen bestand in dem Versuch einer Klassifizierung von Mobilfunkanlagen nach bestimmten Typen, mit dem Ziel der Übertragung von typischen (gemessenen) Immissionen im Umkreis einer Anlage auf andere Anlagen des selben Typs (Bornkessel et al. 2002 b). Die Möglichkeit einer solchen Anlagentypisierung würde nicht nur bei der Erstellung von Immissionskatastern zu deutlichen Vereinfachungen führen, sondern könnte auch für die Dosimetrie im Rahmen epidemiologischer Untersuchungen hilfreich sein. Das IMST kommt allerdings mit seiner Typenbildung auf der Grundlage einer Kombination von qualitativen anlagen-, umgebungs- und immissionsseitigen Merkmalen zu keinem einheitlichen Bild. Die Chancen für eine Typenbildung könnten allerdings größer sein, wenn nicht nur qualitative Merkmale, sondern auch einfach zu ermittelnde quantitative Anlagen- und Umgebungsparameter berücksichtigt würden, wie bei dem im Rahmen dieses Vorhabens entwickelten Berechnungsverfahren (s. II.1.2).

Auch im europäischen Ausland wurden einige Messprogramme zu den von Mobilfunkanlagen verursachten Immissionen durchgeführt. Im Rahmen der COST 244bis-Aktion 'Biomedical Effects of Electromagnetic Fields' wurden neben exemplarischen Ergebnissen aus Deutschland/Bayern (17 Messorte) Messergebnisse an Stationen in Österreich (233 Messorte), Frankreich (10 Messorte), Ungarn (80 Messorte) und Schweden (31 Messorte) zusammengestellt (Bergqvist et al. 2001). In Belgien ist ein Messprogramm in Vorbereitung. Die nationalen Berichte wurden alle nach dem gleichen Schema aufgebaut und es wurden einheitliche Klassifizierungen für die Standortlage und die Expositionssituation verwendet. Angegeben werden ferner das Frequenzband, die gemessene Leistungsdichte (für einzelne GSM-Frequenzen und mit Ausnahme eines Teils der Messungen aus Österreich auch als Summe über alle GSM-Frequenzen) sowie der Abstand zur nächsten Basisstation, wenn einzelne Stationen als Emissionsquellen identifiziert wurden. Die Ergebnisse dieser Messungen haben wie die der Messungen in Hamburg und Schleswig-Holstein vor allem statistischen Wert, indem sie die Bandbreite der Expositionen der Bevölkerung aufzeigen. Diese entsprechen hinsichtlich der Relationen zwischen Immissionen und ICNIRP-Grenzwertempfehlungen den Ergebnissen der deutschen Untersuchungen.

Als Grundlage für weitere Überlegungen zur HF-Dosimetrie an Mobilfunkanlagen im Rahmen epidemiologischer Studien sind die im Rahmen der COST 244bis-Aktion veröffentlichten Untersuchungen nicht geeignet. Das gilt auch für die vom Bundesamt für Kommunikation der Schweiz (BAKOM) herausgegebenen Ergebnisse der Messungen an 13 Mobilfunk-Standorten in Salzburg (BAKOM 2002). Auch die Untersuchungen der Regionalen Umweltschutzagentur von Piemont in Turin liefern nur grobe Hinweise auf die großflächige Immissionssituation in einer Großstadt (Anglesio et al. 2001). Systema-

tische Messungen in unterschiedlichen Stockwerken an 38 Orten in der Stadt erlauben hier aber zumindest Aussagen über die mittleren Expositionen durch Mobilfunkanlagen, Radio- und Fernsehsender in unterschiedlichen Höhen. Zudem gibt diese Arbeit einige Hinweise für die Entwicklung einer vereinfachten Messstrategie.

Für die Entwicklung einer Methodik für die Expositionserfassung in epidemiologischen Studien sind die vom Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) der Schweiz herausgegebenen Messempfehlungen (BUWAL 2002), die methodischen Untersuchungen im Rahmen der Vergleichsmessungen an Mobilfunkbasisstationen für das Bundesamt für Metrologie und Akkreditierung (METAS) der Schweiz (METAS 2002) sowie die methodischen Überlegungen und Hinweise im Rahmen des NRW-Messprogramms (Bornkessel et al. 2002 a) nützlich, wenn auch die Zielrichtung dieser Untersuchungen eine andere war (weitere für die Messpraxis wertvolle Hinweise finden sich in NCRP 1993, Garn 1997, Borsero et al. 2001 und Martínez-González et al. 2002). Das Hauptproblem dieser Untersuchungen ist die Ermittlung der maximalen Immissionen an den Messorten. Dazu wird der Spektrumanalysator auf die Betriebsart 'Max hold' eingestellt und es werden mehrere Sweeps durchgeführt. Im Spektrum werden nur die Teile aktualisiert, in denen beim aktuellen Durchlauf ein höherer Wert festgestellt wird als bei vorangegangenen Durchläufen. Da in diesen Untersuchungen mit Richtantennen gearbeitet wurde, hingen die Messwerte nicht nur von den tatsächlichen Immissionen, sondern auch von der Ausrichtung der Antenne ab. Um den Maximalwert der Immission in einem Messvolumen zu ermitteln, kann entweder die Schwenk- oder die Drehmethode angewandt werden (Bornkessel et al. 2002 a, BUWAL 2002):

Schwenkmethode: das Messvolumen wird mit der Messantenne abgetastet, wobei gleichzeitig die Vorzugsrichtung der Messantenne und die Polarisationsrichtung (horizontal, vertikal, $+45^\circ$, -45°) variiert werden;

Drehmethode: die Antenne wird auf einer kreisförmigen Bahn um einen festen Drehpunkt bewegt, diese Bewegung wird nacheinander für alle möglichen Polarisierungen und in unterschiedlichen Höhen (0,75 m, 1,25 m, 1,75 m) durchgeführt.

Die Verwendung einer Antenne mit Dipolcharakteristik vereinfacht das Verfahren. Mit einer solchen Messvorrichtung kann mit vertretbarem Aufwand die Punktrastermethode angewendet werden:

Punktrastermethode: die Antenne wird nacheinander in den drei orthogonalen Raumrichtungen positioniert und es wird jeweils ein Spektrum aufgenommen; aus den drei Spektren je Punkt wird die Summenfeldstärke ermittelt; die Messung wird an allen Punkten eines vorgegebenen Rasters wiederholt. Die Schritte der Umpositionierung der Antenne und der Summenbildung entfallen, wenn eine Messsonde mit isotroper Nachweischarakteristik verwendet wird. Ein solches Messsystem wurde bei den Messungen im Rahmen dieses Projekts eingesetzt (s. II.1.1).

Bei der überwiegenden Mehrzahl der bisher durchgeführten Messprogramme stand die Frage nach dem Verhältnis von möglichen Expositionen zu Grenz- oder Vorsorgewerten im Mittelpunkt des Interesses. Für diese Fragestellung ist ein Verfahren zur Extrapolation der Immissionen auf maximale Anlagenauslastung unverzichtbar. Für GSM-Anlagen ist diese Extrapolation relativ einfach möglich, da

- die Abstrahlung im physikalischen Organisationskanal ständig mit derselben Frequenz mit maximaler Leistung erfolgt und
- der Organisationskanal und die Verkehrskanäle bei Verwendung eines Spektrumanalysators im Frequenzspektrum getrennt erfasst werden können.

Das Verfahren zur Ermittlung der Immissionen bei maximaler Anlagenauslastung ist für GSM-Anlagen z.B. in Bornkessel et al. 2002 a, BUWAL 2002 und Neitzke & Voigt 2002, 2003 beschrieben. Es besteht im Wesentlichen darin, die für die Verkehrskanäle gemessene Leistungsdichte auf die in den zugehörigen Organisationskanälen ermittelte Leistungsdichte hochzurechnen. Hierfür sind allerdings Informati-

onen von Seiten der Anlagenbetreiber zu der Zahl der an dem Anlagenstandort zur Verfügung stehenden Frequenzkanäle erforderlich.

Das für GSM-Anlagen anwendbare Mess- und Berechnungsverfahren kann nicht auf UMTS-Anlagen übertragen werden. Da auch UMTS-Anlagen wechselnde Zahlen von Teilnehmern versorgen und mit einer Leistungsregelung arbeiten, ist der momentane Messwert wie bei GSM-Anlagen kein geeignetes Maß zur Bestimmung der Immissionen bei maximaler Anlagenauslastung. Anders als bei GSM-Anlagen gibt es jedoch keinen im Frequenzspektrum einfach zu separierenden Organisationskanal, der mit konstanter Leistung sendet und dessen Sendeleistung auch die Obergrenze für die Sendeleistung in den Verkehrskanälen darstellt. Bei UMTS werden die Funktionen, die der Organisationskanal bei GSM erfüllt, vom Pilotkanal übernommen. Dieser sendet zwar auch ständig mit einer konstanten Leistung, die die maximale Ausdehnung der Funkzelle bestimmt, er wird jedoch mit den Beiträgen aller Teilnehmer in einem Signalgemisch in einem gemeinsamen Kanal übertragen und kann nicht mit einem Spektrumanalysator aus dem Breitband-Signalgemisch herausgefiltert werden. Hierfür ist eine entsprechende Ausrüstung (Code Domain Messgerät) erforderlich. Hinweise zur Messtechnik bei UMTS-Signalen und exemplarische Messergebnisse finden sich bei Buscaglia & Gianola (2001), Bach Andersen et al. (2002), Hesse et al. (2002), Martens et al. (2002), Wuschek (2005).

Für die Dosimetrie im Rahmen epidemiologischer Studien ist das beschriebene Problem allerdings nicht relevant, da es hier nicht um immissionsschutzrechtliche Fragen und die Überprüfung der Einhaltung von Grenzwerten bei maximal möglichen Immissionen geht, sondern das Ziel die Bestimmung der tatsächlichen Expositionen der Teilnehmer an solchen Studien ist.

I.4.2.2 Verfahren zur Berechnung der HF-Immissionen in der Umgebung von Funksendeanlagen

Vor dem Hintergrund der Erfordernisse bei der Planung von Mobilfunknetzen wurden zahlreiche Verfahren zur Modellierung der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen und zur Berechnung räumlicher Feldverteilungen entwickelt (s. z.B. die Zusammenfassungen in Bornkessel & Pamp 2002, Chew et al. 1997, Geng & Wiesbeck 1998, Iskander & Yun 2002). Bei der Modellierung sind Makro-, Mikro- und Picozellen zu unterscheiden. Makrozellen mit typischen Zellradien von 500 m bis 30 km werden in der Regel über einen Sender auf einem hohen Turm versorgt. Bei Mikrozellen (Zellradius 250 m bis 2 km) und vor allem bei Picozellen (Zellradius bis 500 m) kann die Höhe der Sendeantenne geringer sein als die mittlere Höhe der Gebäude in der Umgebung. In diesen Fällen haben die Geometrie des Terrains und der Gebäude sowie die Materialeigenschaften unterschiedlicher Objekte in der Zelle einen starken Einfluss auf die Ausbreitung der Funkwelle. Beugung, Reflexion, Streuung und andere Ausbreitungseffekte sind zu berücksichtigen.

In Makro- und teilweise auch noch in Mikrozellen lassen sich gute Ergebnisse mit Hilfe klassischer empirischer Methoden erzielen. Dabei werden Gleichungen benutzt, die auf der statistischen Auswertung umfangreicher Feldmessungen beruhen. Empirische Methoden sind einfach anzuwenden und effizient. Sie liefern gute Ergebnisse für Umgebungen, die die gleichen Charakteristika haben wie die Umgebungen, in denen die Messungen durchgeführt wurden. Die tatsächlichen physikalischen Eigenschaften der elektromagnetischen Welle und der Objekte im Ausbreitungsraum spielen keine Rolle. Diese können durch die Anwendung semi-empirischer Verfahren aber zumindest näherungsweise berücksichtigt werden (z.B. Zweistrahtheorie oder Abschätzung der Beugungsdämpfung durch Multiple-Knife-Edge-Modelle). Einfache empirische oder semi-empirische Rechenmodelle sind zur Überprüfung der Einhaltung von Grenzwerten nicht geeignet.

Für kompliziertere Verhältnisse gibt es bisher kein allgemeines empirisches und statistisches Modell (ein möglicher Ansatz wird von Franceschetti et al. (1999) beschrieben, s.u.). Hier wäre eigentlich eine vollständige feldtheoretische Lösung, das heißt Lösung der Maxwell-Gleichungen unter Erfüllung aller Randbedingungen, erforderlich. Da dies aber nur numerisch und mit einem erheblichen Aufwand möglich ist, müssen oft vereinfachende Annahmen gemacht werden. Eine feldtheoretische Lösung ohne Vereinfachungen ist nur machbar, wenn das betrachtete Volumen im Vergleich mit der Wellenlänge klein ist. Dies ist z.B. bei nicht zu hohen Frequenzen innerhalb von Gebäuden der Fall. In solchen Fällen kann die Finite Difference Time Domain Method (FDTD) angewandt werden. Sind die Abmessungen aller Objekte deutlich größer als die Wellenlänge, können die Felder in Analogie zur geometrischen Optik als Strahlen aufgefasst werden. Die Aufgabe besteht dann darin, alle relevanten Strahlungswege zu suchen und deren Zusammenwirken am Immissionsort zu analysieren. Strahlenoptische Modelle werden zur Modellierung der Ausbreitung in ländlichen und urbanen Gebieten aber auch in Gebäuden eingesetzt. Franceschetti et al. (1999) beschreiben die Anwendung der strahlenoptischen Methode bei der Berechnung der Ausbreitung elektromagnetischer Felder in dicht bebauten Stadtgebieten mit ungeordneten verlustlosen Streuern, wobei der Random Walk-Ansatz verwendet wird. Ihr Ziel ist eine statistische Charakterisierung der Ausbreitungstiefe in dem 'Medium' als Funktion der Dichte der Streuer und dem Einfallswinkel der Strahlen. Ein ähnliches Verfahren zur Berechnung der Immissionen in komplexeren Umgebungen von Mobilfunkanlagen wird am Ende dieses Kapitels vorgestellt.

Beispiele für die Anwendung verschiedener Näherungsmethoden finden sich auch bei Geng & Wiesbeck (1998). Die strahlenoptische Methode wird auch von Iskander & Yun (2002) ausführlich diskutiert. In Tabelle I.4.1 sind einige weitere Beispiele aus der Literatur für verschiedene Ausbreitungssituationen zusammengestellt.

Für die Planung von Mobilfunknetzen werden zahlreiche Softwarepakete angeboten. Es gibt auch Modifikationen solcher Planungswerkzeuge und Neuentwicklungen zur Darstellung großflächiger Immissionsituationen (s. z.B. TeS 2000, Plotzke et al. 2003, BAKOM 2002), die auch zur Minimierung der großflächigen Expositionen im Rahmen der Netzplanung genutzt werden (s. z.B. Kalau & Kamp 2002). Der Nutzbarkeit der vorhandenen Netzplanungs-Software zur Unterstützung der Dosimetrie im Rahmen epidemiologischer Studien sind aber klare Grenzen gesetzt: Die Programme berücksichtigen zwar Reflexionen und Beugungseffekte und durch die Übernahme digitalisierter Luftaufnahmen können ganze Städte, Gemeinden oder Straßenzüge recht genau modelliert werden. Nicht berücksichtigt werden können allerdings Einflüsse verschiedener Materialeigenschaften (z.B. das unterschiedliche Absorptions- und Reflexionsvermögen von Beton mit und ohne Armierung, von Ziegelsteinen, Holzverkleidungen oder von unterschiedlichen Fensterglasarten), der Vegetation und von Niederschlägen. Auch können die Immissionen durch Kleinanlagen und Geräte, wie schnurlose Telefone, W-LANs usw., nicht einbezogen werden. Die entscheidenden Probleme bei einer großen Zahl von Wohnungen, die hinsichtlich ihrer Exposition zu klassifizieren sind, stellen aber die Beschaffung der detaillierten technischen Daten aller Sendeanlagen, die zu den Immissionen beitragen, fehlende digitale Bebauungs- und Wohnungsmodelle und der Rechenaufwand dar.

Tabelle I.4.1

Beispiele für die Modellierung der Ausbreitung hochfrequenter elektromagnetischer Wellen mit Frequenzen im Mobilfunkbereich

Ausbreitungssituation	Methode	Literaturhinweis
Ausbreitung in Ziegel- und Betonwänden	Strahlenoptische Methode	Pena 2003
Ausbreitung in Innenräumen	Strahlenoptische Methode	Degli-Esposti et al. 2001
Ausbreitung in einem Straßentunnel	Strahlenoptische Methode	Didascalou et al. 2001
Ausbreitung in bebauten Gebieten	Strahlenoptische Methode	Toscano et al. 2003
Ausbreitung in bebauten Gebieten	Strahlenoptische Methode	Chen et al. 2004
Beugung an Gebäuden	Strahlenoptische Methode mit Beugungskoeffizienten 2. Ordnung	Erricolo 2002
Diffuse Streuung an Hauswänden	Strahlenoptische Methode mit Modell für diffuse Streuung	Degli-Esposti 2001
Einflüsse von stahlarmierten Betonstrukturen	Finite Difference Time Domain Method	Dalke et al. 2000
Durchdringung inhomogener Wände	Finite Difference Time Domain/Strahlenoptische Methode	Wang et al. 2002
Streuung an rauen Oberflächen	Momentenmethode	West & Sturm 1999
Wellenausbreitung in einem Wald	Momentenmethode in Verbindung mit Monte Carlo-Simulation	Sarabandi & Kohl 2001

Simulationsverfahren können frequenzselektive Messungen nicht ersetzen, da nur durch Messungen mit einem Spektralanalysator alle Beiträge zu den Immissionen erfasst und identifiziert werden können. Wenn sich in der Nähe einer Mobilfunkanlage mehrere Wohnungen von Teilnehmern an einer epidemiologischen Studie befinden, für die die Immissionen zu bestimmen sind, könnten jedoch relativ einfach durchzuführende Berechnungen der Immissionsmuster dieser Anlagen (Bornkessel et al. 2002 a, Neitzke & Voigt 2002, 2003) den Aufwand bei der Expositionserfassung verringern, wenn es gelingt, die Effekte durch Absorption, Reflexion und Beugung durch empirisch ermittelte Umgebungsfaktoren zu berücksichtigen. Dieser Weg wird im Rahmen dieses Vorhabens verfolgt (s. II.1.2). Dabei kann auf Arbeiten mit statistischen Aussagen zum Einfluss der Umgebung auf die Ausbreitung und Verteilung elektromagnetischer Felder in der Umgebung von Funksendeanlagen zurückgegriffen werden:

- Ausbreitung elektromagnetischer Wellen in bebauten Gebieten (s. z.B. Bronshtein & Mazar 2000, Constantinou & Ong 1998, Fuschini et al. 2004, Mazar et al. 1998, Perini & Holloway 1998, Piazzi & Bertoni 1998, Xu et al. 2004, Zhang & Moayeri 2003);
- Einfluss der Vegetation auf die Wellenausbreitung (Bosisio & Dechambre 2004, Chukhlantsev et al. 2003, de Jong & Herben 2004, Sofos & Constantinou 2004, Torrico et al. 1998);
- Durchdringung von Gebäuden (s. z.B. Anderson & Rappaport 2004, Antonini et al. 2003, de Jong et al. 2004, Landron et al. 1996, Martijn & Herben 2003, Pena et al. 2003, Wagner et al. 1997, Wang et al. 2003, Yang et al. 1998).

Eine Erfolg versprechende, exaktere aber wesentlich aufwändigere Alternative wäre die Anwendung der strahlenoptischen Methode. Ausgehend von den berechneten Abstrahlcharakteristiken der Mobilfunkantennen werden für viele Strahlenwege die Auswirkungen der Umgebung, von Fenstern und Wänden berechnet (Monte Carlo-Methode). Die Immission an einem Ort ergibt sich dann als Summe der Beiträge aller Strahlenwege, die direkt oder auf Umwegen zu diesem Ort führen. Erforderlich wären hierfür aber nicht nur die technischen Daten der Mobilfunkanlage sondern auch ein digitales Abbild der Umgebung mit empirisch ermittelten Dämpfungs- und Reflexionsfaktoren für Wände, Vegetation usw. Beugungseffekte müssten näherungsweise berücksichtigt werden. Zur Bestimmung der Beiträge anderer Quellen und zur 'Normierung' müssten wiederum Messungen durchgeführt werden.

I.5 Kooperationen

Die Vorgehensweise im Rahmen des Projekts wurde inhaltlich und zeitlich mit den Forschungsnehmern der epidemiologischen Querschnittsstudie abgestimmt. Zwischen beiden Arbeitsgruppen gab es einen kontinuierlichen Austausch von Informationen und es fanden insgesamt sieben ein- bis zweitägige gemeinsame Arbeitssitzungen statt.

Das zur Messung der HF-Immissionen in Wohnungen in der Umgebung von Mobilfunkbasisstationen angewandte Verfahren wurde durch eine von der AG Epidemiologie und Medizinische Statistik, Fakultät für Gesundheitswissenschaften, Universität Bielfeld organisierte Vergleichsmessung gemeinsam mit dem Institut für Mobilfunk- und Satellitentechnik (IMST), Kamp-Lintfort, überprüft.

II Ergebnisse und Ergebnisverwertung

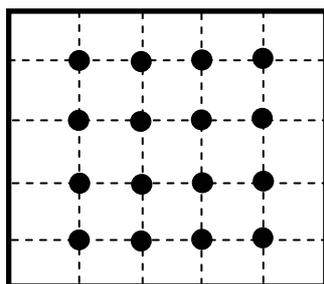
II.1 Ergebnisse des Projekts

II.1.1 Messtechnische Bestimmung der Mobilfunkimmissionen in Wohnungen

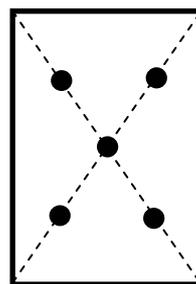
II.1.1.1 Messverfahren

An der geplanten epidemiologischen Querschnittsstudie nehmen 30.000 Haushalte teil. Für diese sollen die Expositionen zunächst nur mit Hilfe eines rechnerischen Verfahrens abgeschätzt werden (s. II.1.2). Diese Erstbestimmung der Expositionen ist Voraussetzung für eine nach Expositionen stratifizierte Auswahl für eine Vertiefungserhebung. Im Rahmen der Vertiefungserhebung sollen die Felder in ca. 1000 Wohnungen gemessen werden. Hierfür war im Rahmen dieses Projekts ein Verfahren zu entwickeln, das den in I.4.1 aufgeführten Anforderungen an die HF-Expositionserfassung im Rahmen einer epidemiologischen Querschnittsstudie genügt. Ein geeignetes Messverfahren wird aber auch schon im Rahmen dieses Projekts benötigt, um eine Datenbasis für ein rechnerisches Verfahren zur näherungsweise Bestimmung der Mobilfunk-Expositionen in Wohnungen aufzubauen (s. II.1.2.1). Eine hinreichende Zahl von Messungen in Wohnungen als Grundlage für ein Verfahren zur näherungsweise Bestimmung der Mobilfunk-Expositionen ist nur machbar, wenn der personelle, technische und zeitliche Aufwand für die Messungen deutlich geringer ist als bei den bisher angewandten Messverfahren (s. I.4.2.1).

Das hier benutzte Verfahren zur Messung der hochfrequenten elektromagnetischen Felder in Wohnungen basiert auf der Punktrastermethode, die von Bergqvist et al. (2001) empfohlen wird. Das heißt, dass über die Räume in der zu untersuchenden Wohnung ein Raster aus Messpunkten gelegt wird. Dabei wurde je nach räumlichen und zeitlichen Möglichkeiten (Größe und Zuschnitt der Zimmer, zur Verfügung stehende Messzeit) in jedem Raum ein 1 m x 1 m- oder ein 5 Punkt-Raster (s. Abbildung II.1.1) in 1 m Höhe, in einzelnen Fällen in zwei Höhen (0,75 und 1,5 m), verwendet, das über die einzelnen Zimmer gelegt wurde. Der Mindestabstand zu Wänden und anderen Objekten, die die Messung beeinflussen könnten, betrug entsprechend den Messempfehlungen des schweizerischen Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft 0,5 m (BUWAL 2003).



1 m x 1 m-Raster



5 Punkt-Raster
mit einem Messpunkt im Raummittelpunkt (Schnittpunkt der Raumdiagonalen) und weiteren Messpunkten jeweils auf der Mitte der Verbindungslinien zwischen Raummittelpunkt und Zimmerecken

Abbildung II.1.1
Messraster für die Vermessung von Innenräumen

Bei Messungen mit Richtantenne wird diese an den Messpunkten üblicherweise nacheinander in drei orthogonalen Raumrichtungen ausgerichtet und es wird jeweils ein Spektrum aufgenommen. Aus den drei Spektren je Punkt wird die Summenfeldstärke ermittelt. In der vorliegenden Untersuchung wurde eine Sonde mit isotroper Empfangscharakteristik (Messsystem TS-EMF3 der Fa. Rohde & Schwarz) eingesetzt, dadurch entfallen die Schritte der Umpositionierung der Antenne und der Summenbildung. Die Isotropie der Empfangscharakteristik der TS-EMF-Sonde ermöglicht die Messung der Gesamtmissionen unabhängig von der Einfalls- und der Polarisationsrichtung. Der Aufwand bei der Vermessung der Immissionsverteilung in Räumen wird erheblich reduziert.

Die Messsonde ist für den Frequenzbereich 80 MHz bis 2,5 GHz vorgesehen und kalibriert. Sie deckt den Messbereich von ca. 1 mV/m bis 100 V/m ab und kommt mit dem handlichen Spektrumanalysator FSH3 ebenfalls von Rohde & Schwarz zum Einsatz. Für die Steuerung der Messungen und die Darstellung der Messergebnisse steht die Software RFEX zur Verfügung. Es können verschiedene Messpakete z.B. für UKW, TV-VHF, TV-UHF, DVB-T, TETRA, GSM 900-, GSM 1800- und UMTS-Up- und Downlinks oder DECT-Telefone definiert und kombiniert werden. Die Software RFEX unterstützt Einzel-, Spitzen- und Mittelwert- sowie Langzeitmessungen. Die Dauer der Langzeitmessungen ist nur durch die Akkulaufzeiten von Spektrumanalysator und Laptop begrenzt. Bei Versorgung über das Stromnetz sind beliebig lange, automatisch durchgeführte Messungen möglich. Die bei den Messungen standardmäßig verwendeten Einstellungen können Tabelle II.1.1 entnommen werden.

Tabelle II.1.1
Standardeinstellungen bei der Vermessung der HF-Immissionen in Wohnungen mit FSH3/RFEX

			UKW	TV VHF	TV UHF	GSM 900	GSM 1800	DECT	UMTS
Frequenzbereich	von	MHz	87,5	174	470	935	1805	1880	2107.7
	bis	MHz	108	225	790	960	1880	1900	2176.7
Speicher-Kanäle	Zahl		206	2x8	2x40	125	376	67	70
	Abstand	kHz	100	1500 5500	2500 5500	200	200	300	1000
Zahl der Frequenzfenster			5	1	3	2	4	1	1
Rauschgrenze		dBµV/m	80	85	75	65	67	75	80
Mess-Bandbreite		kHz	100	1000	1000	100	100	300	1000
Detektor			rms	rms	rms	rms	rms	rms	rms
Trace Modus			ave	ave	ave	ave	ave	ave	ave
Sweepzeit (automatisch)		ms	100	100	100	100	100	1000	100
Verweildauer		ms	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000

Die Software RFEX berechnet für jedes Messpaket i , das seinerseits wieder aus mehreren Frequenzfenstern bestehen kann (s. Tabelle II.1.1), aus den Beiträgen E_{ix} , E_{iy} , E_{iz} für drei orthogonale Raumrichtungen die Gesamtfeldstärke E_i nach der Formel

$$E_i = (E_{ix}^2 + E_{iy}^2 + E_{iz}^2)^{1/2} \text{ [V/m]}. \quad (\text{Gl. 1.1})$$

Aus der Feldstärke ergibt sich die Leistungsdichte S_i in einem Messpaket:

$$S_i = E_i^2 / Z_0 = E_i^2 / 120\pi \text{ [W/m}^2\text{]}. \quad (\text{Gl. 1.2})$$

$$Z_0 = 377 \text{ [\Omega]} \text{ Feldwellenwiderstand des freien Raums}$$

Die Leistungsdichte S der HF-Gesamtmission aller erfassten Quellen an einem Punkt wird durch Addition der aus den Feldstärken errechneten Leistungsdichten für jedes Messpaket berechnet:

$$S = \sum_i S_i. \quad (\text{Gl. 1.3})$$

Aus den Werten für die Leistungsdichte an den einzelnen Rasterpunkten wurden die Mittelwerte, Standardabweichungen, Maximal- und Minimalwerte sowie die Variationsbereiche der Messwerte für jedes Messpaket

und für die Gesamtimmissionen jeweils für die einzelnen Zimmer und für die Wohnungen insgesamt mit einer eigenen Software berechnet.

II.1.1.2 Überprüfung der Messgeräte und des Messverfahrens

Das Messsystem wurde vom Hersteller kalibriert und im Rahmen von Vergleichsmessungen beim Niedersächsischen Landesamt für Ökologie, Hannover, sowie in einer gemeinsam mit dem Institut für Mobilfunk- und Satellitentechnik (IMST), Kamp-Lintfort, im Amt für Umweltschutz der Stadt Bielefeld durchgeführten Messaktion überprüft. Die Vergleichsmessung mit dem IMST diente auch dazu, die Ursachen für die Unterschiede zwischen den Ergebnissen der im Rahmen dieses Projekts durchgeführten Messungen und den Ergebnissen von Messungen mit dem herkömmlichen Verfahren aufzudecken (s.a. II.1.1.3).

II.1.1.3 Ergebnisse der HF-Messungen in Wohnungen in der Umgebung von Mobilfunkbasisstationen

Im Rahmen des Projekts wurden die Felder in insgesamt 1104 Innenräumen vermessen. Für die Auswertung im Rahmen dieses Projekts werden aber nur die Daten der 728 Räume benutzt, in denen Messungen an mindestens drei Punkten durchgeführt werden konnten. Messungen wurden außerdem an 120 Orten in wohnungsnahen Außenbereichen (Balkon, Terrasse, Garten) und in der Umgebung von rund 60 Mobilfunkanlagen durchgeführt. Die an Messorten im Freien mit direkter Sichtverbindung zur Anlage gewonnenen Messdaten wurden u.a. zur Überprüfung der in den Rechnungen verwendeten Abstrahlcharakteristiken und Downtilts für Mobilfunkantennen benutzt (s. II.1.2).

Für die näherungsweise Berechnung der Immissionen in Wohnungen werden empirische Daten für unterschiedlichste Immissionssituationen benötigt, daher wurden für die Messungen verschiedene Emissions- und Immissionssituationen ausgewählt:

- unterschiedliche Gelände-, Siedlungs- und Gebäudetypen; die Orte, in denen Messungen durchgeführt wurden, sind in Tabelle II.1.2a aufgeführt die Art der Bebauung wurde nach vier Typen klassifiziert:
 - aufgelockerte ein- bis zweigeschossige Bebauung (Ein- und Zwei-Familienhäuser)
 - aufgelockerte mehrgeschossige Blockbebauung
 - verdichtete mehrgeschossige Bebauung mit Freiflächen an den Häusern
 - geschlossene mehrgeschossige Bebauung;die Verteilung der vermessenen Räume auf die Bebauungstypen kann Tabelle II.1.2b entnommen werden
- unterschiedliche Typen von Standorten und Mobilfunkbasisstationen (GSM 900, GSM 1800, UMTS, Dachanlagen, Sendemasten, Anlagen mit einem und mehreren Antennenträgern, Anlagen mit einem und mehreren Funkkanälen)
- unterschiedliche horizontale und vertikale Abstände zwischen Mobilfunkbasisstationen und Immissionsorten (horizontale Abstände: 0 m bis 5000 m, vertikale Abstände: 0 m bis 80 m)
- Messorte (Innenräume und Außenstandorte) mit und ohne Sichtverbindung zu Mobilfunkbasisstationen
- Messorte mit unterschiedlichem HF-Senderumfeld (1 bis 11 Mobilfunkstandorte im Abstand von weniger als 500 m vom Messort, im letzteren Fall mit insgesamt 21 GSM 900-, 15 GSM 1800- und 24 UMTS-Antennen, s. Abbildung II.1.2), Mobilfunkstandorte mit 1 bis zu 24 Sektorantennen, Radio- und Fernsehsender in Abständen von 200 m bis mehr als 20 km, Wohnungen mit und ohne

DECT-Telefonen, Wohnungen fernab und in der Nähe von Orten mit starker Handy-Nutzung, wie städtische Plätze, Einkaufszentren, Bahnhöfe.

Ein weiteres Entscheidungskriterium für Messorte war die Verfügbarkeit der technischen Daten der Mobilfunkbasisstationen mindestens in dem Umfang, wie sie in der Standortbescheinigung der RegTP enthalten sind und der Zugang zu Wohnungen.

Tabelle II.1.2a

Städte und Gemeinden in denen im Rahmen des Projekts Messungen durchgeführt wurden

Großstädte	Mittelstädte	Kleinstädte	Gemeinden
Bremen (HB)	Celle (NDS)	Erbach (HS)	Bullau (HS)
Frankfurt (HS)	Paderborn (NRW)	Fürth (HS)	Gandesbergen (NDS)
Hannover (NDS)	Wetzlar (HS)	Lehrte (NDS)	Kleinheidorn (NDS)
Kiel (SH)		Schenefeld (SH)	Mellendorf (NDS)
Köln (NRW)		Springe (NDS)	Ritterhude (NDS)
		Steinhude (NDS)	Schköna (ST)
		Wunstorf (NDS)	Seevetal (NDS)
			Würzburg (HS)

Tabelle II.1.2b

Verteilung der vermessenen und für die Auswertung benutzten Räume auf die Bebauungstypen

Bebauungstyp	Zahl der vermessenen Räume
aufgelockerte ein- bis zwei-geschossige Bebauung	185
aufgelockerte mehrgeschossige Blockbebauung	138
verdichtete mehrgeschossige Bebauung mit Freiflächen	150
geschlossene mehrgeschossige Bebauung	255

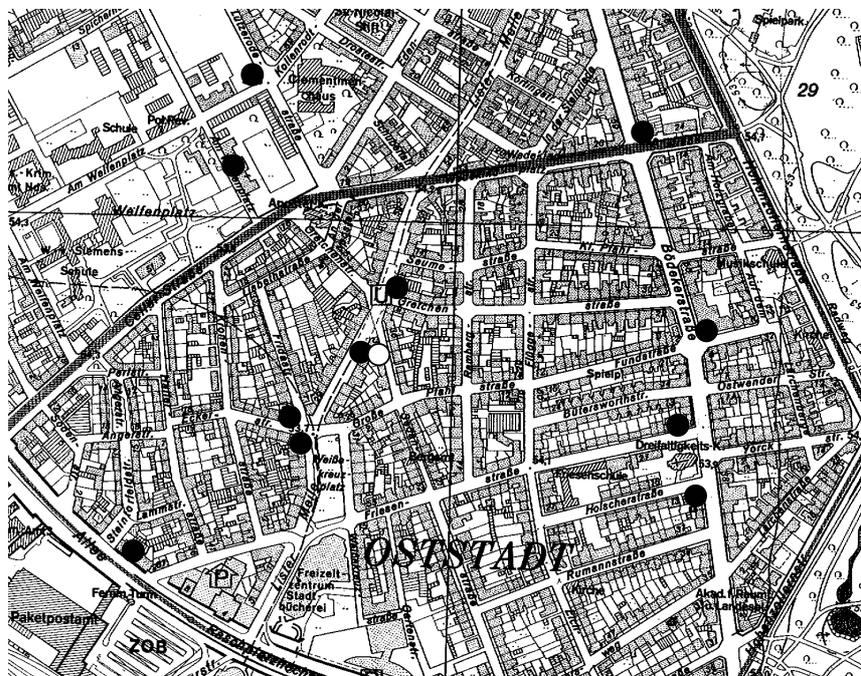


Abbildung II.1.2

Messort (weißer Kreis) und 11 Mobilfunkstandorte (schwarze Kreise) im Umkreis von 500 m um den Immissionsort in einem Stadtteil Hannovers mit überwiegend geschlossener Bebauung

Die Messungen erfolgten standardmäßig für die Messpakete UKW, TV VHF, TV UHF, GSM 900 downlink, GSM 1800 downlink, DECT und UMTS downlink sowie in einzelnen Fällen für DVB-T, WLAN und die Mobilfunk-Uplinks. Abbildung II.1.3 zeigt einige Beispiele für Messungen an einzelnen Punkten in Innenräumen. Die Höhe der einzelnen Beiträge zu den Immissionen kann offensichtlich sehr stark variieren, eine statistische Auswertung (s. Abbildung II.1.8) zeigt jedoch, dass die Mobilfunkbeiträge in der Mehrzahl der Wohnungen dominieren. In einigen Wohnungen in der Umgebung von Mobilfunkbasisstationen in Innenstadtbereichen, an denen mit tageszeitlich stark variierender Auslastung zu rechnen ist, wurden außerdem Dauermessungen (24 Stunden bis eine Woche) durchgeführt, um den Tagesgang der Immissionen zu ermitteln.

In Abbildung II.1.4 ist die Verteilung der Immissionen im Außenraum um eine Mobilfunkanlage dargestellt. Diese Abbildung zeigt sehr deutlich, dass der horizontale Abstand zwischen Sendeanlage und Immissionsort allein kein geeignetes Maß für die Exposition der Anwohner darstellt. Dies liegt zum einen an den typischen Abstrahlcharakteristiken von Mobilfunkantennen und zum anderen an der Verteilung und den Eigenschaften von Gebäuden, Vegetation und anderen Objekten in der Umgebung von Sender und Immissionsort, die über Absorption, Reflexion, Beugung, Streuung und Brechung Einfluss auf die Feldverteilung haben. Dass der Abstand kein geeignetes Expositionsmaß darstellt, wird auch an Abbildung II.1.5 deutlich. Dort sind die Messergebnisse für die Mobilfunk-Immissionen in Innenräumen in Abhängigkeit vom Abstand zwischen Mobilfunkbasisstation und Immissionsort aufgetragen.

Abbildung II.1.5 zeigt aber auch, dass der Abstand zumindest dazu dienen kann, Wohnungen zu identifizieren, in denen die Mobilfunkexpositionen sehr gering sind. Für Abstände von mehr als 500 m liegen die Werte für die Leistungsdichte nämlich deutlich unter $10 \mu\text{W}/\text{m}^2$. Aus den vorliegenden Messergebnissen und gesonderten Untersuchungen zur Verteilung von Mobilfunkbasisstationen in den Städten Bielefeld und Hannover ergibt sich, dass in Großstädten etwa 25 Prozent der Wohnungen allein aufgrund des großen Abstands zur nächsten Mobilfunkbasisstation als 'geringer exponiert' (Leistungsdichte geringer als $10 \mu\text{W}/\text{m}^2$) eingestuft werden können. Bei einer ersten Auswertung der Standortdatenbank der Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post in Verbindung mit den Adressen der Teilnehmer an der Querschnittsstudie durch die Forschungsnehmer der Querschnittsstudie zeigte sich, dass es bei rund 50 Prozent der Wohnungen keine Mobilfunkanlage im Umkreis von 500 m gibt.

Die in Abbildung II.1.5 dargestellte Immissionsverteilung kann weder für alle Wohnungen in Deutschland noch für die Wohnungen der Teilnehmer an der Querschnittsstudie als repräsentativ gelten, da der Anteil der im Rahmen dieses Projekts untersuchten Wohnungen mit Abständen von weniger als 500 m zur nächsten Mobilfunkanlage deutlich größer ist als in der Grundgesamtheit.

Abbildung II.1.6 zeigt die Verteilung der Immissionen in einer Wohnung in der Nähe einer Mobilfunkbasisstation. In den der Sendeanlage zugewandten Räumen sind die Immissionen relativ hoch. In den rückwärtigen Räumen zeigt sich der Einfluss der Dämpfung durch Baumaterialien durch deutlich niedrigere Messwerte.

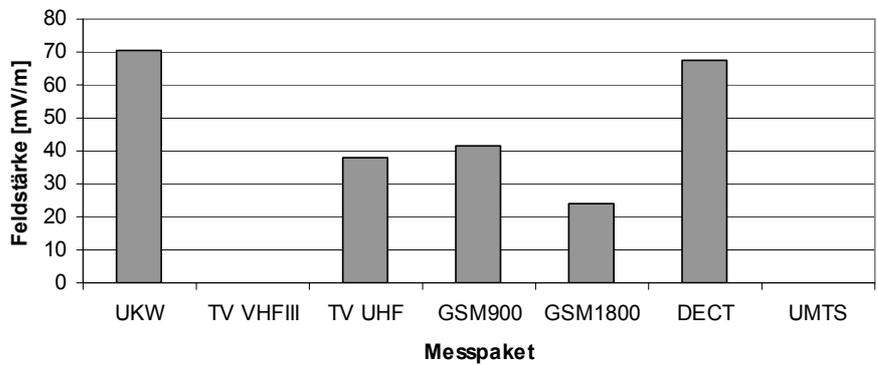
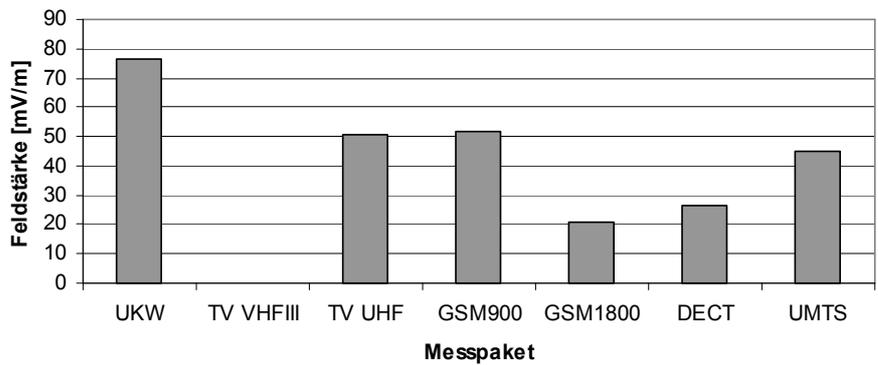
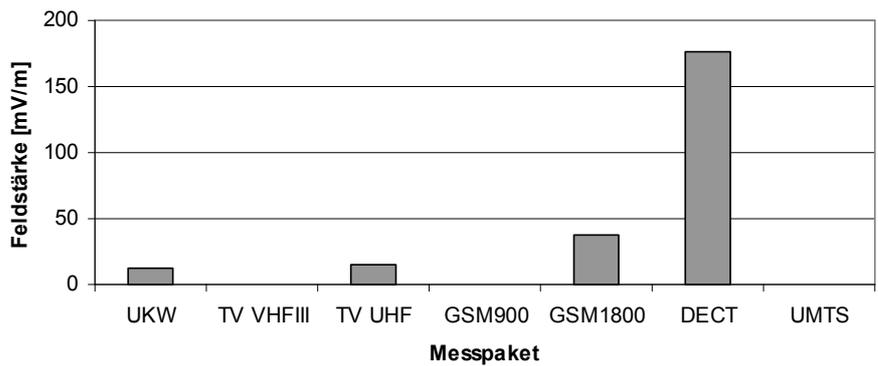
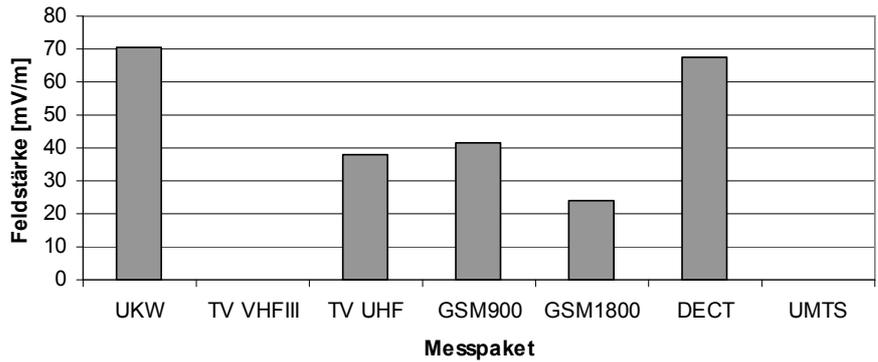


Abbildung II.1.3
 Beispiele für Messungen an einzelnen Punkten in Innenräumen (Auswahl nicht repräsentativ)

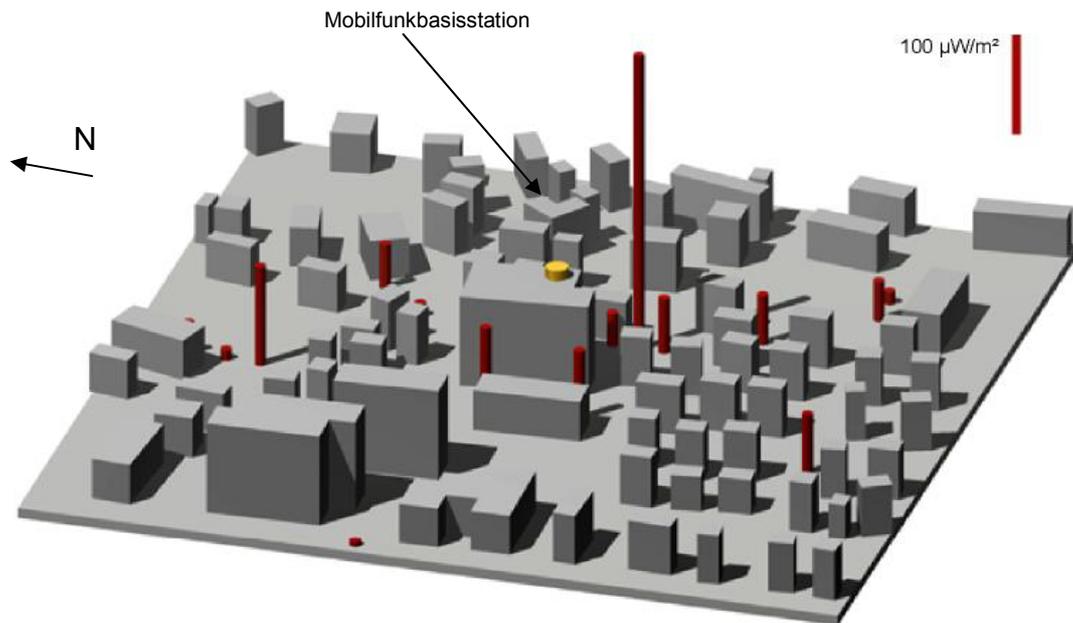


Abbildung II.1.4

Mobilfunk-Immissionen in der Umgebung einer Mobilfunkbasisstation in einem Wohngebiet mit überwiegend zweigeschossiger Ein- und Zweifamilienhausbebauung und einzelnen mehrgeschossigen Gebäuden (Stadt Schenefeld, Umgebung des Standorts Sandstückenweg, GSM 1800-Anlage, Höhe der Antennenunterkante 25 m, Hauptstrahlrichtungen 90°, 210°, 330° gegen Nord, Sendeleistung pro Sektor 31 W)

Kurzer Zylinder auf dem Gebäude in der Bildmitte: Standort der GSM 1800-Mobilfunkbasisstation auf einem sechsgeschossigen Wohnhaus

Säulen: Höhe der Messwerte (linearer Maßstab; zum Vergleich ist die 100 µW/m²-Säule eingezeichnet)

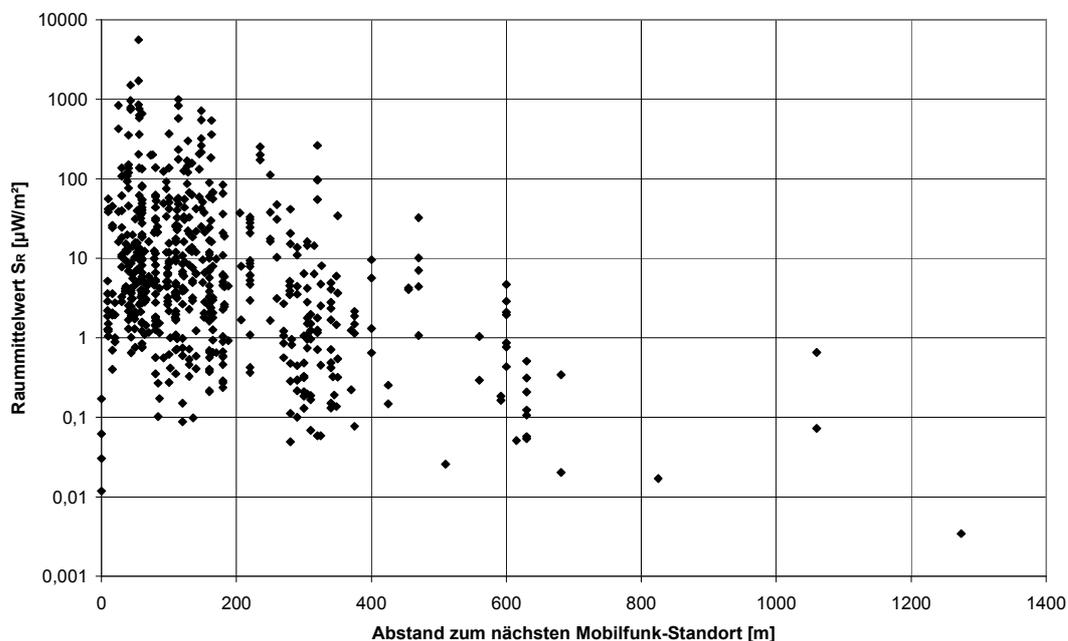


Abbildung II.1.5

Mobilfunk-Immissionen (Summe der Mittelwerte GSM 900- und GSM 1800) in Innenräumen von Wohnungen in Klein- und Mittelstädten aufgetragen über dem horizontalen Abstand zwischen Mobilfunk Standort und Messort

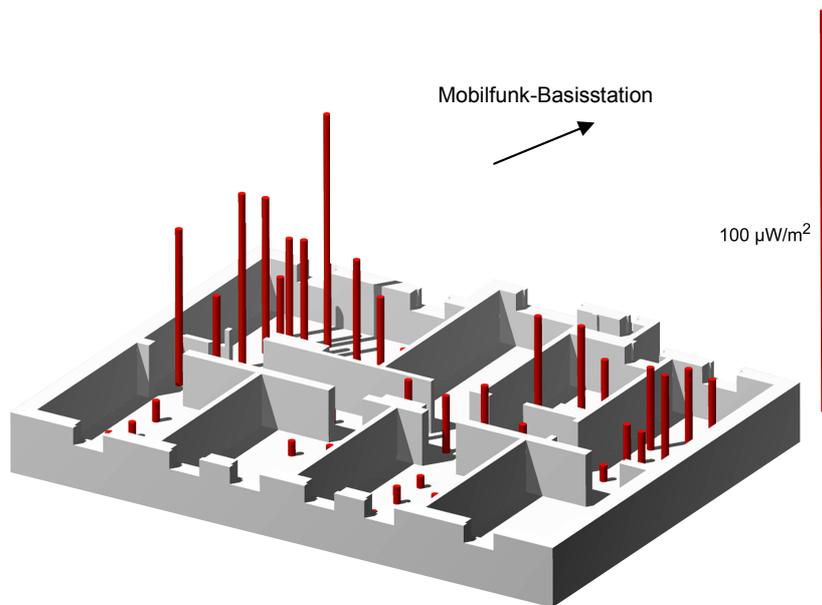


Abbildung II.1.6
 Mobilfunk-Immissionen in einer Wohnung in 200 m Abstand von einer Mobilfunkbasisstation
 Säulen: Höhe der Messwerte (linearer Maßstab; zum Vergleich ist die 100 µW/m²-Säule eingezeichnet)

Im Rahmen der im Bundesamt für Strahlenschutz durchgeführten Fachgespräche wurde die Frage aufgeworfen, ob die Mittelung über die auf den verwendeten Rastern gewonnenen Messwerte die tatsächliche mittlere Immission in einem Raum wiedergibt, oder ob hierfür nicht Messungen auf einem feineren Raster notwendig sind. Um dies zu überprüfen, wurden auch einige Vergleichsmessungen auf einem 0,1 m x 0,1 m-Raster durchgeführt. Abbildung II.1.7 zeigt am Beispiel einer GSM 900-Messung, dass die Messungen mit verschiedenen Rastern zu ähnlichen Ergebnissen führen.

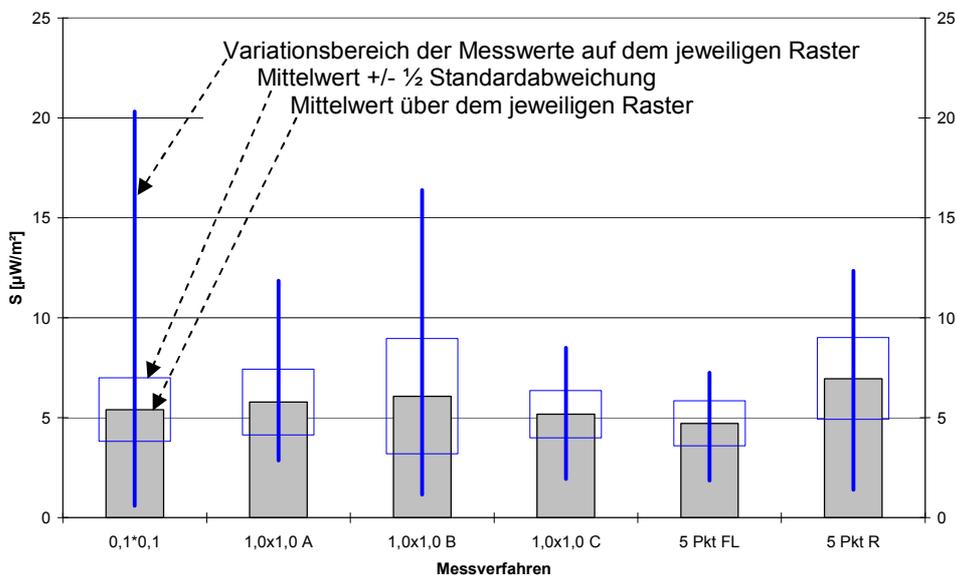


Abbildung II.1.7
 Vergleich der Ergebnisse der Vermessung der GSM 900-Felder in einem Innenraum anhand verschiedener Messraster

- 0,1x0,1 0,1 m x 0,1 m-Raster
- 1,0x1,0 A, B, C 1,0 m x 1,0 m-Raster mit unterschiedlichen Lagen im Raum
- 5 Pkt FL, R 5 Punkt-Raster mit unterschiedlichen Lagen im Raum

Abbildung II.1.8 gibt den Anteil des Mobilfunks an den gesamten HF-Immissionen in Wohnungen wieder. Die 'gesamten HF-Immissionen' setzen sich aus den Beträgen von UKW, TV VHF, TV UHF, GSM 900 downlink, GSM 1800 downlink, DECT und UMTS downlink zusammen. Die Beiträge von Lang-, Mittel- und Kurzwellensendern konnten mit der verwendeten Messsonde nicht erfasst werden, sind aber nur lokal von Bedeutung. Auf die besiedelte Fläche in Deutschland bezogen und damit für die überwiegende Mehrzahl der Bürger und die Teilnehmer an der Querschnittsstudie sind diese Beiträge wegen der geringen Zahl solcher Sender niedrig. In einzelnen Fällen können Radio- und TV-Sender allerdings den Hauptbeitrag zu den HF-Immissionen liefern. Messungen, die in der Anfangsphase des Projekts sowohl in wenig als auch in stark verdichteten Siedlungsbereichen durchgeführt wurden, zeigen, dass auch die Beiträge der Mobilfunk-Uplinks und von drahtlosen Funknetzen (WLAN) als Umgebungsquelle für ortsbezogene Beiträge zur Dauerexposition nur eine geringe Rolle spielen. Die in Abbildung II.1.8 dargestellte Verteilung basiert auf den Messdaten von 728 Innenräumen (Verteilung auf die Bebauungstypen s. Tabelle II.1.2b). In fast 25 Prozent der Fälle macht der Mobilfunk mehr als 90 Prozent der HF-Immissionen oberhalb von 80 MHz aus, in rund 20 Prozent der Fälle sind es weniger als 10 Prozent. Dies sind Fälle, in denen die nächste Mobilfunkbasisstation mehrere hundert Meter entfernt war und/oder andere Quellen, insbesondere DECT-Telefone in der vermessenen Wohnung bzw. in der Nachbarwohnung, in wenigen Fällen auch UKW-Sender in unmittelbarer Nachbarschaft hohe Beiträge lieferten.

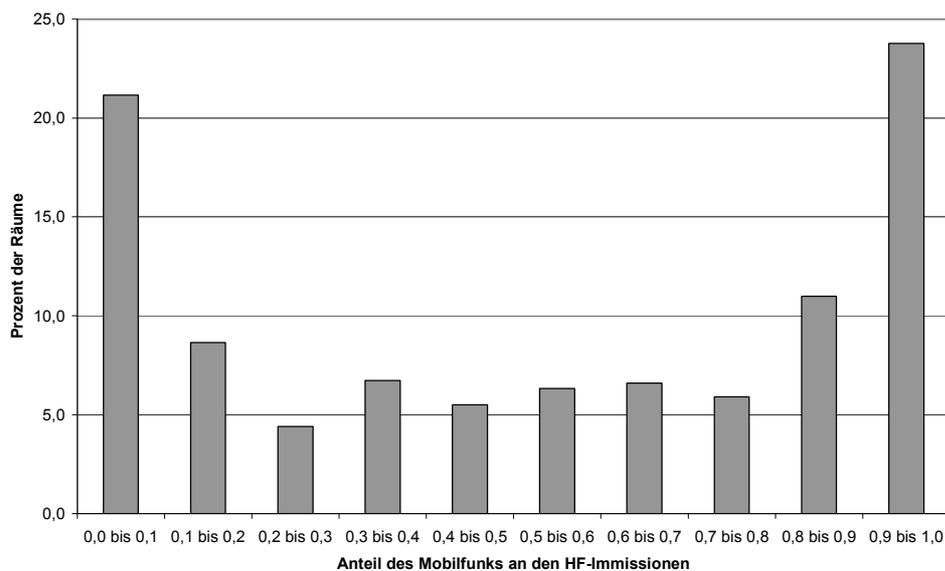


Abbildung II.1.8
Anteil des Mobilfunks an den HF-Immissionen in Innenräumen (Basis: Raummittelwerte für UKW, TV VHF, TV UHF, GSM 900 downlink, GSM 1800 downlink, DECT und UMTS downlink in 728 Innenräumen)

Einen Eindruck von der Verteilung der Höhe der Messwerte liefert Abbildung II.1.9. In mehr als 60 Prozent der vermessenen Räume lag die Summe aller Mobilfunk-Immissionen unter $10 \mu\text{W}/\text{m}^2$, in knapp 9 Prozent der Räume über $100 \mu\text{W}/\text{m}^2$.

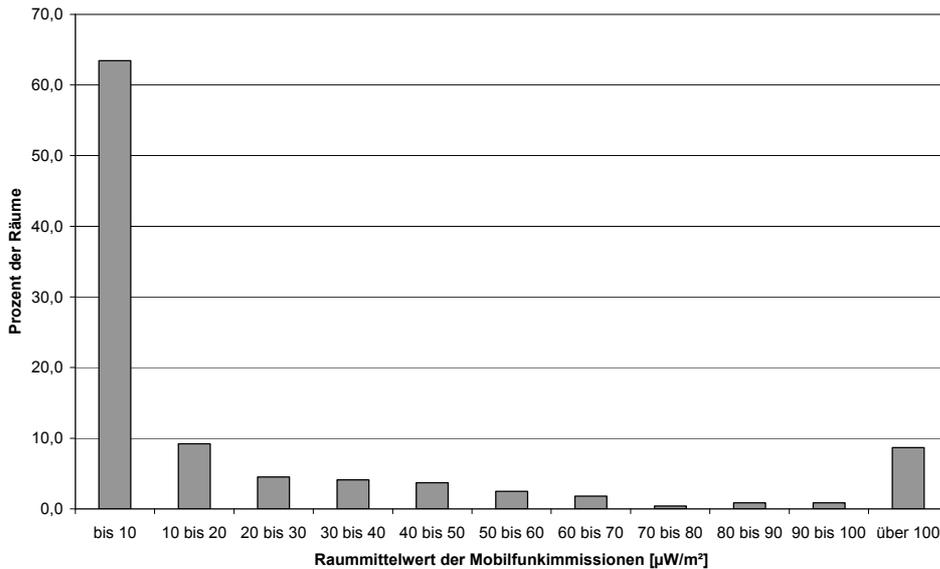


Abbildung II.1.9

Prozentuale Verteilung der Mobilfunk-Immissionen in Innenräumen (Basis: Raummittelwerte für GSM 900 downlink, GSM 1800 downlink und UMTS downlink in 728 Innenräumen)

In den Berichten über andere Untersuchungen werden z.T. deutlich höhere Werte genannt (s. z.B. Wuschek 2000, FHH/Umweltbehörde 2001, Bornkessel et al. 2002 b). Der höhere Anteil 'geringer exponierter' Wohnungen in dieser Untersuchung im Vergleich zu anderen Untersuchungen ist darauf zurückzuführen, dass die anderen Untersuchungen gezielt in der unmittelbaren Umgebung von Mobilfunkbasisstationen durchgeführt wurden, während es in dieser Untersuchung darum ging, den Beitrag des Mobilfunks zu den HF-Expositionen in unterschiedlichsten Konstellationen zu ermitteln (s. Kriterien für die Auswahl der zu vermessenden Wohnungen). Dass auch die Werte für die 'höher exponierten' Wohnungen durchweg unter den Werten liegen, die in anderen Berichten genannt werden, ist auf die unterschiedliche Messmethodik zurückzuführen. Dies wurde in einem direkten Vergleich der Methoden durch IMST und ECOLOG-Institut bestätigt (s. II.1.1.2). Während in anderen Untersuchungen (Wuschek 2000, FHH/Umweltbehörde 2001, Bornkessel et al. 2002 b) gezielt nach Maximal-Immissionen in Räumen gesucht und zudem noch auf maximale Anlagenauslastung extrapoliert wurde, wurden in dieser Untersuchung räumlich gemittelte Immissionen bestimmt. Außerdem wurde auch eine zeitliche Mittelung durchgeführt (s.u.).

Abbildung II.1.10 zeigt, dass die mit Hilfe der Rastermethode ermittelten Maximalwerte in Räumen in fast 70 Prozent der Fälle nur maximal doppelt so hoch sind wie die Mittelwerte in diesen Räumen und dass Maximalwerte, die mehr als einen Faktor 4 von den Mittelwerten abweichen, sehr selten vorkommen (s.a. Abbildung II.1.6). Wenn jedoch gezielt nach maximalen Werten im Raum gesucht wird, wie dies in der Vergleichsmessung mit dem IMST getan wurde (s.o.), lassen sich durchaus kleinräumige Inhomogenitäten lokalisieren, in denen die Leistungsdichte bis zu einem Faktor 100 vom Raummittelwert abweicht.

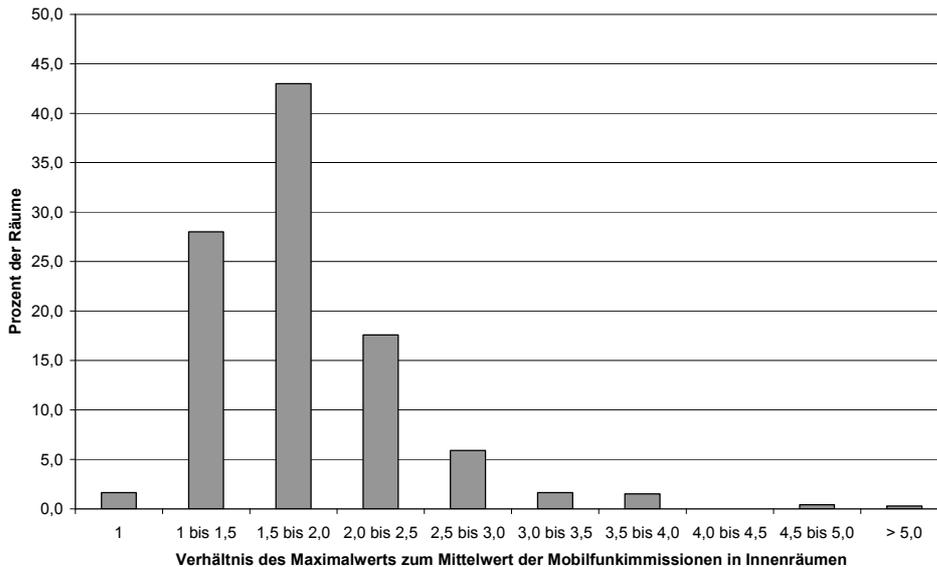


Abbildung II.1.10
 Prozentuale Verteilung der Verhältnisse der für Innenräume mit der Punktrastermethode ermittelten Maximal- zu den Mittelwerten der Mobilfunk-Immissionen

An GSM-Mobilfunkbasisstationen, die neben dem mit konstanter Leistung sendenden Organisationskanal über weitere Verkehrskanäle verfügen, welche nur bei hohem Nutzeraufkommen aktiviert werden, sind Spitzen der Leistungsdichte während sehr kurzer Zeitintervalle festzustellen. Sehr kurze Spitzen der Leistungsdichte werden bei dem in dieser Untersuchung benutzten Betriebsmode 'average' mit einer Mittelungszeit von einer Sekunde pro Messfenster aber nicht erfasst. Im Betriebsmodus 'Max hold', der bei Messungen mit einem immissionsschutzrechtlichen Hintergrund verwendet wird, speichert das Messgerät je Frequenzkanal den höchsten Wert, der während der gewählten Verweildauer auftritt.

Welchen Unterschied es macht, wenn kurzzeitige Spitzen oder zeitliche Mittelwerte gemessen werden, demonstriert Abbildung II.1.11 anhand der Ergebnisse einer mehrtägigen Messung in einer Wohnung in der Nähe eines GSM 900-Mobilfunkstandorts im Innenstadtbereich einer Großstadt. Während die Berücksichtigung kurzzeitiger Spitzen einen ausgeprägten Tagesgang liefert, zeigen die Kurven für die zeitlich gemittelten Signale nur geringe Schwankungen. Das heißt, dass auch die für die epidemiologische Querschnittsstudie als relevante Größe angenommene mittlere Exposition im Tagesverlauf nur wenig schwankt und durch die Messungen mit einer Mittelungszeit von einer Sekunde mit hinreichender Genauigkeit bestimmt wird.

In der ersten Phase der Querschnittsstudie wird einem möglichen Zusammenhang zwischen Befindlichkeitsstörungen bzw. verschiedenen unspezifischen Symptomen und den Expositionen während der Nachtzeit (Schlafzimmer) nachgegangen. Nachts ist nur mit einem Basisbetrieb der Mobilfunkanlagen zu rechnen. Das hier verwendete Messverfahren ist am ehesten geeignet, um nächtliche Expositionen durch Messungen, die während des Tages durchgeführt werden, abzuschätzen.

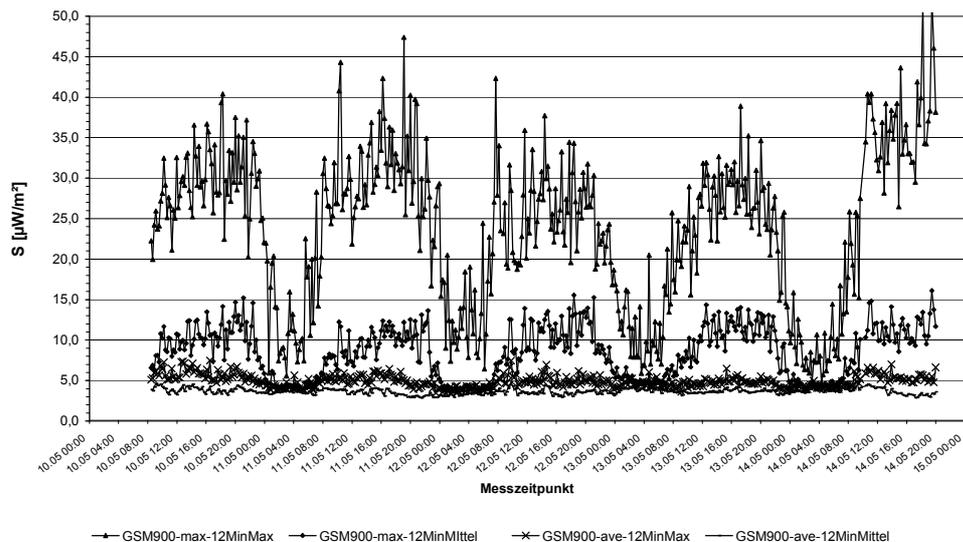


Abbildung II.1.11

Gang der GSM 900-Immissionen über mehrere Tage in einem Raum einer Wohnung in der Nähe eines Mobilfunk-Standorts in der Innenstadt einer Großstadt. Aus Gründen der besseren Darstellbarkeit wurden die in Messintervallen von 12 Minuten Länge gemessenen Maximal- bzw. Mittelwerte aufgetragen.

GSM900-max-12MinMax: RMS-Detektor, Maximalwert der im Messintervall im Betriebsmode 'Max hold' erfassten Einzelwerte

GSM900-max-12MinMittel: RMS-Detektor, zeitlicher Mittelwert der im Messintervall im Betriebsmode 'Max hold' erfassten Einzelwerte

GSM900-ave-12MinMax: RMS-Detektor, Maximalwert der im Messintervall im Betriebsmode 'average' erfassten Einzelwerte

GSM900-ave-12MinMittel: RMS-Detektor, zeitlicher Mittelwert der im Messintervall im Betriebsmode 'average' erfassten Einzelwerte

II.1.2 Rechnerische Abschätzung der Mobilfunkexpositionen in Wohnungen

An der geplanten epidemiologischen Querschnittsstudie sollen in der ersten Phase mehr als 30.000 Haushalte teilnehmen, für die die Expositionen bestimmt werden müssen. In anderen Studien wurde der horizontale Abstand zwischen Quelle und Immissionsort zur Klassifizierung der Expositionen benutzt. Dass der Abstand im Falle von Mobilfunkbasisstationen ein schlechtes Expositionsmaß darstellt, haben die Ergebnisse der durchgeführten Messungen gezeigt (s. Abbildungen II.1.4 und II.1.5). Eine Messung der Felder in 30.000 Wohnungen, die zudem über ganz Deutschland verteilt sind, ist wegen des hohen zeitlichen Aufwandes allerdings auch nicht machbar. Desgleichen sind exakte Berechnungen nicht durchführbar, da die entsprechenden Berechnungsverfahren, die Einflüsse von Reflexion, Beugung, Brechung, Absorption und Streuung berücksichtigen, sehr aufwändig sind und weil vor allem die erforderlichen Daten zu den Sendeanlagen sowie zu der Anordnung und den Eigenschaften von Objekten, die die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen beeinflussen können, nicht zur Verfügung stehen (s.a. 1. Zwischenbericht). Deshalb musste ein Verfahren entwickelt werden, mit dem die Expositionen anhand leicht verfügbarer Informationen mit einer für die geplante epidemiologische Studie ausreichenden Genauigkeit abgeschätzt werden können.

II.1.2.1 Rechenmodell I: Freiraumausbreitung, Transmissionsfaktoren für die Umgebung, Sichtbarkeit der Sendeantennen

Im Rahmen des Projekts wurde für die näherungsweise Berechnung der Mobilfunkimmissionen in Wohnungen zunächst ein Verfahren benutzt, das auf

- der Berechnung der Immission am Ort der Wohnung unter Freiraumausbreitungsbedingungen (S_F) und
- der Berücksichtigung des Einflusses
 - der Umgebung (3 Umgebungstypen) und
 - der Sichtbarkeit der Sendeantennen (ja/nein)
 durch konstante Transmissionsfaktoren (T_U)

beruht. Die für die Berechnung der Immissionen am Ort einer Wohnung unter Freiraumausbreitungsbedingungen benötigten Eingangsdaten sind in Tabelle II.1.3 aufgeführt. Dort ist auch angegeben, woher die Daten im Rahmen dieses Projekts bezogen wurden bzw. woher sie bezogen werden können, wenn das Modell zur rechnerischen Abschätzung der Expositionen im Rahmen der epidemiologischen Querschnittsstudie benutzt wird. Die geometrischen Verhältnisse sind in Abbildung II.1.12 dargestellt.

Tabelle II.1.3

Erforderliche Daten zur Berechnung der Immissionen unter Freiraum-Ausbreitungsbedingungen

Erforderliche Daten	Datenquellen
Mobilfunk-Sendeantennen	
Mobilfunkstandorte in der Umgebung des Immissionsorts (Wohnung) (horizontaler Abstand bis 500 m)	Standortdatenbank der RegTP
Zahl der Sendeantennen an den Standorten	Standortbescheinigungen der RegTP für die Mobilfunkstandorte
für alle Mobilfunk-Sendeantennen an allen Standorten:	
Mobilfunknetz der Sendeantenne	Standortbescheinigung der RegTP
Sendeleistung der Sendeantenne P_A	Standardwert (s. Text)
Hauptstrahlrichtung der Sendeantenne γ	Standortbescheinigung(en) der RegTP
Downtilt der Sendeantenne β	Standardwert (s. Text)
Abstrahlcharakteristik der Sendeantenne bzw. Antennengewinn G_A	Standardcharakteristiken (s. Text)
Relative Lage von Sendeantenne und Immissionsort	
Horizontaler Abstand Sendeantenne – Immissionsort d berechnet aus: Koordinaten des Standorts der Sendeantenne x_A, y_A Koordinaten des Immissionsorts (Wohnung) x_i, y_i	im Projekt: Topografische Karte in der Querschnittsstudie: Standortbescheinigung der RegTP für den Standort der Sendeantenne im Projekt: Topografische Karte in der Querschnittsstudie: Geokodierung der Wohnungsadressen
Vertikaler Abstand Sendeantenne – Immissionsort (Wohnung) Δh berechnet aus: Montagehöhe der Antenne über Grund z_A Terrainhöhe am Senderstandort h_A Höhe des Immissionsorts (Wohnung) über Grund z_i Terrainhöhe am Immissionsort h_i	Standortbescheinigung der RegTP im Projekt: Topografische Karte in der Querschnittsstudie: unbekannt im Projekt: Ermittlung des Stockwerks vor Ort in der Querschnittsstudie: Fragebogen (Angaben zum Stockwerk) im Projekt: Topografische Karte

	in der Querschnittsstudie: unbekannt
Räumlicher Abstand Sendeantenne – Immissionsort (Wohnung) r	berechnet aus d und Δh
Horizontaler Abstrahlwinkel ϕ	berechnet aus $(x_A, y_A), (x_I, y_I)$
Vertikaler Abstrahlwinkel θ	berechnet aus d und Δh

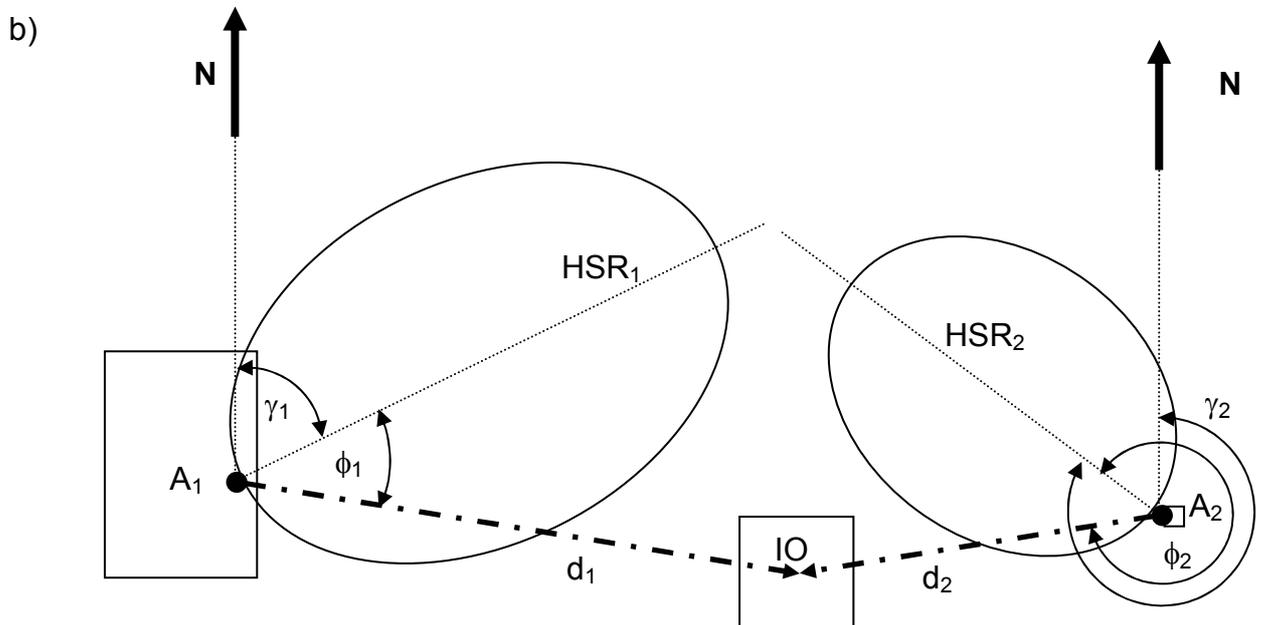
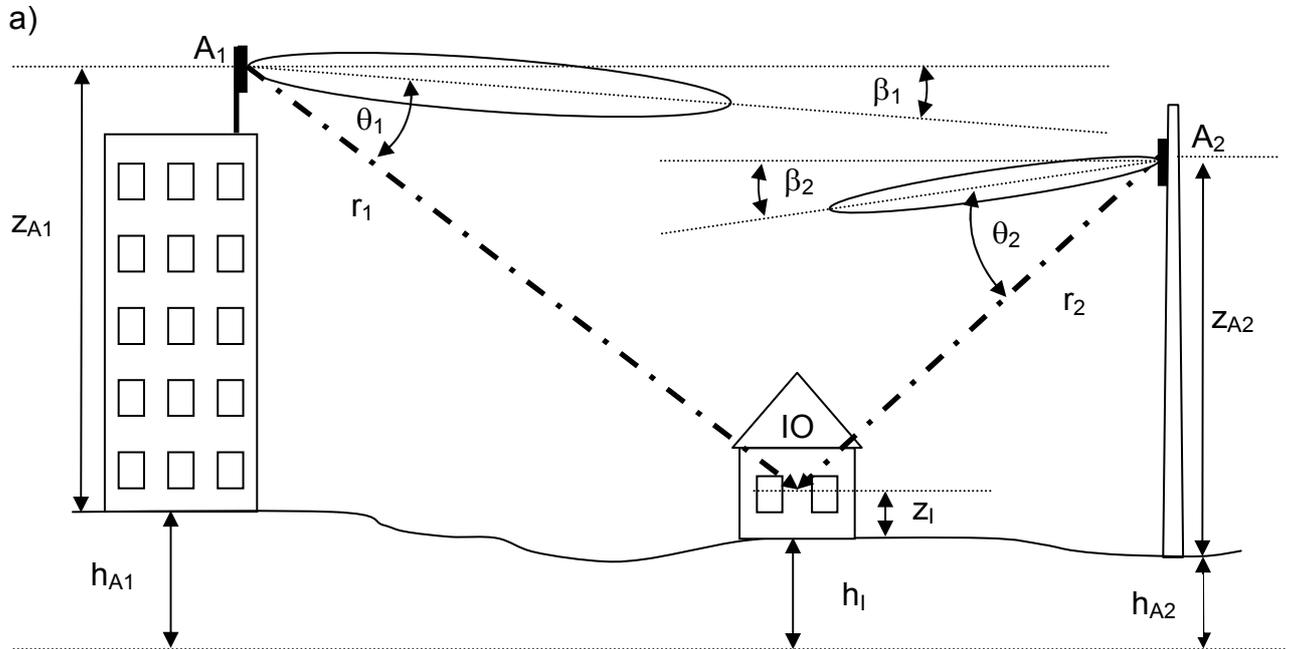


Abbildung II.1.12
Geometrische Verhältnisse bei der Berechnung der von zwei Sendeantennen (A_1, A_2) an unterschiedlichen Standorten am Immissionsort (IO) verursachten Immissionen.

- a) Seitenansicht
- b) Draufsicht
- HSR: Hauptstrahlrichtung
- N: Nord-Richtung

Die von einer Sendeantenne an einem Ort im Abstand r_A von der Antenne erzeugte Leistungsdichte S_{FA} berechnet sich unter Freiraum-Ausbreitungsbedingungen nach der folgenden Formel:

$$S_{FA} = P_A \cdot G_A(\theta_A, \phi_A) / (4\pi \cdot r_A^2) \quad (\text{Gl. 1.4})$$

$$= P_{A,EIRP} \cdot G_{AR}(\theta_A, \phi_A) / (4\pi \cdot r_A^2)$$

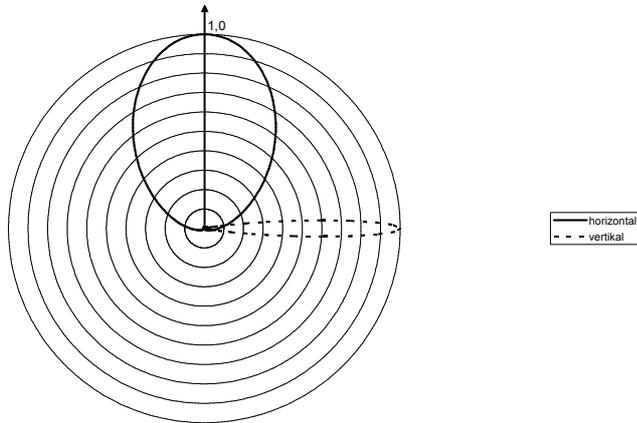
P_A	Sendeleistung
G_A	Antennengewinnfaktor (abhängig vom Typ der Antenne und von den Winkeln θ_A und ϕ_A zwischen der Hauptstrahlrichtung der Antenne und der Richtung von der Antenne zum Immissionsort)
r_A	Abstand zwischen Antenne und Immissionsort
$P_{A,EIRP}$	Äquivalente isotrope Strahlungsleistung
G_{AR}	Richtfaktor

Um die Gesamtimmisionen zu berechnen (s. Gleichung 1.5) wird über die Leistungsdichtebeiträge aller Antennen in der Umgebung (Σ_A) summiert, wobei aufgrund ggf. unterschiedlicher Mobilfunknetze, Hauptstrahlrichtungen der Antennen, Höhen- und Abstandsdifferenzen zwischen Antenne und Immissionsort die jeweiligen Sendeleistungen ($P_{A,EIRP}$), Antennenrichtfaktoren (G_{AR}), Abstände (r_A), Winkel (θ_A, ϕ_A) zu berücksichtigen sind. Die Einflüsse der Umgebung (Gebäude, Vegetation, Wände usw.) auf die Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen wird durch Transmissionsfaktoren T_{UA} berücksichtigt, die von der Art der Umgebung und den Ausbreitungsverhältnissen sowie der Frequenz und damit vom Mobilfunknetz abhängen (s.u.). Für die Leistungsdichte am Immissionsort ergibt sich dann:

$$S_F = \sum_A T_{UA} \cdot P_{A,EIRP} \cdot G_{AR}(\theta_A, \phi_A) / (4\pi \cdot r_A^2) \quad (\text{Gl. 1.5})$$

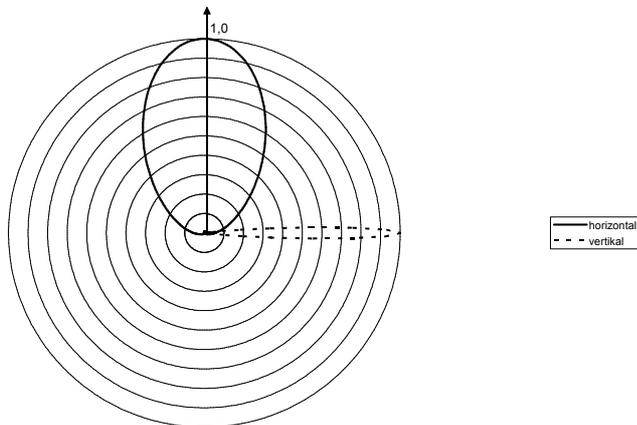
Ein Teil der für die Immissionsberechnungen erforderlichen Daten ist in der Standortdatenbank der Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post gespeichert, die für die Durchführung der Querschnittsstudie zur Verfügung gestellt wurde. Die Standortdatenbank enthält alle Daten, die auch in den Standortbescheinigungen für Mobilfunkanlagen aufgeführt sind. Dazu gehören insbesondere die Geokoordinaten der Antennenstandorte, die Montagehöhen der Antennen und die Hauptstrahlrichtungen der Antennen. Es fehlen allerdings Angaben zu den Sendeleistungen, Downtilts und Abstrahlcharakteristiken der Sendeantennen. In den Standortbescheinigungen ist zwar ein Sicherheitsabstand angegeben, der für den Fall maximaler beantragter Sendeleistung berechnet wurde und aus dem umgekehrt die äquivalente isotrope Strahlungsleistung (EIRP) bei maximaler Sendeleistung berechnet werden könnte. Da jedoch oft mehr Funkkanäle beantragt als tatsächlich benutzt werden und weil GSM-Anlagen nur im Organisationskanal permanent mit voller Leistung senden, in den Verkehrskanälen dagegen nur selten und kurzzeitig (s. II.1.1.3), würden die Immissionen bei Verwendung einer aus dem Sicherheitsabstand berechneten Sendeleistung in der Regel stark überschätzt. Deshalb wurden stattdessen die technischen Daten von mehr als 200 Mobilfunkanlagen ausgewertet und auf dieser Basis wurden typische Sendeleistungen von GSM 900-, GSM 1800- und UMTS-Anlagen im Einkanalbetrieb (EIRP-Standardwerte) für verschiedene Siedlungstypen ermittelt, wie er für die Nachtzeit typisch ist (s. Tabelle II.1.6). Aus den Daten der Mobilfunkanlagen wurden auch Standardwerte für die Antennen Downtilts und typische Antennencharakteristiken bestimmt. Der Antennen-Downtilt ist vor allem im Bereich bis etwa 100 m Abstand von der Sendeantenne ein kritischer Parameter. Größere Abweichungen zwischen den Ergebnissen von Messungen und Berechnungen, die in wenigen Fällen auftraten (s.u.), sind wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass der tatsächliche Downtilt stärker von dem für die Berechnung verwendeten Standardwert abweicht. Als Standard-Antennencharakteristiken wurden die Abstrahlcharakteristiken der für GSM 900-, GSM 1800- und UMTS-Anlagen jeweils am häufigsten eingesetzten Antennentypen verwendet. Diese wurden durch analytische Ausdrücke angenähert, wobei besonderen Wert auf die korrekte Wiedergabe der Charakteristiken im Bereich der

Hauptsendekeule gelegt wurde. Abbildung II.1.13 zeigt die in den Rechnungen verwendeten Standard-Antennencharakteristiken.



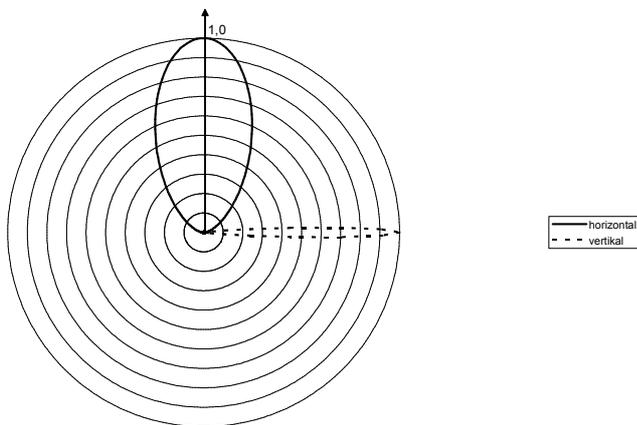
a) GSM 900 horizontal
 $G_R = 0,005 + 0,495 \cos(\phi/2)^{14} + 0,5 \cos(\phi/2)^6$

GSM 900 vertikal
 $G_R = 0,002 + 0,984 \cos(\theta/2)^{850} + 0,014 \cos(\theta/2)^8$



b) GSM 1800 horizontal
 $G_R = 0,005 + 0,595 \cos(\phi/2)^{20} + 0,4 \cos(\phi/2)^6$

GSM 1800 vertikal
 $G_R = 0,001 + 0,989 \cos(\theta/2)^{1800} + 0,01 \cos(\theta/2)^8$



UMTS horizontal
 $G_R = 0,5 \cos(\phi/2)^{36} + 0,5 \cos(\phi/2)^{12}$

UMTS vertikal
 $G_R = 0,99 \cos(\theta/2)^{2400} + 0,01 \cos(\theta/2)^8$

Abbildung II.1.13
 Standard-Antennencharakteristiken (Richtfaktor), linearer Maßstab

Die geometrischen Parameter wurden im Rahmen dieses Projekts in einigen Fällen durch Längen- und Höhenmessungen vor Ort, in der Regel jedoch anhand topographischer Karten (horizontale Koordinaten der Standorte der Sendeantennen und der Immissionsorte, Terrainhöhen der Standorte der Sendeantennen und der Immissionsorte) sowie der Standortbescheinigungen (Montagehöhe der Sendeantennen über Grund) und der Angaben zum Stockwerk, in dem sich die zu untersuchende Wohnung befand, (Höhe des Immissionsorts über Grund) bestimmt. Die Angaben zu den Höhen und den Abständen sind mit Unsicherheiten behaftet. In horizontaler Richtung liegt der Fehler in der Regel deutlich unter 10 m. Ursachen sind vor allem:

- Unsicherheiten bei Längenmessungen vor Ort, z.B. wenn ein Antennenstandort nicht direkt zugänglich war,
- Ablesefehler bei der Ermittlung von Abständen und Winkeln anhand von Karten,
- die Ausdehnung von Wohnungen (es wurde nur ein Koordinatensatz für den Mittelpunkt jeder Wohnung ermittelt und für alle Räume benutzt).

In seltenen Fällen, wenn die Antennen auf einem ausgedehnten Gebäudedach verteilt sind, können sich die Abweichung auch zu größeren Werten aufaddieren (bis 20 m).

In vertikaler Richtung ist in der Regel mit einer Unsicherheit von weniger als 3 m zu rechnen, diese ergibt sich aus:

- Ungenauigkeiten in den Höhenangaben in den Standortbescheinigungen,
- Ablesefehlern bei der Ermittlung von Terrainhöhen anhand von Karten,
- nicht einheitlichen Geschosshöhen.

Größere Fehler (bis 5 m) sind bei stark bergigem oder hügeligem Gelände möglich, da dann Höhendifferenzen in Karten nur relativ schlecht abgelesen werden können.

Die Ungenauigkeiten der Abstands- und vor allem der Höhenwerte wirken sich vornehmlich bei kleinen Abständen zwischen Sendeantenne und Immissionsort aus.

Im Rahmen der Querschnittsstudie stehen nur die Angaben zu den Koordinaten der Standorte der Sendeantennen in den Standortbescheinigungen und geocodierte Adressen der Wohnungen zur Verfügung. Eine Stichprobenprüfung durch die Forschungsnehmer der epidemiologischen Querschnittsstudie ergab, dass insbesondere die Koordinatenangaben in den Standortbescheinigungen mit zum Teil erheblichen Fehlern behaftet sind. Diese Unsicherheiten sollen durch eine neue Geocodierung der Adressen reduziert werden. Aber auch die Koordinaten, die von den Landesvermessungsämtern zu den in den Standortbescheinigungen angegebenen Adressen ermittelt werden, können insbesondere für ausgedehnte Gebäude größere Fehler aufweisen, da sich die Koordinatenangaben in der Regel auf den Gebäudeeingang beziehen, dessen Lage nicht mit der der Sendeantennen auf dem Gebäude übereinstimmen muss. Ähnliches gilt für die Koordinaten von Wohnungen. Für Antennenanlagen im Außenbereich gibt es in den Standortbescheinigungen lediglich Angaben zum Flurstück, auf dem der Antennenträger steht. Da in diesen Fällen keine Adresse angegeben wird, ist eine neue Geocodierung über die Landesvermessungsämter nicht möglich.

Die Montagehöhen der Sendeantennen und die Höhen der Immissionsorte über Grund können im Rahmen der Querschnittsstudie in gleicher Weise und mit der gleichen Genauigkeit wie in diesem Projekt ermittelt werden. Ein Problem stellen die Terrainhöhen dar. Informationen hierzu stehen im Rahmen der Querschnittsstudie nicht zur Verfügung. Dies dürfte jedoch nur in seltenen Fällen zu größeren Fehlern der berechneten Immissionen führen, da die Höhendifferenz zwischen Sendeantenne und Immissionsort aufgrund der vertikalen Strahlaufweitung nur bis zu horizontalen Abständen von 100 m ein kritischer Parameter ist. In bebauten Bereichen dürfte ein Terrainhöhenunterschied von mehr als 5 m innerhalb dieser Distanz sehr selten sein.

Die Transmissionsfaktoren T_U wurden empirisch bestimmt (s. Tabelle II.1.7). Dazu werden die für Freiraumausbreitung berechneten Immissionen mit den gemessenen verglichen. Durch einen Least Squares-Fit werden die Transmissionsfaktoren als die Faktoren ermittelt, die multipliziert mit den berechneten Werten die beste Übereinstimmung mit den gemessenen Werten liefern. Die Fits werden für die drei Mobilfunk-Frequenzbereiche (900 MHz, 1800 MHz, 2100 MHz) getrennt durchgeführt. Außerdem wird zwischen zwei Siedlungstypen (aufgelockerte Bebauung, verdichtete Bebauung) und den Fällen Mobilfunkanlagen sichtbar bzw. nicht sichtbar unterschieden.

Auf der Basis des Rechenmodells I wurden die Immissionen in den 610 Innenräumen berechnet, die bis Anfang des Jahres 2004 vermessen worden waren. Ein Standardverfahren, um den Grad der Übereinstimmung der Ergebnisse zweier Testverfahren zu bestimmen, ist der Kappa-Test. Hier geht es insbesondere darum, zu überprüfen, ob eine Wohnung, die aufgrund der Berechnung als 'höher' / 'geringer' exponiert klassifiziert wird, auch tatsächlich 'höher' / 'geringer' exponiert ist, wenn die Messwerte zugrunde gelegt werden. Ein Kappa-Wert von 0 zeigt eine rein zufällige Übereinstimmung an, ein Wert von 1 perfekte Übereinstimmung, das heißt, dass alle Wohnungen mit berechneten Immissionen über einem bestimmten Wert auch bei den Messwerten über dem entsprechenden Schwellenwert liegen. Werte zwischen 0,4 und 0,5 bedeuten eine mittlere und Werte größer 0,5 eine gute Übereinstimmung. Für die Konstellation 'Wohnung in Gebieten mit aufgelockerter Bebauung, Sichtverbindung zwischen Mobilfunkanlage und Immissionsort' liefert der Kappa-Test Werte deutlich über 0,5. Bei fehlender Sichtverbindung liegen die Werte zwischen 0,4 und 0,5.

In Abbildung II.1.14 sind die Mess- und Rechenergebnisse für alle Wohnungen bzw. Innenräume in Gebieten mit aufgelockerter Bebauung in der Nähe von GSM 900- und GSM 1800-Anlagen in logarithmischer Darstellung aufgetragen. Tabelle II.1.4 zeigt die Ergebnisse des Kappa-Tests für verschiedene Schwellenwerte.

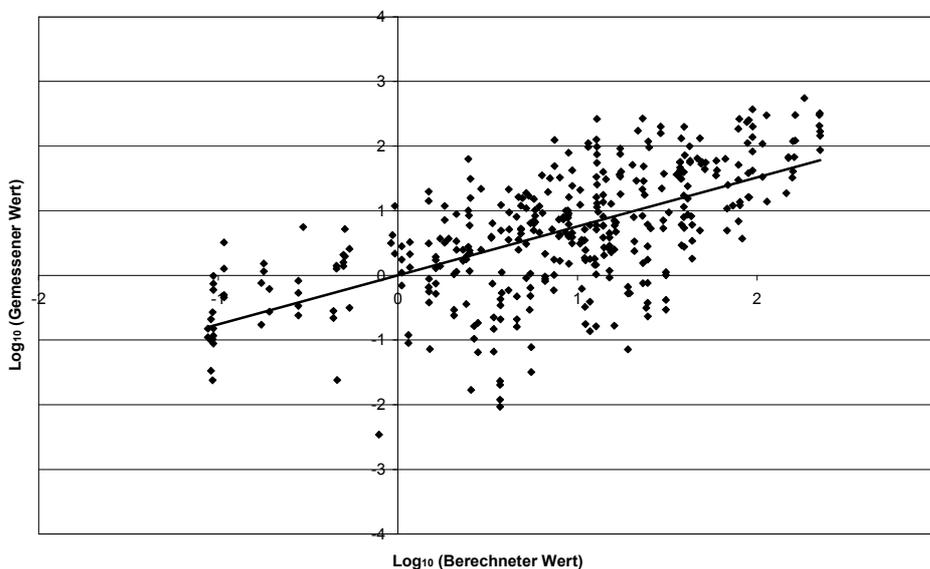


Abbildung II.1.14

Berechnete und gemessene GSM 900- und GSM 1800-Immissionen in Wohnungen in Gebieten mit aufgelockerter Bebauung mit und ohne Sichtverbindung zwischen Mobilfunksendeanlage und Immissionsort (Einheit: $\mu\text{W}/\text{m}^2$)

Tabelle II.1.4

Ergebnisse des Kappa-Tests für Messungen und Berechnung der GSM 900- und GSM-1800-Immissionen in Innenräumen von Wohnungen in Gebieten mit aufgelockerter Bebauung mit und ohne Sichtverbindung zwischen Mobilfunksendeanlage und Immissionsort

Schwellenwert Messung [$\mu\text{W}/\text{m}^2$]	10	25	50	75	100
K-Wert	0,44	0,53	0,45	0,48	0,40

Das bisher beschriebene Verfahren liefert eine brauchbare Expositionsklassifizierung (weitere Ergebnisse wurden im 2. Zwischenbericht zu diesem Projekt vorgestellt, Neitzke et al. 2004). Für die Auswertung und damit später auch für die Berechnung der Immissionen werden jedoch zusätzlich zu den in Tabelle II.1.3 aufgeführten Daten Informationen zum Siedlungstyp und zur Sichtbarkeit der Mobilfunkantennen in der Umgebung des Immissionsorts benötigt. Im Rahmen dieses Projekts konnten diese Informationen leicht gesammelt werden, da die zu untersuchenden Wohnungen von den Mess-teams aufgesucht werden mussten. In der ersten Phase der epidemiologischen Querschnittsstudie mit mehr als 30.000 Teilnehmern und entsprechend vielen Wohnungen, für die die Immissionen zu bestimmen sind, ist dies jedoch nicht möglich. Informationen zur Umgebungsbebauung können über entsprechende Fragen in einem Fragebogen abgefragt werden, der von den Teilnehmern an der Querschnittsstudie ohnehin ausgefüllt werden muss. Verlässliche Informationen zur Sichtbarkeit von Sendantennen sind auf diesem Weg jedoch nicht zu erhalten. Deshalb musste ein anderes Berechnungsverfahren entwickelt werden, das ohne diese Informationen auskommt.

II.1.2.2 Rechenmodell II: Freiraumausbreitung, räumliche Orientierung der Fenster und Wände, Einfallswinkel der elektromagnetischen Welle, Transmissions-eigenschaften der Umgebungsbebauung und von Wänden, Sichtverhältnisse vor den Fenstern

Ausgangspunkt der Immissionsrechnungen ist auch im Rechenmodell II die Berechnung der Abstrahlung der Antennen unter Freiraum-Ausbreitungsbedingungen nach Gleichung 1.4. Dabei werden die in Tabelle II.1.3 aufgeführten Daten verwendet. Das Kriterium 'Sichtbarkeit der Antenne' wird im Rechenmodell II durch eine Berechnung der Immissionen ersetzt, in die

- die räumliche Orientierung der Fenster und Wände des Raumes, für den die Immission zu bestimmen ist, und
 - der Einfallswinkel der elektromagnetischen Welle
- eingehen. Außerdem werden
- die Dämpfung durch die Raumhülle, die davon abhängt, ob die Welle Außenwände mit oder ohne Fenster oder mehrere Wände durchdringen muss, bevor sie den Raum erreicht,
 - die Dämpfung durch Gebäude oder Vegetation vor den Fenstern und
 - die Dämpfung durch die Umgebungsbebauung

durch empirisch ermittelte Transmissionsfaktoren ermittelt. Die geometrischen Verhältnisse am Immissionsort sind in Abb. II.1.15 dargestellt. Tabelle II.1.5 gibt einen Überblick über die im Rechenmodell II zusätzlich benötigten Daten und Informationen und deren Quellen.

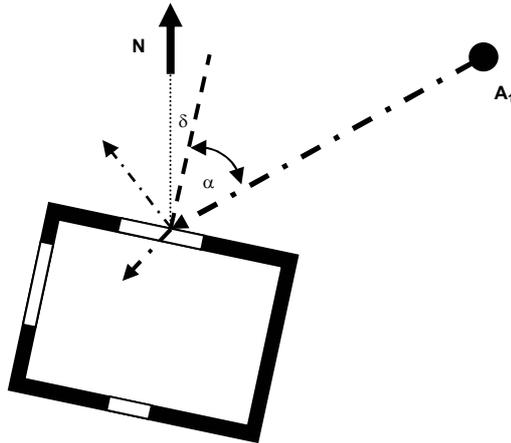


Abbildung II.1.15

Geometrische Verhältnisse am Immissionsort

- A_1 Sendeantenne
- δ Winkel zwischen der Flächennormalen der Wand und der Nordrichtung
- α Einfallswinkel der elektromagnetischen Welle

Tabelle II.1.5

Erforderliche Daten zur Berechnung der Immissionen in Innenräumen unter Berücksichtigung der Orientierung der Fenster sowie der Dämpfung durch Bebauung, Vegetation und Wandmaterialien

Erforderliche Daten	Datenquellen
Frequenz(bereich) der e.m. Welle f	im Projekt: Messung vor Ort / Angaben zu den Mobilfunknetzen aus den Standortbescheinigungen in der Querschnittsstudie: Angaben zu den Mobilfunknetzen aus den Standortbescheinigungen
Dämpfung beim Eindringen in Innenräume	
räumliche Ausrichtung der Fenster und Wände δ	im Projekt: Erhebung vor Ort / Wohnungsgrundrisse in der Querschnittsstudie: Angaben der Teilnehmer an der Querschnittsstudie zur Ausrichtung der Fenster
Art der Wände <ul style="list-style-type: none"> - Außenwand mit Fenster - Außenwand ohne Fenster - Innenwand 	im Projekt: Erhebung vor Ort in der Querschnittsstudie: Angaben der Teilnehmer an der Querschnittsstudie
Transmissionsfaktoren für die Oberflächen von drei Arten von Wänden T_{ow} abhängig von <ul style="list-style-type: none"> - Einfallswinkel der elektromagnetischen Welle α - Materialeigenschaften der Wand (relative Dielektrizitätskonstante $\epsilon_r = \epsilon_r(f)$) 	Berechnung aus ϕ, θ, δ Literaturwerte
Transmissionsfaktoren für drei Arten von Wänden (Absorption im Material) $T_{mw} = T_{mw}(f)$	im Rahmen des Projekts empirisch ermittelt
Einflüsse der Umgebung auf die Ausbreitung	
Art der Bebauung <ul style="list-style-type: none"> - aufgelockerte ein- und zweigeschossige Bebauung - aufgelockerte mehrgeschossige Blockbebauung - verdichtete mehrgeschossige Bebauung mit Freiflächen an den Häusern - geschlossene mehrgeschossige Bebauung 	im Projekt: Erhebung vor Ort in der Querschnittsstudie: Angaben der Teilnehmer an der Querschnittsstudie
Transmissionsfaktoren für vier verschiedene Bebauungsarten $T_u = T_u(f)$	im Rahmen des Projekts empirisch ermittelt
Sichtverhältnisse vor den Fenstern <ul style="list-style-type: none"> - freie Sicht - Sicht eingeschränkt durch Wände, Wälle oder Gebäude - Sicht eingeschränkt durch Vegetation 	im Projekt: Erhebung vor Ort in der Querschnittsstudie: Angaben der Teilnehmer an der Querschnittsstudie
Transmissionsfaktoren für drei Typen von Sichtverhältnissen vor den Fenstern $T_s = T_s(f)$	im Rahmen des Projekts empirisch ermittelt

Die Annahmen des Modells in Bezug auf Ausbreitungs- und Immissionsverhältnisse und die Vorgehensweise bei der Immissionsberechnung werden in Abbildung II.1.16 illustriert. Es wird angenommen, dass nur die Transmission elektromagnetischer Wellen durch die Wände eines Raumes zu den Immissionen in dem Raum beitragen, die in Richtung einer Mobilfunkanlage orientiert sind. Für den Raum R_1 sind es bezogen auf die Sendeantenne A_1 die Wände W_{11} und W_{12} , bezogen auf die Sendeantenne A_2 die Wände W_{12} und W_{13} . Die von der Antenne A_1 ausgehende und entlang des Strahls S_1 auf die Außenwand W_{11} mit Fenster auftreffende elektromagnetische Welle wird teilweise reflektiert. Der Reflexionsfaktor hängt vom Einfallswinkel und dem Material ab. Der transmittierte Anteil wird beim Durchgang durch die Wand teilweise absorbiert. Reflektierter und absorbiertes Anteil werden als Verluste behandelt, der Rest trägt zur Immission im Raum R_1 bei. Der Beitrag zur Immission über die Innenwand W_{12} ist sehr gering, da die von A_1 ausgehenden elektromagnetischen Wellen erst nach Durchgang durch Wände des Raums R_2 auf diese Wand treffen. Mehrfache Reflexionen und Absorptionen entlang des Ausbreitungspfadens führen zu einer starken Dämpfung. Gleiches gilt für den Beitrag der Antenne A_2 über die Wand W_{12} . Die entlang des Strahls S_5 einfallende Welle trifft auf Vegetation und wird dort teilweise reflektiert und gestreut. Ein Teil der Intensität trifft auf die Außenwand W_{13} bzw. das Fenster. Der nach Reflexion an der Oberfläche und Absorption im Material verbleibende Rest liefert einen Beitrag zur Immission im Raum R_1 . Der Raum R_2 hat nur Außenwände in Richtung der Sendeantennen.

Die Immissionen in einem Raum berechnen sich nach der folgenden Gleichung:

$$S_R = \sum_A \sum_W T_{OW}(f_A, \alpha, \delta) \cdot T_{MW}(f_A) \cdot T_S(f_A) \cdot T_U(f_A) \cdot G_{AR}(\phi_A, \theta_A) \cdot P_{A,EIRP} / (4\pi \cdot r_A^2) \quad (\text{Gl. 1.5})$$

\sum_A	Summation über alle Antennen
\sum_W	Summation über alle Wände
T_{OW}	Transmissionsfaktor Wandoberfläche
T_{MW}	Transmissionsfaktor Wandmaterial
T_S	Transmissionsfaktor Sichtverhältnisse
T_U	Transmissionsfaktor Umgebung
f_A	Sendefrequenz
δ	Richtungswinkel der Wandnormalen
α	Einfallswinkel der e.m. Welle
$G_{AR}(\phi_A, \theta_A), P_{A,EIRP}, r_A$	s. Legende zu Gl. 1.4

Reflexion und Transmission elektromagnetischer Felder an Oberflächen hängen auch von der Polarisationsrichtung der Welle ab. Da diese Größe nicht bekannt ist, wird für die Berechnung der Transmissionsfaktoren für die Wandoberflächen von einer unpolarisierten Welle ausgegangen. Aus den bekannten Formeln für die Transmissionsfaktoren polarisierter Wellen und die Leistungstransmission (Geng & Wiesbeck 1998 S. 42ff) ergibt sich für die Berechnung der Transmissionsfaktoren T_{OW} die folgende Formel:

$$T_{OW} = \{ \varepsilon_r - \sin^2\alpha \}^{1/2} \cdot [4 \cdot \varepsilon_r \cdot \cos^2\alpha / (\varepsilon_r \cdot \cos\alpha + \{ \varepsilon_r - \sin^2\alpha \}^{1/2})^2 + 4 \cdot \cos^2\alpha / (\cos\alpha + \{ \varepsilon_r - \sin^2\alpha \}^{1/2})^2] / 2 \quad (\text{Gl. 1.6})$$

$\varepsilon_r = \varepsilon_r(f)$	rel. Dielektrizitätskonstante
α	Einfallswinkel

Da die hier interessierenden Baumaterialien rein dielektrisch sind, gehen die Materialeigenschaften nur über die relative Dielektrizitätskonstante ε_r ein. Für typische Wandmaterialien von Gebäuden und Glas geben de Jong et al. (2004) einen Wert $\varepsilon_r = 5$ an.

Die Transmissionsfaktoren wurden in mehreren Stufen berechnet. Das Vorgehen ist schematisch in Abbildung II.1.17 dargestellt.

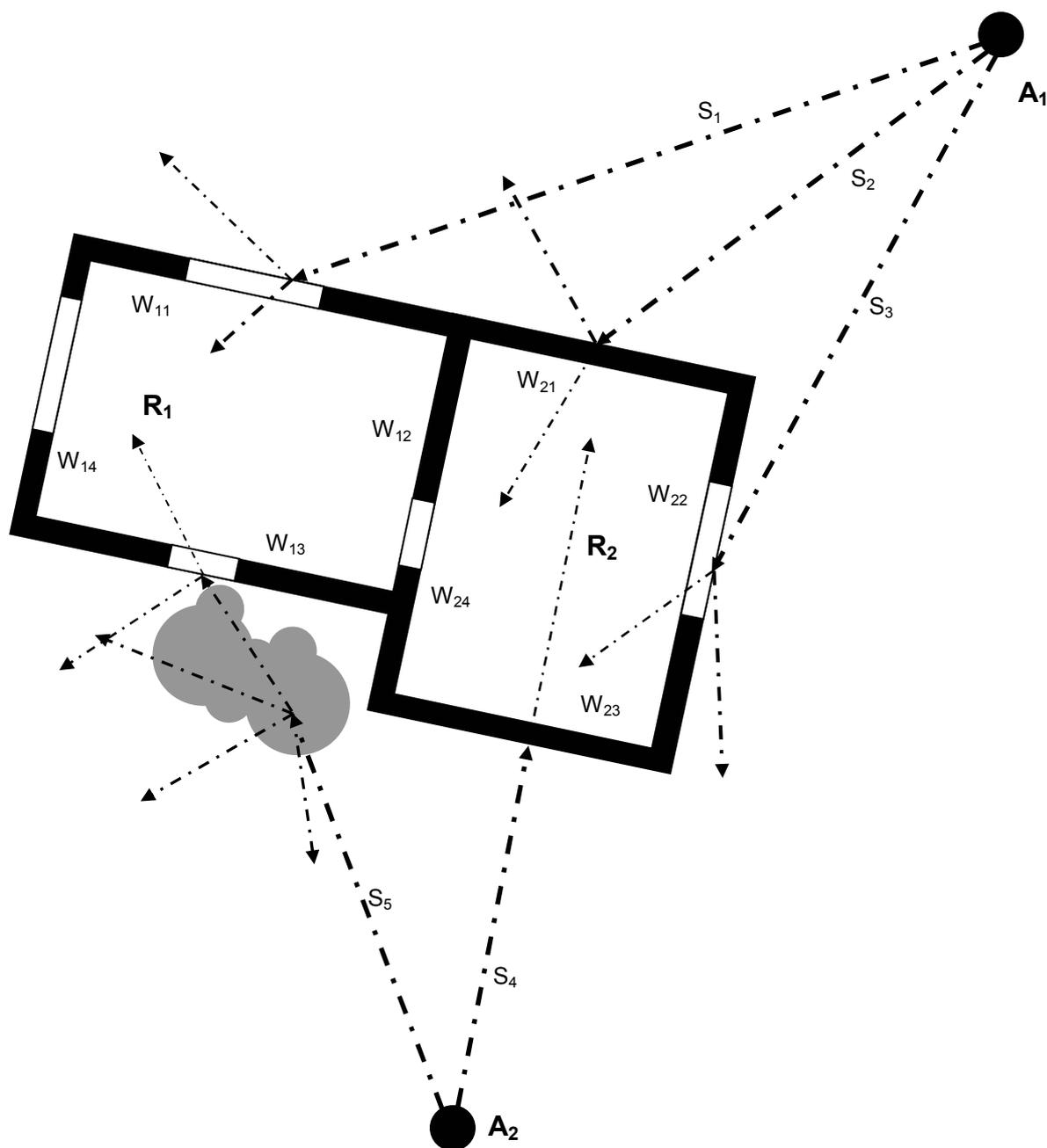


Abbildung II.1.16

Vereinfachte Darstellung der Beiträge von zwei Sendeantennen A1 und A2 zu den Immissionen in Innenräumen unter Berücksichtigung von Reflexionen an Oberflächen, Absorption in Wandmaterialien und Streuung an Objekten in der Umgebung.

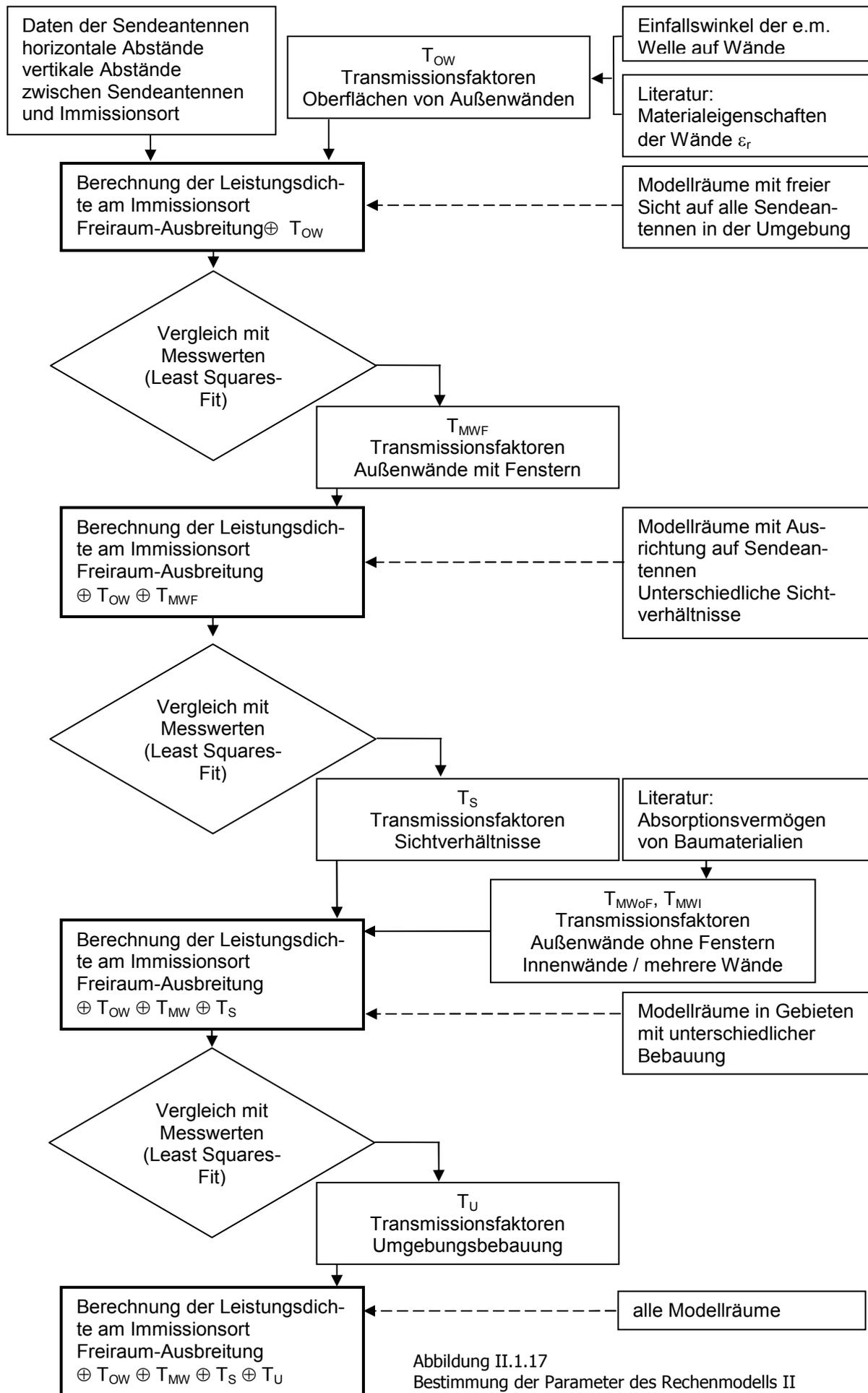


Abbildung II.1.17
Bestimmung der Parameter des Rechenmodells II

Zum Transmissions- bzw. Abschirmverhalten von Wandmaterialien gibt es einschlägige Untersuchungen (s. z.B. Pauli & Moldan 2003, Bay LfU 2004). Die dort ermittelten Schirmdämpfungen können jedoch nicht einfach in die Rechnungen übernommen werden, da das Material der Wohnungswände zwar für viele der im Rahmen dieses Projekt untersuchten Wohnungen ermittelt werden konnte, diese Information jedoch in der Querschnittsstudie nicht zur Verfügung steht. Deshalb wurden anhand der Literaturwerte und der Informationen über den Aufbau der Wände in den untersuchten Wohnungen typische Transmissionsfaktoren für Außenwände ohne Fenster und komplexe Wandstrukturen (s. z.B. in Abbildung II.1.16 den Beitrag der Antenne A_2 durch die Wand A_{12} , der durch das Transmissionsverhalten weiterer Wände beeinflusst wird) ermittelt. Ein besonderes Problem stellen die Transmissionsfaktoren für Außenwände mit Fenstern dar, da hier ein Teil der Wand von massiven Baumaterialien mit einem hohen Absorptionsvermögen gebildet wird und ein Teil von Glas, dessen Absorptionsvermögen relativ gering ist. Die Immissionen hängen daher auch von der Größe der Fenster ab. Für diese Größe gibt es im Rahmen der Querschnittsstudie keine Werte. Deshalb wurden in diesem Projekt typische Transmissionsfaktoren für Wände mit Fenstern ermittelt. Diese wurden anhand der Ergebnisse von Messungen in Räumen bestimmt, in deren Umgebung sich lediglich ein einzelner Mobilfunkstandort befand, zu dem außerdem Sichtverbindung bestand. Solche eindeutigen Immissionssituationen (nur ein Senderstandort im Umkreis von 500 m, der sichtbar ist) traten nur in Gebieten mit aufgelockerter Bebauung auf. Die Messergebnisse wurden mit den Ergebnissen von Berechnungen für diese Räume unter Freiraum-Ausbreitungsbedingungen bestimmt. Die Transmissionsfaktoren ergeben sich dann einfach als die Faktoren, mit denen der berechnete Wert multipliziert werden muss, um die beste Übereinstimmung (Least Squares-Fit) mit den gemessenen Werten zu liefern. Abbildung II.1.18 illustriert die Vorgehensweise am Beispiel der GSM 900-Immissionen.

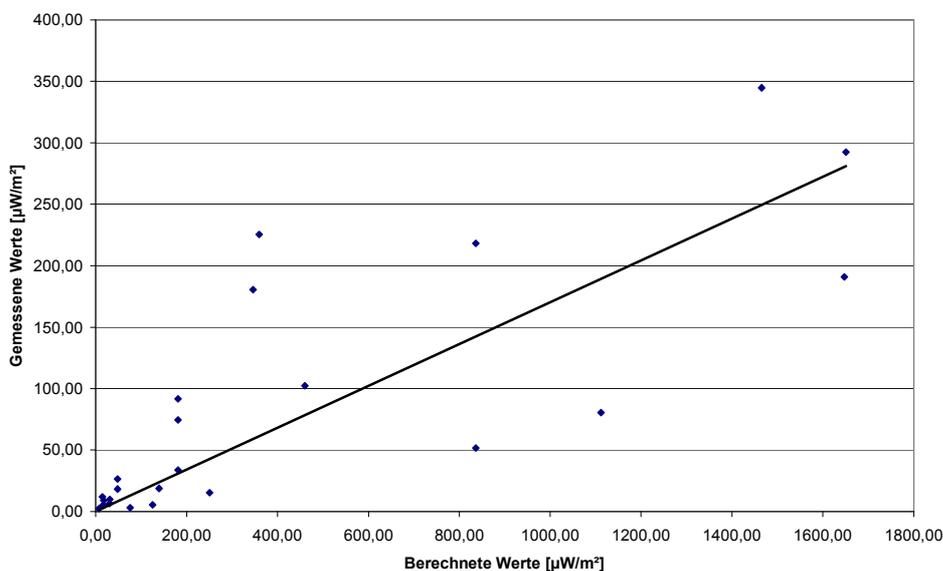


Abbildung II.1.18

Bestimmung typischer Transmissionsfaktoren T_{MWF} für Wände mit Fenstern durch einen Least Squares-Fit der berechneten und der gemessenen Daten für die von GSM 900-Sendeantennen verursachten Immissionen in Räumen mit Sichtverbindung zu den jeweiligen Sendantennen (Wohnungen in Gebieten mit aufgelockerter ein- und zweigeschossiger Bebauung und aufgelockerter mehrgeschossiger Bebauung). Aus der Steigung der Ausgleichsgeraden ergibt sich der Wert für den Transmissionsfaktor $T_{\text{MWF}} = 0,2$ (Korrelationskoeffizient 0,79).

Die von den Sichtverhältnissen abhängigen Transmissionsfaktoren T_{S} wurden ebenfalls empirisch ermittelt, da die in der Literatur angegebenen Dämpfungen für Bebauung und Vegetation nur für große Dämpfungstrecken benutzbar sind (s. z.B. Bosisio & Dechambre 2004, Bronshtein & Mazar 2000, Chukhlantsev et al. 2003, Fuschini et al. 2004, Martijn & Herben 2003, Mazar et al. 1998, Sofos &

Constantinou 2004). Die Vorgehensweise war analog zu der bei der Bestimmung der Transmissionsfaktoren T_{MWF} für Außenwände mit Fenster, nur dass in diesem Fall Räume herangezogen wurden, die zwar ein Fenster in Richtung der Sendeantennen hatten, bei denen jedoch aufgrund von Gebäuden, Wänden, Wällen, Bäumen oder Büschen keine freie Sicht aus dem Fenster bestand.

Für die Umgebungsdämpfung wurde ein Ausdruck der Form

$$T_U = \exp(a \cdot d) \quad (\text{Gl. 1.7})$$

a Transmissionskoeffizient
d horizontaler Abstand zwischen Sendeantenne und Immissionsort

angesetzt. Der Transmissionskoeffizient a hängt von der Art der Bebauung und der Frequenz ab. Er ist für Räume, in deren Umgebung ($d < 500$ m) sich nur ein einziger Mobilfunkstandort befindet, durch das bereits im Zusammenhang mit der Ermittlung der Transmissionsfaktoren T_{MWF} und T_S beschriebene Verfahren leicht zu bestimmen. Statt eines Least Squares-Fit Gemessene Werte (MW) vs. Berechnete Werte (RW) ist jetzt jedoch ein linearer Fit $\ln(RW) - \ln(MW)$ vs. d durchzuführen. Für Gebiete mit aufgelockerter Bebauung ergeben sich für die Steigung der Ausgleichsgeraden so kleine Werte, dass für die Transmissionskoeffizienten $a = 0$ gesetzt werden kann. In dichter besiedelten Gebieten mit mehreren Mobilfunk-Anlagen in der Umgebung ist der Abstand d zwischen Sendeantennen und Immissionsort nicht eindeutig. In diesen Fällen können die Transmissionskoeffizienten nur iterativ ermittelt werden. Beginnend mit einem (möglichst gut geschätzten) Startwert werden die Immissionen nach Gleichung 1.5, also unter Einbeziehung aller anderen Transmissionsfaktoren, für die beiden Gebietstypen mit dichterem Bebauung berechnet und mit den Messwerten verglichen. Der Wert von a , der den besten Fit liefert, wird als Transmissionskoeffizient übernommen.

Für die Berechnungen mit dem Rechenmodell II wurden die in Tabelle II.1.6 aufgeführten Standard-Anlagenparameter, die in Abbildung II.1.13 dargestellten Standard-Antennencharakteristiken und die in Tabelle II.1.7 aufgeführten Transmissionsfaktoren benutzt.

Tabelle II.1.6
Verwendete Anlagenparameter

Anlagenparameter	Bebauungstyp			
	aufgelockerte 1- u. 2-Familienhausbebauung	aufgelockerte mehrgeschossige Blockbebauung	verdichtete mehrgeschossige Bebauung mit Freiflächen	geschlossene mehrgeschossige Bebauung
EIRP [W]				
GSM 900	165	205	285	365
GSM 1800	165	330	460	460
Downtilt [°]				
GSM 900	-3,5	-6,0	-3,5	-6,0
GSM 1800	-1,0	-2,5	-3,0	-6,0

Tabelle II.1.7

Transmissionsfaktoren bzw. Parameter, die in die Berechnung der Transmissionsfaktoren eingehen.

Transmissionsfaktoren				
Oberflächen $T_{OW} \leftarrow \varepsilon_r$:	Außenwand mit Fenster	Außenwand ohne Fenster	Innenwand (mehrere Wände)	
GSM900	$\varepsilon_r = 5,0$	$\varepsilon_r = 5,0$	/.	
GSM1800	$\varepsilon_r = 5,0$	$\varepsilon_r = 5,0$	/.	
Wände T_{MW} :	Außenwand mit Fenster	Außenwand ohne Fenster	Innenwand (mehrere Wände)	
GSM900	0,2	0,02	0,003	
GSM1800	0,1	0,01	0,002	
Sichtverhältnisse T_S :	Freie Sicht	Sicht eingeschränkt durch Wände, Wälle	Sicht eingeschränkt durch Gebäude	Sicht eingeschränkt durch Vegetation
GSM900	1,0	0,5	0,5	0,4
GSM1800	1,0	0,2	0,2	0,4
Umgebung $T_U = e^{a \cdot d}$	aufgelockerte 1- u. 2-Familienhausbebauung	aufgelockerte mehrgeschossige Blockbebauung	verdichtete mehrgeschossige Bebauung mit Freiflächen	geschlossene mehrgeschossige Bebauung
GSM900	$a = 0$	$a = 0$	$a = - 0,0003$	$a = - 0,0025$
GSM1800	$a = 0$	$a = 0$	$a = - 0,0003$	$a = - 0,0060$

Für die Bestimmung der Modellparameter wurden Messdaten aus insgesamt 530 Räumen verwendet. 91 Räume wurden nicht in die Auswertung einbezogen, weil deren Daten für eine unabhängige Überprüfung des Modells genutzt werden sollten (s.u.).

In Abbildung II.1.19 sind die Ergebnisse der Berechnung der Gesamtmissionen (GSM 900 und GSM 1800) in 91 Testräumen dargestellt, die für die Bestimmung der Modellparameter nicht genutzt wurden. Bei 21 der 91 Testräume wurden die Immissionen durch Anlagen verursacht, die auch zu den Immissionen in Modellräumen beigetragen haben. Die anderen Räume befanden sich an anderen Standorten und mehrheitlich sogar in anderen Städten. Für die Überprüfung der Anwendbarkeit des Rechenmodells wurden Räume und Anlagen aus allen Bebauungstypen für den Test herangezogen. Unter den Teststandorten befand sich auch einer mit 18 Antennen verteilt auf dem Dach eines Hochhauses in 28 m Höhe und 6 weiteren Antennen auf einem anderen Haus in 18 m Höhe. Für den Korrelationskoeffizienten Gemessene Gesamtmissionen (GSM 900 und GSM 1800) vs. Berechnete Gesamtmissionen ergibt sich ein Wert von 0,61, was eine gute Übereinstimmung von Rechnung und Messung anzeigt.

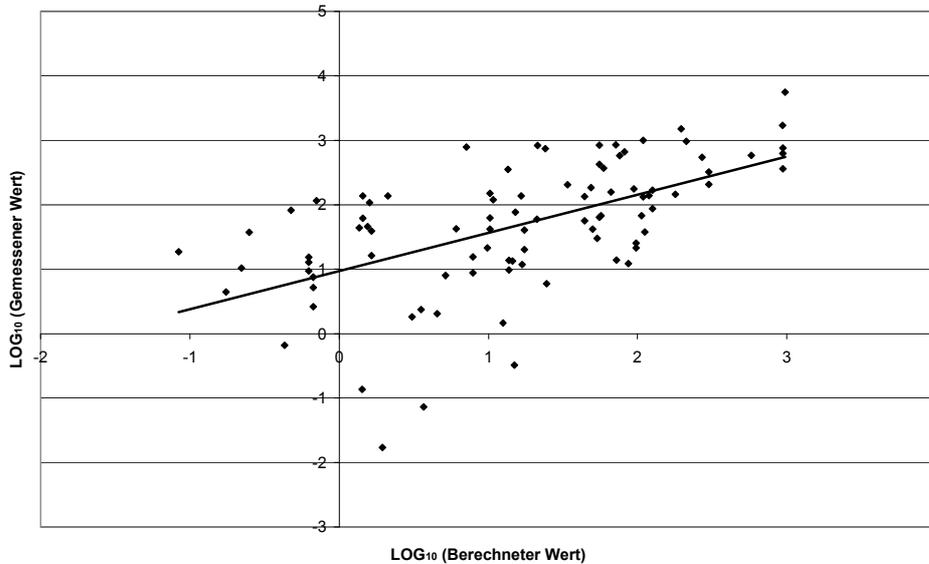


Abbildung II.1.19

Test des Rechenmodells anhand von Berechnungen und Messungen in Räumen, die bei der Modellbildung nicht benutzt wurden (Einheit: $\mu\text{W}/\text{m}^2$) (Korrelationskoeffizient: 0,61).

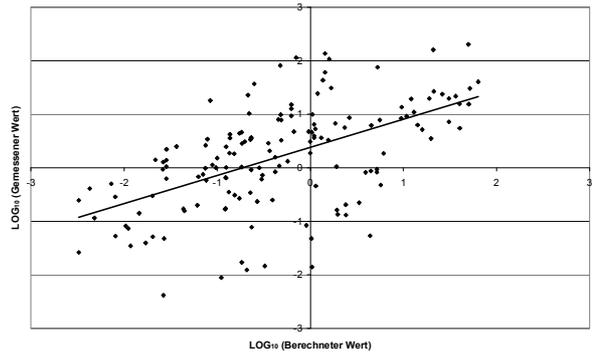
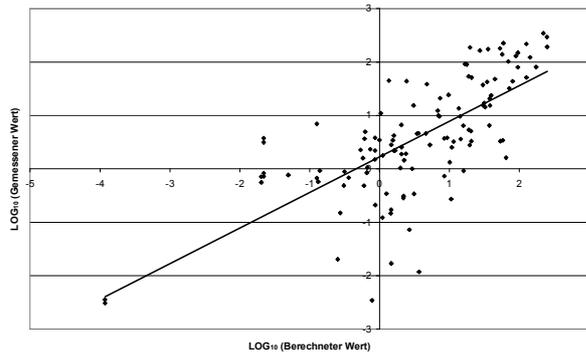
In den Abbildungen II.1.20 und II.1.21 sind die Ergebnisse aller Immissionsrechnungen (Modellräume und Testräume) zusammenfassend dargestellt, in Abbildung II.1.20 getrennt nach Frequenzbereich und Bebauungstypen, in Abbildung II.1.21 als Gesamtmissionen für alle untersuchten Räume.

In Tabelle II.1.8 sind als erstes Maß für die Güte der Expositionsklassifizierung anhand des Rechenmodells II wieder die Korrelationskoeffizienten Gemessene Gesamtmissionen (GSM 900 und GSM 1800) vs. Berechnete Gesamtmissionen für die Räume in den vier Bebauungstypen sowie für die Gesamtheit aller Räume angegeben. Für die Anlagen und Räume in drei der Bebauungstypen und die Gesamtheit aller Räume signalisieren die Werte der Korrelationskoeffizienten eine gute bis sehr gute Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Werten. Für Gebiete mit aufgelockerter Ein- und Zwei-Familienhausbebauung und solche mit verdichteter Bebauung mit Freiflächen an den Häusern ist die Korrelation tatsächlich über die Gesamtheit der dort untersuchten Räume gut. In Gebieten mit mehrgeschossiger Blockbebauung ist der hohe Wert für den Korrelationskoeffizienten allerdings nur auf drei Räume in einer Wohnung mit sehr hohen Immissionen zurückzuführen. Werden diese herausgenommen, sinkt der Korrelationskoeffizient auf 0,41. Auch andere Maße zur Überprüfung der Güte des Expositionsmodells zeigen für diesen Bebauungstyp nur mäßige Werte (s.u.). Umgekehrt verhält es sich mit den Ergebnissen für Gebiete mit geschlossener Bebauung, wo der Korrelationskoeffizient ebenfalls unter 0,5 liegt. Andere Maße zeigen, dass die Expositionsklassifizierung hier aber tatsächlich besser ist, als der Korrelationskoeffizient erwarten lässt.

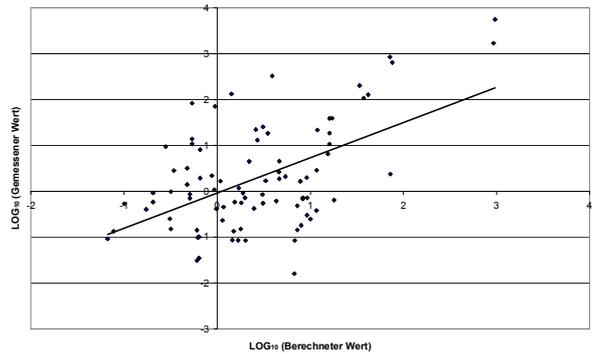
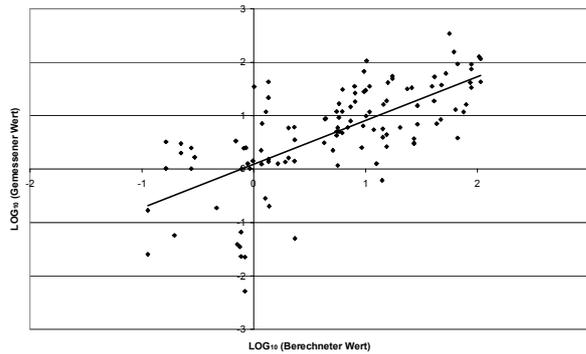
Tabelle II.1.8

Korrelationskoeffizienten Gemessene Gesamtmissionen vs. Berechnete Gesamtmissionen

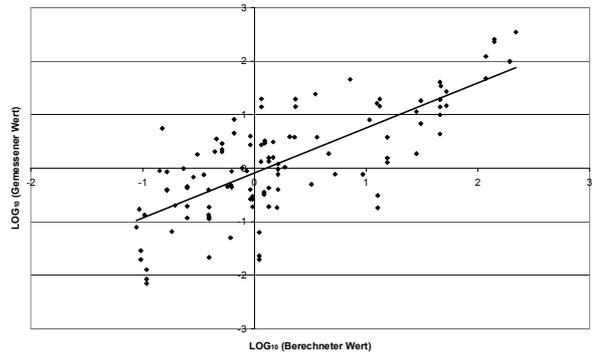
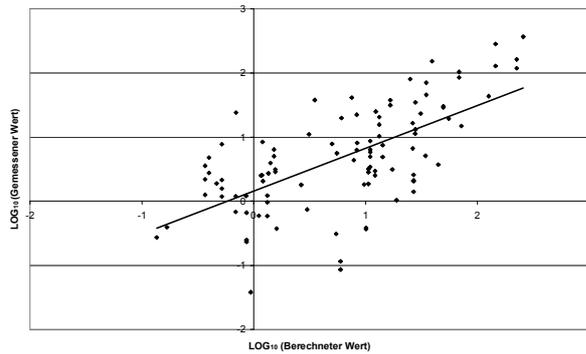
Bebauungstyp	aufgelockerte 1- u. 2-Familienhausbebauung	aufgelockerte mehrgeschossige Blockbebauung	verdichtete mehrgeschossige Bebauung mit Freiflächen	geschlossene mehrgeschossige Bebauung	alle Bebauungstypen
Korrelationskoeffizient	0,74	0,86 (0,41)	0,86	0,48	0,64



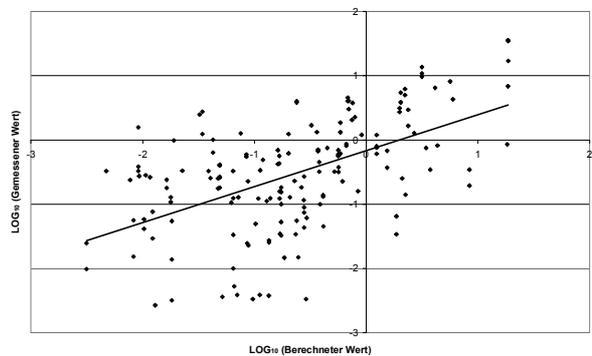
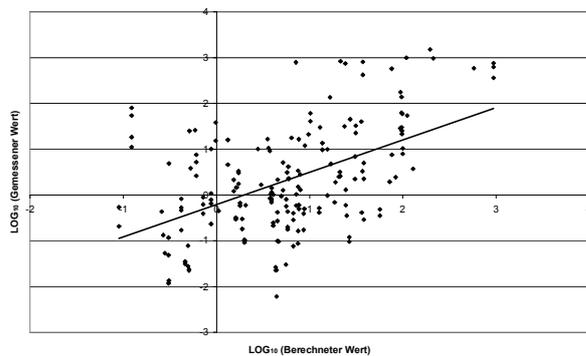
Aufglockerte ein- und zweigeschossige Bebauung



Aufglockerte mehrgeschossige Blockbebauung



Verdichtete mehrgeschossige Bebauung mit Freiflächen



Geschlossene mehrgeschossige Bebauung

GSM 900

GSM 1800

Abbildung II.1.20

Ergebnisse der Berechnung der GSM 900- und GSM 1800-Immissionen in Innenräumen getrennt nach den vier Bebauungstypen mit dem Rechenmodell II im Vergleich mit den gemessenen Raummittelwerten (Einheit: $\mu\text{W}/\text{m}^2$)

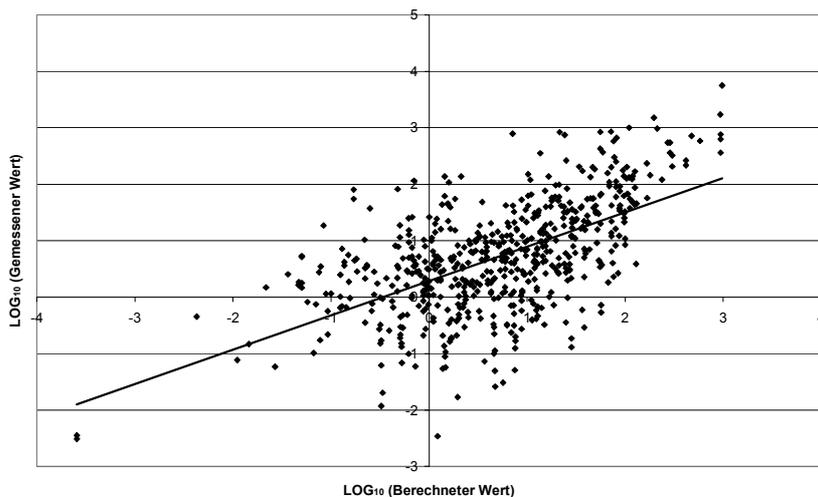


Abbildung II.1.21

Ergebnisse der Berechnung der Gesamtimmissionen (GSM 900 und GSM 1800) für alle Innenräumen mit dem Rechenmodell II im Vergleich mit den gemessenen Raummittelwerten (Einheit: $\mu\text{W}/\text{m}^2$)

In der ersten Phase der epidemiologischen Querschnittsstudie sollen die Expositionen der Studienteilnehmer rechnerisch ermittelt werden. Ziel ist eine mindestens zweistufige Expositionsklassifizierung. Da es bisher keine biologische Grundlage für die Festlegung der Grenze 'höher exponiert' / 'geringer exponiert' gibt, wurden im Rahmen der Abstimmungsgespräche mit den Forschungsnehmern der epidemiologischen Querschnittsstudie zwei Möglichkeiten diskutiert:

- es wird – mehr oder weniger willkürlich – eine Schwelle gesetzt, Wohnungen / Räumen, in denen ein bestimmter Wert für die Leistungsdichte überschritten wird, werden als 'höher exponiert' klassifiziert;
- die Expositionsklassifizierung erfolgt auf der Basis einer statistischen Auswertung der Immissionen; Wohnungen / Räume, die z.B. zu den zehn Prozent mit den höchsten Immissionen gehören, werden als 'höher exponiert' klassifiziert, unabhängig davon, wie hoch der Wert für die Leistungsdichte ist.

Für beide Fälle wurden einige Tests zur Überprüfung der Güte der Expositionsklassifizierung anhand der Näherungsrechnung durchgeführt. Die Ergebnisse sind in den Tabellen II.1.9 bis II.1.12 aufgeführt. Die Basis für diese Auswertung sind die gemessenen und die berechneten Immissionen für alle Räume, für die Ergebnisse von Messungen an mindestens drei Messpunkten möglich waren ($n=610$; aufgelockerte 1- u. 2-Familienhausbebauung: $n_1=182$, aufgelockerte mehrgeschossige Blockbebauung: $n_2=127$, verdichtete mehrgeschossige Bebauung mit Freiflächen: $n_3=116$, geschlossene mehrgeschossige Bebauung: $n_4=185$)

In den Zeilen 3 bis 5 von Tabelle II.1.9 sind die Kappa-Werte für verschiedene willkürlich gesetzte Schwellenwerte aufgeführt. Für die Gesamtheit aller Räume (alle Bebauungstypen) ergeben sich Werte über 0,5, das heißt, dass der Kappa-Test die gute Übereinstimmung zwischen Rechnung und Messung bestätigt. Die Übereinstimmung ist allerdings beim Bebauungstyp 'Mehrgeschossige Blockbebauung' tendenziell schlechter als bei den anderen Bebauungstypen.

Tabelle II.1.9

Kappa-Test, Werte für K bei verschiedenen Schwellenwerten für die Expositionsklassifizierung

Bebauungstyp	aufgelockerte 1- u. 2-Familienhausbebauung	aufgelockerte mehrgeschossige Blockbebauung	verdichtete mehrgeschossige Bebauung mit Freiflächen	geschlossene mehrgeschossige Bebauung	alle Bauungstypen
Schwellenwert					
50 [$\mu\text{W}/\text{m}^2$]	0,57	0,42	0,44	0,54	0,50
75 [$\mu\text{W}/\text{m}^2$]	0,61	0,43	0,60	0,44	0,51
100 [$\mu\text{W}/\text{m}^2$]	0,52	0,41	0,68	0,51	0,52

Als nächstes wurden die Daten hinsichtlich der Fragen ausgewertet, ob Wohnungen, die aufgrund der Rechnungen als 'höher exponiert' eingestuft wurden, auch entsprechend hohe Messwerte aufwiesen (Sensitivität), bzw. ob anhand der Messwerte als 'höher exponiert' einzustufende Wohnungen auch durch die Rechnungen als solche erkannt wurden. Diese Fragestellung ist im Kappa-Test enthalten, eine direkte Überprüfung kann jedoch aufschlussreich sein. Die Ergebnisse dieses Tests zeigt Tabelle II.1.10. Fast 60 Prozent aller höher exponierten Räume werden richtig erkannt. Wenn die Schwelle 'aufgeweicht' wird, das heißt auch Räume mitgezählt werden, bei denen die berechneten Werte $\pm 10 \mu\text{W}/\text{m}^2$ mit den gemessenen übereinstimmen, erhöht sich der Anteil der richtig klassifizierten Räume auf mehr als zwei Drittel.

Tabelle II.1.10

Anteil der richtig erkannten höher exponierten Räume (Klassifikationskriterium 'höher exponiert': Immission > 50 $\mu\text{W}/\text{m}^2$)

A1: durch die Rechnung als 'höher exponiert' eingestufte Räume sind tatsächlich höher exponiert

A2: tatsächlich 'höher exponierte' Räume werden durch die Rechnung richtig eingestuft

Bebauungstyp	aufgelockerte 1- u. 2-Familienhausbebauung	aufgelockerte mehrgeschossige Blockbebauung	verdichtete mehrgeschossige Bebauung mit Freiflächen	geschlossene mehrgeschossige Bebauung	alle Bauungstypen
A1	0,76	0,55	0,43	0,54	0,56
A2	0,53	0,50	0,67	0,68	0,58

Die Ergebnisse der Überprüfung der Güte der Expositionsklassifizierung anhand des statistischen Kriteriums in Tabelle II.1.11 bestätigen die bisherigen Befunde.

Tabelle II.1.11

0,9 Quantil-Werte und Anteil der richtig erkannten höher exponierten Räume (Klassifikationskriterium 'höher exponiert': Immission im 0,9 Quantil)

B: berechneter und gemessener Wert im jeweiligen 0,9 Quantil

Bebauungstyp	aufgelockerte 1- u. 2-Familienhausbebauung	aufgelockerte mehrgeschossige Blockbebauung	verdichtete mehrgeschossige Bebauung mit Freiflächen	geschlossene mehrgeschossige Bebauung	alle Bauungstypen
0,9 Quantil					
Berechnung	56,9	80,4	72,5	90,5	76,3
Messung	97,7	129,2	62,8	62,3	90,2
B	0,63	0,38	0,58	0,58	0,54

Die Expositionsklassifizierung ist für den Bauungstyp 'Mehrgeschossige Blockbebauung' tendenziell schlechter als für die anderen Bauungstypen. Dies dürfte vor allem darauf zurückzuführen sein, dass hier die Bebauung die größte Heterogenität aufweist, weshalb auch die Parameter der Mobilfunkanlagen – insbesondere der Downtilt – größere Variationsbreite aufweisen dürften.

In Tabelle II.1.12 sind für die verschiedenen Bebauungstypen die für die epidemiologische Querschnittsstudie relevanten statistischen Größen zusammengestellt:

Tabelle II.1.12

Sensitivität, Spezifität, Negativer und Positiver Prädiktiver Wert für beide Methoden der Schwellenwertfestlegung höher exponiert / geringer exponiert

Bebauungstyp	aufgelockerte 1- u. 2-Familienhausbebauung	aufgelockerte mehrgeschossige Blockbebauung	verdichtete mehrgeschossige Bebauung mit Freiflächen	geschlossene mehrgeschossige Bebauung	alle Bebauungstypen
Schwellenwert für die Expositions klassifizierung: 50 $\mu\text{W}/\text{m}^2$					
Sensitivität	0,76	0,55	0,43	0,54	0,56
Spezifität	0,97	0,89	0,95	0,96	0,93
Positiver Prädiktiver Wert	0,53	0,50	0,67	0,68	0,58
Negativer Prädiktiver Wert	0,92	0,87	0,90	0,97	0,92
Schwellenwert für die Expositions klassifizierung: 0,9 Quantil					
Sensitivität	0,58	0,64	0,38	0,67	0,54
Spezifität	0,95	0,95	0,93	0,96	0,95
Positiver Prädiktiver Wert	0,58	0,58	0,38	0,67	0,54
Negativer Prädiktiver Wert	0,95	0,95	0,93	0,96	0,95

Wenn das Verfahren allein zur Expositions klassifizierung eingesetzt wird, führt die Missklassifizierung zu einer Verminderung jedes durch eine epidemiologische Studie ermittelten Relativen Risikos. Um das Ausmaß dieses Effekts zu verdeutlichen, wurde das folgende fiktive Beispiel durchgerechnet:

- Es wird davon ausgegangen, dass es wie in der tatsächlich geplanten Querschnittsstudie 30.000 Teilnehmer gibt.
- Es wird angenommen, dass die Prävalenz der untersuchten Befindlichkeitsstörung 10 Prozent beträgt.
- Das tatsächliche relative Risiko, berechnet als so genannte Odds Ratio OR, für die Befindlichkeitsstörungen habe einen Wert von $OR = 2,0$.

Die 2 x 2-Kontingenztafel für dieses Beispiel ist in Tabelle II.1.13 wiedergegeben.

Tabelle II.1.13

Kontingenztafel für das im Text beschriebene fiktive Beispiel

	Exposition		
Befindlichkeitsstörungen	ja	nein	Summen
ja	2.000	1.000	3.000
nein	13.500	13.500	27.000
			30.000

Für das 95 %-Konfidenzintervall ergeben sich aufgrund dieser Zahlen die Grenzen 1,85 und 2,17.

- Wie ein erster Abgleich der Koordinaten der Mobilfunkbasisstationen mit den Koordinaten der Wohnungen gezeigt hat (Berg 2005), lebt rund die Hälfte der Studienteilnehmer in einem Abstand von mehr als 500 m von der nächsten Mobilfunkbasisstation und kann daher mit hoher Sicherheit als 'gering exponiert' eingestuft werden.
- Es wird angenommen, dass Personen mit und ohne Befindlichkeitsstörungen gleichmäßig auf die Bebauungstypen verteilt sind.

Wenn nun anhand der Werte für Sensitivität und Spezifität bzw. der Positiven und Negativen Prädikativen Werte für jeden Bebauungstyp (Schwellenwert für die Expositions klassifizierung: 0,9 Quantil) die jeweilige Anzahl der bezüglich ihrer Exposition falsch klassifizierten Personen berechnet wird, ergibt sich eine modifizierte Kontingenztabelle (s. Tabelle II.1.14).

Tabelle II.1.14

Kontingenztabelle unter Berücksichtigung der im Rahmen dieses Projekts ermittelten Werte für Sensitivität und Spezifität für das im Text beschriebene fiktive Beispiel

	Exposition		
Befindlichkeitsstörungen	ja	nein	Summen
ja	1.131	1.869	3.000
nein	7.813	19.187	27.000
			30.000

Daraus folgt ein relatives Risiko $OR' = 1,47$ (95 %-Konfidenzintervall: 1,24, 1,74). Die Missklassifizierung würde also dazu führen, dass statt des (angenommenen) tatsächlichen relativen Risikos $OR = 2,0$ ein relatives Risiko $OR' = 1,5$ ermittelt würde, das aber immer noch statistisch signifikant erhöht wäre.

Nach den zum Zeitpunkt der Abfassung dieses Berichts bekannten Planungen sollen anhand des in diesem Projekt entwickelten Verfahrens die Expositionen aller Teilnehmer an der epidemiologischen Querschnittsstudie rechnerisch bestimmt werden. Das heißt, dass die Unsicherheiten bei der rechnerischen Expositionsbestimmung, wie zuvor beschrieben, direkt in die Risikobestimmung eingehen. Die für die epidemiologische Querschnittsstudie fast noch wichtigere Anwendung des Verfahrens zur rechnerischen Expositionsbestimmung besteht allerdings in der Möglichkeit, eine in Bezug auf die Exposition stratifizierte Erstausswahl von 1000 Studienteilnehmern für eine Vertiefungserhebung vorzunehmen, für die dann die Expositionen zusätzlich messtechnisch erfasst werden sollen, wodurch die Missklassifizierungsrate deutlich gesenkt und damit die Abweichung des ermittelten vom tatsächlichen Risiko verringert würden.

II.2 Verwertung der Ergebnisse

Das Projekt war als Machbarkeitsstudie zur HF-Expositionserfassung im Rahmen epidemiologischer Studien angelegt. Nachdem die prinzipielle Machbarkeit geklärt war, wurde ein Verfahren zur rechnerischen Abschätzung der elektromagnetischen Immissionen in Wohnungen in der Umgebung von Mobilfunkbasisstationen entwickelt, das eine Expositionsklassifizierung mit einer für epidemiologische Studien hinreichenden Genauigkeit erlaubt (s. II.1.2). Das Verfahren wird nun für die Erstbestimmung der Expositionen in einer epidemiologischen Querschnittsstudie eingesetzt. Diese ist Voraussetzung für eine nach Expositionen stratifizierte Auswahl für eine Vertiefungserhebung. Für die rechnerische Expositionsabschätzung kann die im Rahmen dieses Vorhabens entwickelte Software benutzt werden.

Im Rahmen des Vorhabens wurden zudem Messungen in rund 1100 Innenräumen durchgeführt. Dabei wurden anders als in anderen Projekten nicht die theoretisch maximal möglichen, sondern die tatsächlichen elektromagnetischen Immissionen durch HF-Sendeanlagen in Wohnungen erfasst.

Zwischenergebnisse des Projekts wurden bereits anlässlich der 36. Jahrestagung des Fachverbandes für Strahlenschutz (Köln, 31. August bis 2. September 2004; Neitzke et al. 2004, Voigt et al. 2004) der Fachöffentlichkeit vorgestellt. Es ist geplant, die Ergebnisse in internationalen Fachzeitschriften zu veröffentlichen.

III Erfolgskontrollbericht

III.1 Beitrag zu den förderpolitischen Zielen

Ziel des Deutschen Mobilfunkforschungsprogramms ist es, grundsätzliche biologische Wirkungen und Mechanismen hochfrequenter elektromagnetischer Felder wissenschaftlich belastbar nachzuweisen und unter Einbeziehung internationaler Forschungsergebnisse deren gesundheitliche Relevanz abzuschätzen. Im Rahmen des Deutschen Mobilfunkforschungsprogramms wird u.a. eine epidemiologische Querschnittsstudie durchgeführt, mit der die Hypothese überprüft werden soll, dass die Felder von Mobilfunk-Basisstationen zu gesundheitlichen Beschwerden bei den Anwohnern führen können und dass es dafür besonders sensible Personen gibt. Eine wichtige Frage ist dabei die Machbarkeit einer hinreichend verlässlichen Klassifizierung der von Mobilfunkanlagen verursachten Expositionen. Dazu wurde in diesem Vorhaben in enger Zusammenarbeit mit den Forschungsnehmern der epidemiologischen Querschnittsstudie ein Verfahren entwickelt und auf seine Anwendbarkeit hin getestet.

III.2 Wissenschaftliche Ergebnisse und Erfahrungen

Im Rahmen des Vorhabens wurde eine Strategie zur messtechnischen Erfassung der elektromagnetischen Felder in Wohnungen in der Umgebung von Mobilfunkbasisstationen entwickelt und getestet (s. II.1.1.1 u. II.1.1.2). Mit der Rastermethode und einer isotropen Sonde wurden die Felder in rund 1100 Innenräumen vermessen (s. II.1.1.3). Dabei wurden anders als in anderen Untersuchungen nicht die maximal möglichen, sondern die tatsächlichen Immissionen ermittelt. In mehr als 60 Prozent der vermessenen Räume lag die Summe aller Mobilfunk-Immissionen (GSM 900, GSM 1800 und UMTS) unter $10 \mu\text{W}/\text{m}^2$, in knapp 9 Prozent der Räume über $100 \mu\text{W}/\text{m}^2$ (s. II.1.1.3).

Ausgehend von den Erfahrungen aus den Messungen wurde ein Verfahren zur Berechnung der elektromagnetischen Felder in Wohnungen in der Umgebung von Mobilfunkbasisstationen entwickelt. Das Rechenmodell basiert auf

- einer Berechnung der Abstrahlung von Mobilfunkantennen unter Freiraum-Ausbreitungsbedingungen, in die Angaben zu den Mobilfunkanlagen aus den Standortbescheinigungen der Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post sowie Standardwerte für Sendeleistung und Antennencharakteristiken von GSM 900-, GSM 1800- und UMTS-Anlagen eingehen,
- Transmissionsrechnungen für die Umwandlung der Immissionsorte, für die u.a. Angaben zur Lage und Ausrichtung der Räume sowie Transmissionsfaktoren für Wände und Fenster gebraucht werden, sowie
- empirisch ermittelten Transmissionsfaktoren, durch die Einflüsse der Umgebungsbebauung und der Vegetation auf die Immissionen berücksichtigt werden.

Um die Eignung des Verfahrens zur Expositionsabschätzung in epidemiologischen Studien zu prüfen, wurden die berechneten mit gemessenen Werten verglichen und verschiedene Standardtests durchgeführt (s. II.1.2.2). Der Kappa-Test ergab Werte über 0,5. Für den Korrelationsfaktor wurde ein Wert von 0,61 ermittelt. Der Vergleich der rechnerisch abgeschätzten mit den messtechnisch ermittelten Immissionen zeigt, dass das im Rahmen des Vorhabens entwickelte Verfahren zur Expositionsklassifizierung im Rahmen epidemiologischer Studien geeignet ist.

III.3 Fortschreibung des Verwertungsplans

Das im Rahmen des Projekts entwickelte Verfahren zur rechnerischen Abschätzung der elektromagnetischen Immissionen in der Umgebung von Mobilfunkbasisstationen und die ebenfalls entwickelte Software werden im Rahmen der epidemiologischen Querschnittsstudie zur Klassifizierung der Expositionen der 30.000 Studienteilnehmer eingesetzt. Darüber hinaus können sie auch für andere Fragestellungen genutzt werden. Da das Verfahren entwickelt wurde, um tatsächliche mittlere Immissionen in Wohnungen zu ermitteln, ist es in seiner jetzigen Form nicht für Untersuchungen mit einem immisionsschutzrechtlichen Hintergrund geeignet, da es dort in der Regel um die Bestimmung maximal möglicher Immissionen (worst case) geht.

IV Zusammenfassungen

IV.1 Kurzfassung des Abschlussberichts

Im Rahmen des Deutschen Mobilfunkforschungsprogramms wird u.a. eine epidemiologische Querschnittsstudie durchgeführt, mit der die Hypothese überprüft werden soll, dass die Felder von Mobilfunk-Basisstationen zu gesundheitlichen Beschwerden bei den Anwohnern führen können und dass es dafür besonders sensible Personen gibt. Eine wichtige Frage ist dabei die Machbarkeit einer hinreichend verlässlichen Klassifizierung der von Mobilfunkanlagen verursachten Expositionen. Dazu wurde in diesem Vorhaben in enger Zusammenarbeit mit den Forschungsnehmern der epidemiologischen Querschnittsstudie ein Verfahren entwickelt und auf seine Anwendbarkeit hin getestet.

Grundlage dieses Verfahrens sind Messungen der elektromagnetischen Felder in rund 1100 Innenräumen, an 120 Orten in wohnungsnahen Außenbereichen (Balkon, Terrasse, Garten) und in der Umgebung von rund 60 Mobilfunkanlagen. Es wurden Wohnungen in vier Siedlungstypen (geschlossene Bebauung, verdichtete Bebauung mit Freiflächen, aufgelockerte mehrgeschossige Blockbebauung und aufgelockerte Bebauung mit ein- und zweigeschossigen Häusern) untersucht. Zudem wurden unterschiedliche Gemeinde- und Stadtgrößen (1000 bis 1.000.000 Einwohner), Geländetypen (Flachland, Hügelland) und Senderkonstellationen (GSM 900-, GSM 1800- und UMTS-Anlagen, 1 bis 11 Mobilfunkstandorte im Abstand von weniger als 500 m vom Messort, Mobilfunkstandorte mit 1 bis zu 24 Sektorantennen, Radio- und Fernsehsender in Abständen von 200 m bis mehr als 20 km, Wohnungen mit und ohne DECT-Telefonen, Wohnungen fernab und in der Nähe von Orten mit starker Handy-Nutzung, wie städtische Plätze, Einkaufszentren, Bahnhöfe) berücksichtigt.

Bei der Vermessung der hochfrequenten elektromagnetischen Felder in Wohnungen wurde die Punktrastermethode benutzt (1 m x 1 m- oder 5 Punkt-Raster in 1 m Höhe über dem Boden). Für die Messungen wurden ein Spektrumanalysator und eine Sonde mit isotroper Empfangscharakteristik eingesetzt. Die Sonde ermöglicht Messungen der Gesamtimmissionen unabhängig von der Einfall- und der Polarisationsrichtung. Standardmäßig wurden neben den Mobilfunkimmissionen (GSM900, GSM1800, UMTS) auch Beiträge von UKW-Sendern, Fernsehsendern (UHF, VHF) und DECT-Telefonen erfasst, in Einzelfällen wurden zusätzlich die Beiträge von TETRA- und DAB-Sendern ermittelt. Da die Messungen in einem Zeitraum durchgeführt wurden, in dem sich die UMTS-Netze erst im Aufbau befanden und im Rahmen dieses Projekts der jeweilige Betriebszustand der Anlagen in der Umgebung eines Messorts nicht geklärt werden konnte, können die Ergebnisse der UMTS-Messungen nur schlecht genutzt werden. Dies ist für die Expositionsklassifizierung im Rahmen der epidemiologischen Querschnittsstudie ohne größere Bedeutung, da die Befragung der Teilnehmer der epidemiologischen Querschnittsstudie im Herbst 2004 erfolgte als nur in wenigen Gebieten UMTS-Anlagen wirklich aktiv waren. Von den Forschungsnehmern der Querschnittsstudie wurde deshalb eine Klassifizierung anhand der GSM 900- und GSM 1800-Beiträge zu den Immissionen für ausreichend gehalten.

Anders als in Untersuchungen mit einem immissionsschutzrechtlichen Hintergrund wurden nicht die an einzelnen Messpunkten auftretenden Maximalwerte, sondern die tatsächlichen, räumlich gemittelten Immissionen bestimmt. Die wichtigsten Ergebnisse der Messungen sind:

- Die HF-Immissionen lagen bezogen auf die Leistungsdichte nur in wenigen Fällen über ein Promille der Grenzwerte der 26. BImSchV. In mehr als 60 Prozent der vermessenen Räume lag die Summe aller Mobilfunk-Immissionen (GSM 900, GSM 1800 und UMTS) unter $10 \mu\text{W}/\text{m}^2$, in knapp 9 Prozent der Räume über $100 \mu\text{W}/\text{m}^2$.
- Die Immissionen weisen große Schwankungsbreiten auf.

- Wird der Abstand zwischen dem Standort einer Mobilfunkanlage und einer Wohnungen als Expositionsmaß benutzt, führt dies zu einer hohen Missklassifizierungsrate bei den Expositionen. Der Abstand kann allenfalls genutzt werden, um Wohnungen zu identifizieren, die wahrscheinlich geringer exponiert sind, denn die Messungen zeigen, dass die Mobilfunkimmissionen in Wohnungen, die weiter als 500 m von einer Mobilfunkanlage entfernt sind, in der Regel unter $10 \mu\text{W}/\text{m}^2$ liegen. Solche vergleichsweise niedrigen Werte können aber auch in Wohnungen auftreten, die einen deutlich geringeren Abstand zu einer Mobilfunkanlage aufweisen.
- In den meisten Fällen dominieren die von Mobilfunksendeanlagen verursachten Immissionen, aber auch andere Funksendeanlagen können relevante Beiträge zu den Immissionen liefern. Letzteres gilt insbesondere für DECT-Telefone, wenn sich diese in den untersuchten Räumen bzw. in Nachbarräumen befinden.
- Die Schwankungen der von Mobilfunkanlagen mit zusätzlichen Verkehrskanälen verursachten Immissionen während 24 Stunden liegen in der Regel unter 20 Prozent.

Das auf der Grundlage der Erfahrungen aus den Messungen entwickelte rechnerische Verfahren zur näherungsweise Bestimmung der Mobilfunkimmissionen in Wohnungen beruht auf:

- der Berechnung der Abstrahlung von Mobilfunkantennen unter Freiraumausbreitungsbedingungen anhand von
 - Informationen zum Standort der Mobilfunkanlagen, zur Zahl und Art der Antennen und ihren Hauptstrahlrichtungen, die der Standortbescheinigung der Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post entnommen werden können,
 - Standarddaten für Sendeleistung, Antennencharakteristik und Downtilt, die durch die Auswertung der Daten von mehr als 200 Mobilfunkanlagen gewonnen wurden,
 - Geokoordinaten der Wohnungsadressen;
- empirisch bestimmten Transmissionsfaktoren für die Ausbreitung von Funkwellen mit den verschiedenen Mobilfunkfrequenzen in unterschiedlichen Siedlungstypen;
- der Berechnung der Transmissionsfaktoren für Funkwellen unterschiedlicher Frequenz beim Eindringen in Innenräume, bei denen die Art der Wände, ihre Ausrichtung (insbesondere die der Fenster) sowie die Sichtverhältnisse vor den Fenstern berücksichtigt werden.

Um die Eignung des Verfahrens zur Expositionsabschätzung in epidemiologischen Studien zu prüfen, wurden die für GSM 900- und GSM 1800-Anlagen berechneten mit gemessenen Werten verglichen und verschiedene Standardtests durchgeführt. Nimmt man 50, 75 und $100 \mu\text{W}/\text{m}^2$ als Schwellenwert für höher exponierte Wohnungen, so ergibt der Kappa-Test in allen Fällen Werte über 0,5. Dieser Wert und ein Wert von 0,6 für den Korrelationsfaktor, Werte von 0,56 (bis 0,76 für locker bebaute Gebiete) für die Sensitivität und 0,93 für die Spezifität zeigen, dass das im Rahmen des Vorhabens entwickelte Verfahren für eine erste Klassifizierung der Expositionen durch Mobilfunkbasisstationen im Rahmen epidemiologischer Studien geeignet ist.

IV.2 Summary

Within the scope of the German Mobile Telecommunication Research Programme an epidemiological cross sectional study is carried out to test the hypothesis that the electromagnetic fields of mobile phone base stations cause medical disorders for people living in the vicinity of the antennas and that there are people especially sensitive to these fields. For this study the feasibility of a reliable classification of exposures is an important question. To answer this question a method to estimate exposures by calculation of the immissions has been developed and tested in this project in tight cooperation with the working group performing the cross sectional study.

Measurements of the electromagnetic fields in about 1100 rooms, at 120 outdoor-locations (balcony, patio, garden) and in the vicinity of 60 mobile phone base stations provided the data base for a numerical simulation of the immissions. Flats in four types of residential areas have been investigated: closed high-density areas, high-density areas with courtyards and/or small green areas, low-density areas with houses with more than two floors, low-density areas with houses with up to two floors. Furthermore different magnitudes of communities (1000 to 1,000,000 inhabitants), types of terrain (flat, hilly), and constellations of transmitters (GSM 900-, GSM 1800-, and UMTS-base stations, one to eleven base station sites within a distance of 500 m from the measuring location, base station sites with one to 24 antennas, radio- and TV-broadcasting stations at a distance from 200 m to 20 km, flats with and without cordless telephones, flats far from and near to places with high use of mobile phones like urban places, shopping centers, and railway stations) have been considered.

For the measurements in flats the point grid method has been used (1 m x 1 m or 5-point grid 1 m above floor). A spectrumanalyser and a measuring antenna with an isotropic reception characteristic have been used. The isotropic probe allowed measurements of the total immissions irrespective of the direction and the polarisation of the incoming electromagnetic wave. By default besides the mobile phone immissions (GSM 900, GSM 1800, UMTS) also contributions from broadcasting stations (FM-radio, UHF- and VHF-TV) and DECT-cordless telephone base stations have been collected. In some cases the immissions from civil service and DAB-transmitters have been measured additionally. Since the measurements have been performed at a time period when the UMTS-nets were only under construction and since it was not possible in most cases to determine the operating state of the UMTS-transmitters, the results from the UMTS-measurements are only of little value. Concerning the exposure-classification for the cross sectional study this only of minor importance since the survey of the health status of the participants in this study took place in autumn 2004 when UMTS-transmitters were active only in a few regions. The epidemiologists performing the cross sectional study considered a classification based on the contributions from GSM 900- and GSM 1800-transmitters adequate.

Different from investigations with an immission control background aiming at the determination of maximum possible values in this project effective, spatially averaged immissions have been determined. The most important results are:

- Only in a few cases the high frequency (HF) immissions with reference to the power density reached values above one tenth of a percent of the limiting values in Germany. In more than 60 percent of the rooms the sum of the mobile phone immissions (GSM 900, GSM 1800, UMTS) was below $10 \mu\text{W}/\text{m}^2$, in about 9 percent the measurements resulted in room averages of more than $100 \mu\text{W}/\text{m}^2$.
- The immissions showed large variations.
- If the distance from the transmitter site to a flat is used as a measure for the exposure this results in a high rate of misclassifications. The distance can at best be used to identify flats that are

probably less exposed since the measurements show, that mobile phone immissions normally are below $10 \mu\text{W}/\text{m}^2$ when the distance is greater than 500 m. But values for the power density below $10 \mu\text{W}/\text{m}^2$ may also occur in flats at a much smaller distance to the next base station.

- In most cases the contributions of mobile phone base stations to the total HF-immissions dominate, but occasionally other transmitters may contribute substantially. This applies especially for DECT-mobile phones located in or close to the room where the measurements have been performed.
- The 24 h-variations of the mobile phone immissions caused by additional traffic channels are normally below 20 percent.

The experiences and data from the measurements were used to develop a numerical procedure for an approximate determination of mobile phone immissions in flats. This is based on:

- the calculation of the emissions of mobile phone antennas under the condition of free space propagation by means of
 - informations available from the German Regulatory Authority for Telecommunications and Posts concerning the transmitter site, the number and kind of antennas as well as the directions of their main beams,
 - standard values for transmitter power, antenna-characteristic, and downtilt, derived from an evaluation of the detailed technical data for more than 200 mobile phone base stations,
 - geo-coordinates of the addresses;
- empirically determined transmission factors for the propagation of electromagnetic waves with different mobile phone frequencies in different types of residential areas;
- the calculation of transmission factors for radio waves of different frequencies entering rooms through walls and windows by means of the kind of walls, their spatial orientation (especially for walls with windows), and the visibility conditions in front of windows.

To test whether the procedure for the estimation of exposures is appropriate for epidemiological studies the calculated immissions have been compared with the measured values and several standard tests have been performed. Taking 50, 75, and $100 \mu\text{W}/\text{m}^2$ respectively as the threshold for higher exposed flats the kappa-test yields values above 0.5. The kappa-value of 0.5 and a value for the correlation factor of 0.6, as well as a values of 0.56 value for the sensitivity (up to 0.76 for low-density residential areas) and 0.93 for the specificity show that the procedure developed in this project is applicable for a first classification of exposures due to mobile phone base stations in epidemiological studies.

Literatur

- Anderson C.R. & Rappaport S. 2004: In-building wideband partition loss measurements at 2.5 and 60 GHz. IEEE Trans. Wirel. Commun. 3 (3): 922-928
- Anglesio S., Benedetto A., Bonino A., Colla D., Martire F., Saudino-Fusette S. & d'Amore G. 2001: Population exposure to electromagnetic fields generated by radio base stations: Evaluation of the urban background by using provisional model and instrumental measurements. Radiat. Protect. Dosimetry 97 (4): 355-358
- Antonini G., Orlandi A. & D'elia S. 2003: Shielding effects of reinforced concrete structures to electromagnetic fields due to GSM and UMTS systems. IEEE Trans. Magn. 39 (3): 1582-1585
- Bach Andersen J., Mogensen P.E. & Frolund Pedersen G. 2002: Exposure aspects of W-CDMA - report to the GSM Association, December 2001. COST 281/EBEA Workshop 'Emerging Technologies', Rom, 2.-5. Mai
- BAKOM - Bundesamt für Kommunikation - Schweiz, Coray R., Riederer M. & Neubauer D.I.G. 2002: Immissionen in Salzburg. <http://www.bakom.ch/imperia/md/content/deutsch/funk/emvemvu/br01d.pdf>
- Bay LfU (Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, Hrsg.) 2004: Schirmung elektromagnetischer Wellen im persönlichen Umfeld. Augsburg, , 2004
- Berg G. (Koordinatorin des Forschungsverbundes QUEBEB) 2005: persönliche Mitteilung
- Bergqvist U., Friedrich G., Hamnerius Y., Martens L., Neubauer G., Thuroczy G., Vogel E. & Wiart J. 2001: Mobile telecommunication base stations - exposure to electromagnetic fields. Report of a short term mission within COST 244bis. http://www.cost281.org/activities/Short_term_mission.pdf
- Blettner M., Michaelis J. & Wahrendorf J. 2000: Mobilfunk und Gesundheit. Deutsches Ärzteblatt 97 (13): A847-A850
- Bochtler U., Eidher R. & Wuschek M. 2003: Großräumige Ermittlung von Funkwellen in Baden-Württemberg. Messungen im Auftrag des Landesamtes für Umweltschutz, Baden-Württemberg
- Bornkessel C., Schramm A. & Neikes M. 2002 a: Elektromagnetische Felder in NRW, Untersuchung der Immissionen von Mobilfunk Basisstationen: Messverfahren zur Ermittlung der Immissionen durch Mobilfunk Basisstationen. Gutachten im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen
- Bornkessel C., Neikes M. & Schramm A. 2002 b: Elektromagnetische Felder in NRW, Untersuchung der Immissionen von Mobilfunk Basisstationen. Gutachten im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen
- Bornkessel C., Kunisch J. & Pamp J. 2002 c: Elektromagnetische Felder in NRW, Untersuchung der Immissionen von Mobilfunk Basisstationen: Einfluss von Grenzwertverschärfungen auf die Gesamtmission. Gutachten im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen
- Bornkessel C. & Pamp J. 2002: Entwicklung von Mess- und Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Exposition der Bevölkerung durch elektromagnetische Felder in der Umgebung von Mobilfunk Basisstationen - Zwischenbericht 'Literaturstudie zu bestehenden Mess- und Berechnungsverfahren' erstellt für das Bundesamt für Strahlenschutz. 27. November 2002
- Borsoero M., Crotti G., Anglesio L. & d'Amore G. 2001: Calibration and evaluation of uncertainty in the measurement of environmental electromagnetic fields. Radiat. Protect. Dosimetry 97 (4): 363-368
- Bosisio A.V. & Dechambre M. 2004: Predictions of microwave attenuation through vegetation: A comparison with measurements. Int. J. Remote Sens. 25 (19): 3973-3997
- Bronshtein A. & Mazar R. 2000: Analysis of foliage effects on mobile propagation in dense urban environments. Radio Sci. 35 (4): 941-953
- BUND 2003: Mobilfunk – messen statt munkeln. <http://www.bund-goettingen.de/mobilfunkartikel.html>
- Buscaglia F. & Gianola P. 2001: Measurement techniques for UMTS signals radiated by radio stations. Radiat. Protect. Dosimetry 97 (4): 383-386
- BUWAL - Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft – Schweiz 2002: Nichtionisierende Strahlung - Vergleichende Messungen an Mobilfunk-Basisstationen. Messempfehlungen. Juli 2002
- BUWAL - Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft – Schweiz 2003: Mobilfunk-Basisstationen (UMTS-FDD) - Messempfehlungen. Entwurf vom 17.9.2003
- Chen Z., Bertoni H.L. & Delis A. 2004: Progressive and approximate techniques in ray-tracing-based radio wave propagation prediction models. IEEE Trans. Antenn. Propag. 52 (1): 240-251

- Chew W.C., Jin J.-M., Lu C.-C., Michielssen E. & Song J.M. 1997: Fast solution methods in electromagnetics. *IEEE Trans. Antenn. Propag.* 45 (3): 533-543
- Chukhlantsev A.A., Shutko A.M. & Golovachev S.P. 2003: Attenuation of electromagnetic waves by vegetation canopies. *J. Commun. Technol. Electron.* 48 (11): 1177-1202
- Constantinou C.C. & Ong L.C. 1998: Urban radiowave propagation: A 3-D path-integral wave analysis. *IEEE Trans. Antenn. Propag.* 46 (2): 211-217
- Cooper D. & Saunders P. 2001: Re: 'Cancer incidence near radio and television transmitters in Great Britain. I. Sutton Coldfield transmitter; II. All high power transmitters'. *Am. J. Epidemiol.* 153 (2): 202-205
- COST 281 – European Cooperation in the field of scientific and technical research. Action 281: Potential health implications from mobile communication systems – 2002: Scientific comment on epidemiologic studies on the health impact of mobile communication basestations. <http://www.cost281.org/activities/comment-epi-basestations.pdf>
- Dalke R.A., Holloway C.L., McKenna P., Johansson M. & Ali A.S. 2000: Effects of reinforced concrete structures on RF communications. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* 42 (4): 486-496
- Degli-Esposti V. 2001: A diffuse scattering model for urban propagation prediction. *IEEE Trans. Antenn. Propag.* 49 (7): 1111-1113
- Degli-Esposti V., Lombardi G., Passerini C. & Riva G. 2001: Wide-band measurement and ray-tracing simulation of the 1900-MHz indoor propagation channel: Comparison criteria and results. *IEEE Trans. Antenn. Propag.* 49 (7): 1101-1110
- de Jong Y.L.C. & Herben M.H.A.J. 2004: A tree-scattering model for improved propagation prediction in urban microcells. *IEEE Trans. Vehic. Technol.* 53 (2): 503-513
- de Jong Y.L.C., Koelen M.H.J.L. & Herben M.H.A.J. 2004: A building-transmission model for improved propagation prediction in urban microcells. *IEEE Trans. Vehic. Technol.* 53 (2): 490-502
- Didascalou D., Maurer J. & Wiesbeck W. 2001: Subway tunnel guided electromagnetic wave propagation at mobile communications frequencies. *IEEE Trans. Antenn. Propag.* 49 (11): 1590-1596
- Dolk H., Shaddick G., Walls P., Grundy C., Thakrar B., Kleinschmidt I. & Elliot P. 1997 a: Cancer incidence near radio and television transmitters in Great Britain. Part I. Sutton Coldfield transmitter. *Am. J. Epidemiol.* 145 (1): 1-9
- Dolk H., Elliot P., Shaddick G., Walls P. & Thakrar B. 1997 b: Cancer incidence near radio and television transmitters in Great Britain. Part II. All high-power transmitters. *Am. J. Epidemiol.* 145 (1): 10-17
- EM-Institut 2002 a: Bericht über die Messung elektromagnetischer Felder in der Umgebung von Mobilfunkseanlagen im Stadtgebiet Augsburg. Im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz. http://www.augsburg.de/Seiten/augsburg_d/umwelt/tips/tips_u/img/messbericht.pdf
- EM-Institut 2002 b: Bericht über die Messung elektromagnetischer Felder in der Umgebung von Mobilfunkseanlagen im Stadtgebiet Regensburg. Im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz. <http://www.schicker2000.de/aktivedaten/Mobilfunk-Regensburg.pdf>
- Erricolo D. 2002: Experimental validation of second-order diffraction coefficients for computation of path-loss past buildings. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* 44 (1): 272-273
- FHH - Freie und Hansestadt Hamburg - Umweltbehörde 2001: Bericht zur Auswertung des Gutachtens 'Mobilfunkmissionen in Hamburg'. <http://hamburg.de/stadt/aktuell/behoerden/umwelt-gesundheit/umwelt/energie/elektrosmog/start.html>
- Franceschetti G., Iodice A., Migliaccio M. & Riccio S. 1999: Scattering from natural rough surfaces modeled by fractional Brownian motion two-dimensional processes. *IEEE Trans. Antenn. Propag.* 47 (9): 1405-1415
- Fuschini F., Degli-Esposti V. & Flacisecca G. 2004: A statistical model for over rooftop propagation. *IEEE Trans. Antenn. Propag.* 52 (1): 230-239
- Garn H. 1997: A comparison of electric field-strength standards for the frequency range of 30-1000 MHz. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* 39 (4): 397-403
- Geng N. & Wiesbeck W. 1998: Planungsmethoden für die Mobilkommunikation. Springer Verlag, Berlin
- Hesse T., Schulz W. & Gerhardt D. 2002: Properties of UMTS baseband signals in time domain and frequency domain (UMTS air interface). COST 281/EBEA Workshop 'Emerging Technologies', Rom, 2.-5. Mai
- Hocking B., Gordon I.R., Grain H.L. & Hatfield G.E. 1996: Cancer incidence and mortality and proximity to TV towers. *Med. J. Australia* 165 (11-12): 601-605

- Hutter H.-P., Moshammer H. & Kundi M. 2002: Mobile telephone base stations: Effects on health and wellbeing. Proceedings of Biological Effects of EMFs, 2. Int. Workshop, Rhodos, Oktober 2002: 344-352
- Iskander M.F. & Yun Z. 2002: Propagation prediction models for wireless communication systems. IEEE Trans. Microwave Theory Techn. 50 (3): 662-673
- IZMF– Informationszentrum Mobilfunk – & TÜV Nord 2003a: Sicherheit durch Transparenz – Mobilfunkmessreihe in Nordrhein-Westfalen im Auftrag des Informationszentrums Mobilfunk e.V. http://www.izmf.de/download/Messbrosch_TUEV_neu_200104.pdf
- IZMF– Informationszentrum Mobilfunk – & TÜV Nord 2003b: Sicherheit durch Transparenz – Mobilfunk-Messreihe in Hessen im Auftrag des Informationszentrums Mobilfunk e.V. http://www.izmf.de/download/ME_Broschuere_final_040802.pdf
- Kalau W. & Kamp J. 2002: Integrierte kommunale Mobilfunkplanung, Referenzprojekt Gräfelting. Gutachten für die Gemeinde Gräfelting
- Landron O., Feuerstein M.J. & Rappaport T.S. 1996: A comparison of theoretical and empirical reflection coefficients for typical exterior wall surfaces in a mobile radio environment. IEEE Trans. Antenn. Propag. 44 (3): 341-351
- Leitgeb N. 2003: Are epidemiological studies on possible health impact from base stations useful? COST 281 Workshop 'Mobile Phone Base Stations and Health', Dublin, 15.-16. Mai
- Martens L., Olivier C. & Joseph W. 2002: First experiences with electromagnetic measurements around UMTS base stations. COST 281/EBEA Workshop "Emerging Technologies", Rom, 2.-5. Mai
- Martijn E.F.T. & Herben M.H.A.J. 2003: Characterization of radio wave propagation into buildings at 1800 MHz. IEEE Antenn. Wirel. Propag. Lett. 2 (9): 122-125
- Martinez-González A.M., Fernandez-Pascual A., de los Reyes W., Van Loock W., Gabriel C. & Sanchez-Hernandez D. 2002: Practical procedure for verification of compliance of digital mobile radio base stations to limitations of exposure of the general public to electromagnetic fields. IEE Proc. Microwaves Antenn. Propag. 149 (4): 218-228
- Maskarinec G., Cooper J. & Swygert L. 1994: Investigation of increased incidence in childhood leukaemia near radio towers in Hawaii: Preliminary observations. J. Environ. Pathol. Toxicol. Oncol. 13 (1): 33-37
- Mazar R., Bronshtein A. & Lu I.-T. 1998: Theoretical analysis of UHF propagation in a city street modeled as a random multislit waveguide. IEEE Trans. Antenn. Propag. 46 (6): 864-871
- McKenzie D.R., Yin Y. & Morrell S. 1998: Childhood incidence of acute lymphoblastic leukemia and exposure to broadcast radiation in Sydney - a second look. Aust. N. Z. J. Publ. Health 22 (3 Suppl.): 360-367
- METAS - Bundesamt für Metrologie und Akkreditierung – Schweiz 2002: Vergleichsmessungen an Mobilfunk-Basisstationen. METAS Bericht 2002-256-472
- Michelozzi P., Capon A., Kirchmayer U., Forastiere F., Biggeri A., Barca A. & Perucci C. 2002: Adult and childhood leukemia near a high-power station in Rome, Italy. Am. J. Epidemiol. 155 (12): 1096-1103
- Navarro E.A., Segura J., Portolés M. & Gómez-Perretta de Mateo C. 2003: The microwave syndrome: A preliminary study in Spain. Electromagn. Biol. Med. 22 (2): 161-169
- NCRP - National Council on Radiation Protection and Measurements – 1993: A practical guide to the determination of human exposure to radiofrequency fields. NCRP Report 119
- Neitzke H.P., Osterhoff J., Peklo K. & Voigt H. 2004: Ermittlung der Hochfrequenz-Expositionen durch Mobilfunk-Basisstationen in epidemiologischen Studien. In: Reidenbach H.-D. et al. (Hrsg.) 2004: 36. Jahrestagung des Fachverbandes für Strahlenschutz 'Nichtionisierende Strahlung – Sicherheit und Gesundheit', Köln, 31. August-2. September: 381-389
- Neitzke H.-P. & Voigt H. 2002: Elektromagnetische Immissionen durch Mobilfunkanlagen. ECOLOG-Bericht
- Neitzke H.-P. & Voigt H. 2003: Messung elektromagnetischer Felder von Funksendeanlagen. ECOLOG-Bericht
- Öko-Test 2001: Strahlende Aussichten. Mobilfunk-Sendeanlagen. Öko-Test 4/2001: 32-40
- Olivier C. & Martens L. 2003: Compliance verification versus exposure assessment: Different endpoints for exposure measurements. COST 281 Workshop 'Mobile Phone Base Stations and Health', Dublin, 15.-16. Mai
- Pauli P. & Moldan D. 2003: Reduzierung hochfrequenter Strahlung – Baustoffe und Abschirmmaterialien. 2. Aufl.
- Pauli P. & Moldan D. 2004: Schirmung elektromagnetischer Wellen im persönlichen Umfeld. Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (Hrsg.)

- Pena D., Feick R., Hristov H.D. & Grote W. 2003: Measurement and modeling of propagation losses in brick and concrete walls for the 900-MHz band. *IEEE Trans. Antenn. Propag.* 51 (1): 31-39
- Perini P.L. & Holloway C.L. 1998: Angle and space diversity comparisons in different mobile radio environments. *IEEE Trans. Antenn. Propag.* 46 (6): 764-775
- Piazzini L. & Bertoni H.L. 1998: Effect of terrain on path loss in urban environments for wireless applications. *IEEE Trans. Antenn. Propag.* 46 (8): 1138-1147
- Plotzke O., Weichsel S. & Kretschmer T. 2003: Berechnung der Feldstärken von Mobilfunk-Basisstationen. *Forschungsgemeinschaft Funk, Newsletter* 11 (4): 30-33
- Santini R., Santini P., Danze J.M., Le Ruz P. & Seigne M. 2002: Study of the health of people living in the vicinity of mobile phone base stations: I. Influences of distance and sex. *Pathol. Biol.* 50 (6): 369-373
- Santini R., Santini P., Le Ruz P., Danze J.M. & Seigne M. 2003 a: Survey study of people living in the vicinity of cellular phone base stations. *Electromag. Biol. Med.* 22 (1): 41-49
- Santini R., Santini P., Danze J.M., Le Ruz P. & Seigne M. 2003 b: Symptoms experienced by people in the vicinity of base stations: II. Incidences of age, duration of exposure, location of subjects in relation to the antennas and the electromagnetic factors. *Pathol. Biol.* 51 (7): 412-415
- Sarabandi K. & Koh I.-S. 2001: A complete physics-based channel parameter simulation for wave propagation in a forest environment. *IEEE Trans. Antenn. Propag.* 49 (2): 260-271
- Schüz J. 2003: Mobile phone base stations and epidemiology. COST 281 Workshop 'Mobile Phone Base Stations and Health', Dublin, 15.-16. Mai
- Schüz J. & Mann S. 2000: A discussion of potential exposure metrics for use in epidemiological studies on human exposure to radiowaves from mobile phone base stations. *J. Expos. Anal. Environ. Epidemiol.* 10 (6): 600-605
- Sofos T. & Constantinou P. 2004: Propagation model for vegetation effects in terrestrial and satellite mobile systems. *IEEE Trans. Antenn. Propag.* 52 (7): 1917-1920
- TeS - Teleinformatica e Sistemi – 2000: Quick_Plan: Assessment of the electromagnetic pollution. Firmenschrift und Softwarepaket
- Torricco S.A., Bertoni H.L. & Lang R.H. 1998: Modeling tree effects on path loss in a residential environment. *IEEE Trans. Antenn. Propag.* 46 (6): 872-880
- Toscano A., Bilotti F. & Vegni L. 2003: Fast ray-tracing technique for electromagnetic field prediction in mobile communications. *IEEE Trans. Magn.* 39 (3): 1238-1241
- UB/DKFZ/UM - AG Epidemiologie und Medizinische Statistik der Universität Bielefeld, AG Umweltepidemiologie des Deutschen Krebsforschungszentrums in Heidelberg und Institut für Medizinische Statistik und Dokumentation der Universität Mainz – 1999: Untersuchung zur Machbarkeit von epidemiologischen Studien zur Nutzung von Mobiltelefonen, der nicht-beruflichen Exposition durch Mobilfunk-Basisstationen und dem Auftreten von Tumoren im Kopfbereich und anderen Gesundheitsschäden. Abschlussbericht der Feasibility-Studie
- Voigt H., Neitzke H.-P., Osterhoff J. & Peklo K. 2004: Hochfrequenz-Expositionen in Wohnungen in der Umgebung von Mobilfunk-Basisstationen. in: Reidenbach H.-D. et al. (Hrsg.) 2004: 36. Jahrestagung des Fachverbandes für Strahlenschutz 'Nichtionisierende Strahlung – Sicherheit und Gesundheit', Köln 31. August-2. September: 529-534
- Wagner R.L., Song J. & Chew W.C. 1997: Monte Carlo simulation of electromagnetic scattering from two-dimensional random rough surfaces. *IEEE Trans. Antenn. Propag.* 45 (2): 235-245
- Wang Y., Chaudhuri S.K. & Safavi-Naeini S. 2002: An FDTD/ray-tracing analysis method for wave penetration through inhomogeneous walls. *IEEE Trans. Antenn. Propag.* 50 (11): 1598-1604
- West J.C. & Sturm J.M. 1999: On iterative approaches for electromagnetic rough-surface scattering problems. *IEEE Trans. Antenn. Propag.* 47 (8): 1281-1288
- Wuschek M. 2000: Messtechnische Ermittlung hochfrequenter elektromagnetischer Felder an repräsentativen Orten in Schleswig-Holstein. Staatliches Umweltamt Kiel. <http://www.umwelt.schleswig-holstein.de/servlet/is/10566/hochfrequenzgutachten.PDF?command=downloadContent&filename=hochfrequenzgutachten.PDF>
- Wuschek M. 2005: Immissionsmessungen bei UMTS Mobilfunkbasisstationen. in: Landesamt f. Umwelt- Wasserwirtschaft u. Gewerbeaufsicht Niedersachsen (Hrsg.) 2005: EMF-Workshop der Bundes- und Ländermessstellen 'Arbeits- und Immissionsschutz bei elektromagnetischen Feldern im Bereich Radar – UMTS-Mobilfunk', Braunschweig, 21.-22. Februar
- Wuschek M. & Kausche J. 2003: Dosimetric emission measurements as an indicator of exposure of people in the vicinity of mobile phone base stations. COST 281 Workshop 'Mobile Phone Base Stations and Health', Dublin, 15.-16. Mai

Xu P., Lam K.W., Tsang L. & Lai K.L. 2004: Statistical distributions of fields in urban environment based on Monte Carlo simulations of Maxwell equations. *IEEE Antenn. Wirel. Propag. Lett.* 3 (3): 34-37

Yang C.-F., Wu B.C. & Ko C.J. 1998: A ray-tracing method for modeling indoor wave propagation and penetration. *IEEE Trans. Antenn. Propag.* 46 (6): 907-919

Zhang W. & Moayeri N. 2003: Closed-form expressions for the prediction of microcellular mobile radio propagation in urban environments. *IEEE Trans. Antenn. Propag.* 51 (5): 952-956