Abschlussbericht

BMBF Vorhaben

Minimierung der Immission künftiger Funkdienste

miniWatt II

koordiniert und vorgelegt von

Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Dr.-Ing. E. h. Werner Wiesbeck
Institut für Höchstfrequenztechnik und Elektronik
Universität Karlsruhe (TH)

für das

Bundesministerium für Bildung und Forschung

Inhalt

1 Kurzfassung 5

1.1 Ausgangsposition und Stand der Technik 5
1.2 Organisation des Vorhabens 5
1.3 Wesentliche Ergebnisse 7
1.4 Auswirkungen auf Forschung und Entwicklung 8
1.5 Forschungsempfehlungen 9

2 Antworten auf aktuelle Fragestellungen 11

2.1 Feinmaschigere Zellstrukturen 11
2.2 MIMO-Antennensysteme 11
2.3 Inhouse-Verteilung 12
2.4 Hybride UMTS/DVB-H-Netze 12
2.5 Minimierung der spezifischen Absorptionsrate mobiler Endgeräte 12
2.6 Pulshaltigkeit 13
2.7 Analyse der Gesamtimmission bedeutender Funkdienste 13
2.8 Beeinflussung von implantierten Herzschrittmachern 15

3 Zusammenfassender Bericht 17

3.1 Einfluss zukünftiger Netzstrukturen auf die Immission 17
3.2 Minimierung der spezifischen Absorptionsrate (SAR) mobiler Endgeräte 24
3.3 Analyse der Pulshaltigkeit von Funksignalen und Methoden zu deren Abschwächung 31
3.4 Analyse der Gesamtimmission bedeutender Funkdienste 37
3.5 Methoden zur Bilanzierung und Wertung 42

1 Kurzfassung

1.1 Ausgangsposition und Stand der Technik

Zur Realisierung einer flexiblen mobilen Kommunikation wird erfolgreich die Modulation elektromagnetischer Wellen genutzt. Dabei bestimmen die Parameter:

- geforderte Datenrate und Übertragungsqualität
- einzusetzende Modulationsverfahren
- verfügbare Bandbreite
- erforderliches Signal zu Rausch- und Interferenzverhältnis am Empfänger
- Eigenschaften des Funkkanals inkl. Einfluss des Benutzers

entscheidend die aufzuwendende Sendeleistung und damit auch die Exposition durch elektromagnetische Felder. Während einige Parameter der Regulierung unterliegen (z.B. verwendete Frequenzbereiche), andere Parameter durch die Standardisierung vorgegeben sind (z.B. Modulationsverfahren) kann beispielsweise durch eine geeignete Funknetzplanung und einer effizienten Abstrahlung durch das Endgerät die Exposition günstig beeinflusst werden. Im Vorhaben "Minimierung der Immission künftiger Funkdienste", über das hier berichtet wird und das auch unter dem Namen *miniWatt II* bekannt wurde, sind verschiedene Ansätze, die zu einer Reduzierung der Immission führen, näher untersucht worden.

1.2 Organisation des Vorhabens

Das vom BMBF unter dem Förderkennzeichen 01 BU 550 geförderte Vorhaben ist in fünf größere Arbeitspakete unterteilt. Für eine effiziente Bearbeitung dieser Arbeitspakete wurden geeignete Teil-Arbeitspakete eingerichtet. Die nachfolgende Übersicht zeigt die vielfältigen Forschungsgebiete des Vorhabens auf. Die Inhalte des entfallenen AP 1.3 wurden teilweise in den AP 1.4.1, 1.4.2 und 1.6 bearbeitet.

AP 1 Einfluss zukünftiger Netzstrukturen auf die Immission

AP 1.1 Zellteilung und Exposition
bearbeitet durch: Prof. Wiesbeck, Universität Karlsruhe (TH)

AP 1.2 Einsatz von intelligenten Antennensystemen
bearbeitet durch: Prof. Wiesbeck, Universität Karlsruhe (TH)

AP 1.4.1 Auswirkungen einer Inhouse-Verteilung auf die Exposition
bearbeitet durch: Prof. Herfet, Universität des Saarlandes, Saarbrücken

AP 1.4.2 Optimierung der Inhouse-Vernetzung durch modifizierte Übertragungsverfahren – Verbesserungspotential im Rahmen des Standards IEEE 802.11
bearbeitet durch: Prof. Kays, Universität Dortmund

AP 1.5 Optimierung der Inhouse-Vernetzung durch modifizierte Übertragungsverfahren – Verbesserungspotenzial durch Verwendung alternativer Frequenzbereiche
bearbeitet durch: Prof. Kays, Universität Dortmund

AP 1.6 Referenzszenarien für die Einführung hybrider DVB-H/UMTS-Netze: Auswirkungen auf die Exposition durch Mobilfunknetze an Hot-Spots
bearbeitet durch: Prof. Kürner, Universität Braunschweig

AP 2 Minimierung der spezifischen Absorptionsraten (SAR) mobiler Endgeräte

AP 2.1 Minimierung der SAR von Mobiltelefonen bei Kopfbetrieb
bearbeitet durch: Prof. Wolff, IMST GmbH, Kamp-Lintfort

AP 2.2 Minimierung der SAR von Mobiltelefonen mit MIMO-Antennentechnologie
bearbeitet durch: Prof. Wiesbeck, Universität Karlsruhe (TH)

AP 2.3 Minimierung der SAR körpernah betriebener Endgeräte
bearbeitet durch: Prof. Hansen, Universität Wuppertal
(gefördert im Rahmen des Deutschen Mobilfunkforschungsprogramms)

AP 2.4 Gegenüberstellung der Immissionen durch Mobiltelefone und Basisstationen
bearbeitet durch: Prof. Wolff, IMST GmbH, Kamp-Lintfort

AP 3 Analyse der Pulshaltigkeit von Funksignalen und Methoden zu deren Abschwächung

AP 3.1 Analyse der Pulshaltigkeit von breitbandigen Verfahren
bearbeitet durch: Prof. Jondral, Universität Karlsruhe (TH)

AP 3.1.3 Analyse der Pulshaltigkeit von Basisstations- und Access Point Signalen
bearbeitet durch: Prof. Herfet, Universität des Saarlandes, Saarbrücken

AP 3.2 Analyse der Pulshaltigkeit von schmalbandigen Verfahren
bearbeitet durch: Prof. Weigel, Universität Erlangen-Nürnberg

AP 4 Analyse der Gesamtimmission bedeutender Funkdienste

AP 4.1 Betrachtung von Rundfunknetzen
bearbeitet durch: Herr Götz, LS telcom AG, Lichtenau

AP 4.2 Betrachtung von Mobilfunknetzen
bearbeitet durch: Dr. Bökelmann, Vodafonde D2 GmbH
Dr. Hombach, T-Mobile Deutschland GmbH

AP 4.3 Methoden zur vereinfachten Analyse
bearbeitet durch: Prof. Wiesbeck, Universität Karlsruhe (TH)

AP 4.4 Messtechnische Verifikation
bearbeitet durch: Prof. Wolff, IMST GmbH, Kamp-Lintfort

AP 5 Methoden zur Bilanzierung und Wertung multipler Felder

AP 5.1 Entwicklung von vereinfachten Körpermodellen und Bewertung von Expositionssituationen mit und ohne Implantate
bearbeitet durch: Prof. Dössel, Universität Karlsruhe (TH)

AP 5.2 Entwicklung neuer Methoden zur Expositionsbewertung
bearbeitet durch: Prof. Hansen, Universität Wuppertal
(gefördert im Rahmen des Deutschen Mobilfunkforschungsprogramms)

1.3 Wesentliche Ergebnisse

Das Vorhaben hat gezeigt, dass durch geeignete Veränderungen der Netzstruktur sowie durch den Einsatz der Mehrantennentechnologie an Mobilfunkbasisstationen eine deutliche Senkung der Exposition möglich ist. Insbesondere bei den im häuslichen Bereich eingesetzten WLAN Produkten ließe sich allein durch eine intelligente Regelung der Sendeleistung eine Reduzierung der Exposition um mehrere Größenordnungen erreichen.

Die betrachteten Möglichkeiten zur Minimierung der Exposition durch körpernahe oder im Körperkontakt betriebene Endgeräte zeigen ein Reduktionspotenzial von etwa einem Faktor zwei bei geringfügiger Modifikation eines Endgerätes. Bei Einsatz von Mehrantennensystemen bzw. bei freier Platzwahl von Antennen an räumlich ausgedehnten Endgeräten wie Laptops mit GPRS-, UMTS oder WLAN-Einsteckkarten lassen sich Reduktionen der Exposition im Bereich einer Größenordnung erreichen. Da im Falle der Einsteckkarten eine konstante Sendeleistung angenommen wurde kann durch eine funktechnisch günstiger platzierte Antenne mit einer adaptiven

Sendeleistungsregelung eine darüber hinaus gehende Expositionsreduktion erreicht werden.

Für die Pulshaltigkeit verschiedener Systeme wurden zwei Ansätze zur Berechnung betrachtet. Das Auflösen periodischer Strukturen wird als eine wichtige Möglichkeit angegeben die Pulshaltigkeit zu reduzieren. Die betrachteten breitbandigen Systeme (UMTS, DVB-T, WLAN) weisen prinzipiell eine niedrigere Pulshaltigkeit auf als die auf dem Zeitschlitzverfahren (TDMA) beruhenden schmalbandigen Systeme (DECT, EDGE, GSM, GPRS, TETRA). Die erzielten Ergebnisse bilden die Grundlage für weiter gehende Untersuchungen.

Die Gesamtimmission der bedeutenden Funkdienste bleibt auch in der Summe weit unter den Grenzwerten. Die Exposition durch Mobilfunknetze und FM-Radio ist im betrachteten städtischen Gebiet im Mittel deutlich höher als im betrachteten ländlichen Gebiet. Die durch die Lang- und Mittelwellensender hervorgerufene Grenzwertausschöpfung ist aber in beiden Gebieten nahezu gleich. Die durchgeführte messtechnische Bestimmung der Exposition in den betrachteten Gebieten zeigt eine weitgehende Bestätigung der unabhängig von den Messungen durchgeführten Berechnungsergebnisse. Für größere Gebiete, in denen eine Messung der Exposition nur schwierig realisierbar ist, kann daher auf geeignete Berechnungsverfahren zurückgegriffen werden.

1.4 Auswirkungen auf Forschung und Entwicklung

Die Ergebnisse des Vorhabens werden in einer detaillierten englischsprachigen Version im Internet zum Download bereitgestellt, so dass interessierte Unternehmen und Einzelpersonen sich umfangreich informieren können. Insbesondere die Ergebnisse, die im Zusammenhang mit der Minimierung der SAR von Mobiltelefonen im Kopfbetrieb erarbeitet wurden sind frühzeitig kommuniziert worden und werden bereits in Produkten erfolgreich implementiert. Dadurch wurde eine zeitnahe Umsetzung von Forschungsergebnissen im sich schnell ändernden Produkt des mobilen Endgerätes realisiert. Auf der Ebene der Netzstrukturen ist zu erwarten, dass die Forschungsergebnisse langsamer umgesetzt werden. Dies ist u.a. auf die hohen Kosten bei einer Änderung der Infrastruktur zurückzuführen. Im Zuge einer Steigerung

der spektralen Effizienz werden die Ergebnisse des Vorhabens aber im Laufe der Zeit zumindest teilweise umgesetzt werden.

1.5 Forschungsempfehlungen

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen viel versprechende Ansätze eine deutliche Senkung der Exposition zu erreichen. Im Bereich der Netzstruktur und Endgeräte wird für die schon seit längerer Zeit betriebenen Rundfunk- und Mobilfunknetze nach Abschluss des Vorhabens derzeit kein weiter gehender Forschungsbedarf gesehen. Zunächst sollten sich die weiteren Forschungsaktivitäten auf die im persönlichen Bereich immens zunehmenden Funkanwendungen konzentrieren. Insbesondere die durch neuartige Femtozellen aufkommende zusätzliche Exposition im häuslichen Bereich, sowie deren Beeinflussbarkeit sollten baldmöglichst und vorrangig betrachtet werden.

2 Antworten auf aktuelle Fragestellungen

Elektromagnetische Wellen sind das Mittel der ersten Wahl zur drahtlosen Übertragung von Informationen. Die dadurch entstehenden Feldstärken bzw. Leistungsdichten führen zu einer Exposition durch elektromagnetische Felder. Im Rahmen des Vorhabens *miniWatt II* standen zwei zentrale Fragestellungen im Vordergrund:

- Wie groß ist die Exposition derzeit bzw. in naher Zukunft?
- Wie lässt sich die Exposition reduzieren?

Beide Fragestellungen können unabhängig voneinander beantwortet werden. Antworten auf diese Punkte sind im Folgenden in knapper Weise zusammengestellt.

2.1 Feinmaschigere Zellstrukturen

Solange makrozellulare Strukturen betrachtet werden ist die Exposition in einem Mobilfunknetz ohne Nutzer nahezu unabhängig von der Zellgröße. Mit zunehmender Nutzerdichte zeigt sich ein eindeutiger Vorteil zugunsten kleinerer Zellstrukturen. Insbesondere die Exposition durch Endgeräte (Handys) kann in kleineren Zellstrukturen deutlich kleinere Werte annehmen als in Zellstrukturen mit größeren Zellen. Bei nicht makrozellularen Netzen, also in Fällen in denen die Basisstationsantennen unter dem mittleren Dachniveau angebracht sind, ist die Exposition stark abhängig vom jeweils betrachteten Szenario. Aber auch hier gilt, eine sinnvolle Positionierung vorausgesetzt, dass eine größere Anzahl von Basisstationen zu einer geringeren mittleren Exposition führen wird.

2.2 MIMO-Antennensysteme

Mehrantennen (MIMO: Multiple Input – Multiple Output)-Systeme weisen eine höhere Effizienz als konventionelle Systeme auf, die nur jeweils eine Sende- und eine Empfangsantenne (SISO: Single Input – Single Output) besitzen. In der Fläche auftretende Leistungsdichten von MIMO-Systemen mit unterschiedlichen Algorithmen

der Leistungsaufteilung auf die einzelnen Antennen wurden mit klassischen SISO-Systemen verglichen. Für ein typisches städtisches Szenario wurde so eine Expositionsreduktion von 13 dB (Faktor 20) im Falle des MIMO-Systems ermittelt.

2.3 Inhouse-Verteilung

Bei der Realisierung einer Inhouse-Verteilung von Rundfunkdiensten mittels WLAN kann die Exposition durch die Implementierung verschiedener Techniken deutlich reduziert werden. Durch Nutzung einer Sendeleistungsregelung, geeignete Fehlerkodierung, Codeumwandlung, MIMO-Systeme und Multiplexing-Verfahren kann die Exposition je nach Szenario um mehrere Größenordnungen gesenkt werden.

Aufgrund einer geringeren Funkfelddämpfung bei niedrigeren Frequenzen kann durch die Verwendung von Frequenzen aus dem UHF-Bereich die Exposition gegenüber klassischen WLAN-Systemen weiter gesenkt werden.

2.4 Hybride UMTS/DVB-H-Netze

Durch die Abstrahlung von populären Informationen über ein dem Rundfunk ähnliches DVB-H-Netz lässt sich die Exposition im Vergleich zur individuellen Abstrahlung über ein UMTS-Netz reduzieren. Um eine deutliche Reduktion zu erreichen, ist allerdings eine sehr große Nachfrage nach hochratigen Informationen erforderlich. Für eine geringe Nachfrage nach entsprechenden Diensten würde aber die Abstrahlung über DVB-H-Sender zu einer höheren mittleren Exposition führen als in einem reinen UMTS-Netz. Hybride Netze sind beispielsweise vorteilhaft für die Versorgung von Fußballstadien, da hier eine große Nachfrage nach einer begrenzten Anzahl von hochratigen Beiträgen bestehen wird. In den meisten anderen Fällen ist entweder die Nachfrage nach einem bestimmten Dienst zu klein oder die gewünschte Informationsvielfalt zu groß um zu einer relevanten Expositionssenkung zu führen.

2.5 Minimierung der spezifischen Absorptionsrate mobiler Endgeräte

Die spezifische Absorptionsrate (SAR) von aktuellen Mobiltelefonen im Kopfbetrieb (übliche Benutzerhaltung) stellt die stärkste Quelle für die individuelle Exposition dar.

Sie liegt im Mittel über eine Auswahl aktueller Geräte allerdings deutlich unterhalb der zulässigen Grenzwerte.

Eine weitere Minimierung ist bei einigen Geräten durch konstruktive Maßnahmen möglich ohne die Funkqualität signifikant einzuschränken. Bei zukünftigen Systemen zeigen Simulationen mit generischen Modellen ein sehr deutliches Reduktionspotential der individuellen Exposition durch die Verwendung von Mehrantennensystemen auf. Bei körpernah betriebenen Geräten (wie Laptops mit WLAN-Karte) wurde ebenfalls ein erhebliches Minimierungspotential durch konstruktive Änderungen ausgemacht.

Die Rolle der Basisstationen wird in Bezug auf die individuelle Exposition oft überbewertet. Auch für nicht-telefonierende Dritte ist in vielen Fällen die Exposition durch die mit Handys telefonierenden Nachbarn, beispielsweise in Zugabteilen, größer als durch die zugehörigen Basisstationen.

2.6 Pulshaltigkeit

Es kann festgehalten werden, dass die breitbandigen Systeme UMTS, DVB-T und WLAN (OFDM-basiert) eine deutlich geringere Pulshaltigkeit im Vergleich zu den Zeitschlitz basierten (TDMA) Schmalbandsystemen wie GSM, DECT und TETRA aufweisen. Bei WLANs führt die Priorisierung von Datenströmen, insbesondere von Multimedia-Daten hohen Datenaufkommens (wie etwa beim digitalen Fernsehen) zu einem dem Zeitmultiplex der TDMA-Systeme nicht unähnlichen Auftreten von Datenbursts innerhalb der Rahmenstruktur, welches die Pulshaltigkeit erhöht. Sie liegt allerdings deutlich unter der Pulshaltigkeit der betrachteten Schmalbandsysteme.

Eine Reduzierung der Pulshaltigkeit von TDMA-Systemen ist durch ein Aufbrechen der Periodizität der Rahmenbelegung, beispielsweise durch eine Randomisierung der Zeitschlitzzuweisung, erreichbar.

2.7 Analyse der Gesamtimmission bedeutender Funkdienste

Die Grenzwerte werden in den untersuchten Referenzgebieten Mannheim-Ludwigshafen als städtisches Gebiet und Odenwald als ländliches Gebiet weit unterschritten.

Die Grenzwerte, die aufgrund thermischer Wirkungen u.a. des Mobilfunks vorgegeben sind, werden im betrachteten städtischen Gebiet durchschnittlich um 0,015% ausgeschöpft. Im ländlichen Gebiet ist der durchschnittliche Ausschöpfungsgrad noch geringer. Zur Berechnung des Ausschöpfungsgrades werden hierbei die Quadrate der effektiven Feldstärken betrachtet.

Bezüglich induzierter Wirkungen durch Lang-, Mittel- und Kurzwellensender beträgt die Grenzwertausschöpfung in beiden Gebieten im Durchschnitt etwa 2 %. Im Gegensatz zur Berechnung des Ausschöpfungsgrades für thermische Wirkungen werden hier direkt die effektiven Feldstärken berücksichtigt.

Die einzelnen Dienste schöpfen die Grenzwerte recht unterschiedlich aus. Die Lang-, Mittel- und Kurzwellensender führen auf eine weit höhere Grenzwertausschöpfung als die im höheren Frequenzbereich liegenden (DAB, DVB-T, FM, TV analog). Die durchschnittliche Grenzwertausschöpfung des Mobilfunks ist in den betrachteten Gebieten etwas höher als die des FM Rundfunks (UKW-Radio).

Bezüglich einem Vergleich der Immissionen von analogen zu digitalen Diensten ergab eine Vergleichsbetrachtung im Raum München, dass sich der Ausschöpfungsgrad von 0,000183% für das mittlerweile abgeschaltete analoge TV auf 0,00033% für DVB-T etwas erhöht hat (ca. Faktor 1,8). Gleichzeitig erfolgte aber ein Anstieg der Anzahl empfangbarer Programme von 9 (analog) auf 26 (digital).

Die ermittelten Vergleichswerte der Berechnungen mit stark vereinfachten Modellen und den realistischeren empirischen Beugungsmodellen ergaben, dass aufgrund des fehlenden Detailgrades durchaus lokale Unterschiede vorhanden sind. Für eine Abschätzung der mittleren Exposition sind vereinfachte Modelle bei geeigneter Parameterwahl aber durchaus einsetzbar.

Die durchgeführten messtechnischen Bestimmungen der Exposition haben gezeigt, dass bei Berücksichtigung der typischen lokalen Expositionsvariation, computerbasierte Funkprognosetools in der Lage sind, den Trend sowie die ungefähre Größenordnung der Exposition richtig vorherzusagen. Das Funkprognosetool muss allerdings speziell auf die Aufgabenstellung der Expositionsprognose angepasst sein. Bei den Berechnungen, die auf Koordinierungs-Datenbanken basieren und somit ein „worst-case“-Szenario abbilden (alle Sender mit maximal erlaubten Sendeleistungen in

Betrieb), ergaben sich erwartungsgemäß höhere Berechnungswerte als real vorhanden. Dagegen erwiesen sich die Berechnungen, die mittels aktueller realer Senderdatenbanken erstellt werden konnten (insbesondere DVB-T) als deutlich genauer. Hier liegen die Berechnungen nahe an den gemessenen Werten.

2.8 Beeinflussung von implantierten Herzschrittmachern

Die Evaluierung der Gefährdung von Menschen mit implantierten Herzschrittmachersystemen basiert auf dem Normentwurf DIN VDE 0848-3-1 aus dem Jahr 2002. Darin werden Werte für elektrische und magnetische Felder sowie Störspannungen definiert, die „eingeschränkt“ und „angemessen“ störfeste Geräte ohne Beeinträchtigung ihrer Funktion und Gefährdung für den Träger tolerieren müssen. Die Ergebnisse der durchgeführten Computersimulationen haben, an den üblicherweise für die Platzierung der Schrittmachersysteme verwendeten Orten, keine Überschreitungen der vom VDE vorgeschlagenen Feldstärken durch ein sendendes Handy gezeigt.

3 Zusammenfassender Bericht

In den folgenden Abschnitten sind die wesentlichen Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete nach Themengebieten geordnet.

3.1 Einfluss zukünftiger Netzstrukturen auf die Immission

koordiniert von Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Dr.-Ing. E.h. Werner Wiesbeck,
Universität Karlsruhe (TH)

3.1.1 Allgemeines

Die Exposition gegenüber elektromagnetischen Feldern durch Mobilfunknetze ist entscheidend von der Netzstruktur abhängig. Es wurden daher verschiedene technische Ansätze betrachtet, welche durch eine Veränderung der Netzstruktur bzw. wichtiger Netzparameter einen Einfluss auf die Exposition haben. An den Arbeiten waren Gruppen der Universitäten Braunschweig, Dortmund, Karlsruhe sowie der Universität des Saarlandes beteiligt.

Nach heutigen wissenschaftlichen Erkenntnissen wird zur Bewertung der Exposition im Frequenzbereich des Mobilfunks die spezifische Absorptionsrate (SAR) als Basisgrenzwert betrachtet [ICNIRP]. Für eine sichere Bewertung der Exposition bezüglich etwaiger Grenzwerte ist daher eine Bestimmung der SAR erforderlich. Da es in diesem Arbeitspaket vorrangig um einen Vergleich der Expositionssituation geht ist eine explizite Bestimmung des SAR-Wertes nicht erforderlich. Daher wird hier die Exposition meist als Leistungsdichte bestimmt. Im Fall von Immissionen mit verschiedenen Frequenzen, wie beispielsweise bei der Betrachtung hybrider Netzstrukturen, wurden die Immissionen bei verschiedenen Frequenzen auf die Referenzwerte bezogen und so eine Grenzwertausschöpfung ermittelt. Referenzwerte sind hierbei die aus den Basisgrenzwerten abgeleiteten und leicht messbaren Größen wie beispielsweise die elektrische Feldstärke [ICNIRP].

3.1.2 Feinmaschigere Netzstrukturen

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass im Falle einer makrozellularen Netzstruktur, bei der sich die Antennenhöhen der Basisstationen über der mittleren Gebäudehöhe befinden eine Verkleinerung der Zellgröße zu keiner Erhöhung der Exposition durch die Basisstationen führt. Im Fall eines Netzes ohne Last (keine Nutzer) bleiben wichtige statistische Kenngrößen wie der Mittelwert oder das 95%-Perzentil der Leistungsdichte bei einer Veränderung der Zellgröße näherungsweise konstant. Da in kleineren Zellstrukturen die Übertragungsdämpfung kleiner ist, sind zwar kleinere Sendeleistungen auf der Seite der Basisstation erforderlich, die kleinere Übertragungsdämpfung führt aber auch dazu, dass die Exposition bei einer kleineren Sendeleistung höher ist als bei einer größeren Übertragungsdämpfung. Bei der Berücksichtigung einer durch aktive Nutzer entstehenden Last zeigt sich aber, dass feinmaschigere Netzstrukturen eine deutlich geringere Exposition aufweisen als Netzstrukturen, welche größere Zellen enthalten. Insbesondere die Nutzer, welche sich in sehr geringem Abstand zum Handy befinden profitieren deutlich von kleineren Zellstrukturen (siehe Bild 1). Bei nicht ausgeschöpftem Regelbereich der Sendeleistung des Handys kann eine Reduktion der Zellgröße zu einer deutlichen Senkung der erforderlichen Sendeleistung und damit der durch das Handy verursachten spezifischen Absorptionsrate (SAR) führen.

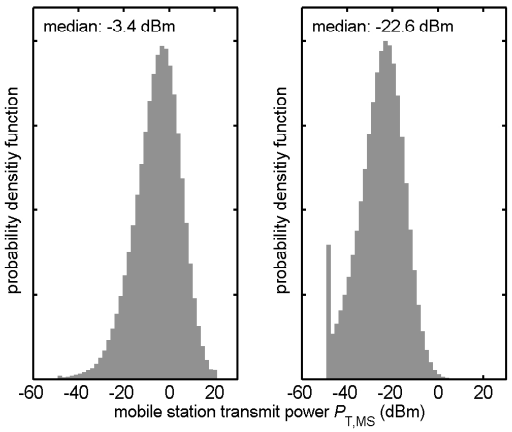

Bild 1: Wahrscheinlichkeitsdichte der Sendeleistungen von UMTS-Handys in ländlichem Gebiet. Links: Zellradius 6,3 km, rechts: Zellradius 1 km. Die kleinere Zellstruktur erfordert etwa um einen Faktor 100 kleinere Sendeleistungen und damit ebenfalls eine entsprechend geringere Exposition.

3.1.3 MIMO-Antennensysteme

Wie im Vorhaben *miniWatt I* bereits gezeigt wurde, erlauben Mehrantennensysteme (MIMO – Multiple Input Multiple Output) bei gleicher Übertragungskapazität eine deutliche Senkung der Sendeleistung. Im Rahmen dieses Vorhabens wurde gezeigt, dass diese Reduktion der Emission zu einer Senkung der Exposition führt. Hierzu wurden die in der Fläche auftretenden Leistungsdichten von MIMO-Systemen mit unterschiedlichen Algorithmen der Leistungsaufteilung auf die einzelnen Antennen mit klassischen SISO-Systemen (Single Input Single Output), die jeweils nur eine Antenne auf der Sende- und Empfangsseite aufweisen, verglichen (siehe Bild 2). Dabei wurden neben Szenarien in denen sich nur ein Nutzer befindet (single-user MIMO) auch Szenarien mit mehreren mobilen Teilnehmern betrachtet (multi-user MIMO). Für ein typisches städtisches Szenario wurde so eine typische Expositionsreduktion von 13 dB (Faktor 20) im Falle der MIMO-Systeme ermittelt. Durch eine größere Anzahl von Nutzern kann mit MIMO-Systemen zudem die spektrale Effizienz deutlich gesteigert werden.

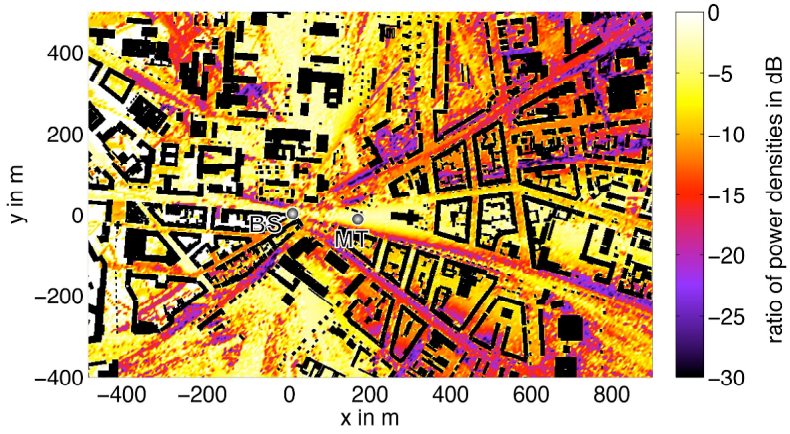

Bild 2: Expositionsreduzierung eines Beamforming MIMO-Systems im Vergleich zu einem klassischen SISO-System.

3.1.4 Inhouse-Verteilung von Rundfunkdiensten

Für eine mögliche Inhouse-Verteilung von digitalem terrestrischem Rundfunk wurden verschiedene Konzepte zur Immissionssenkung betrachtet. Es wurde gezeigt, dass bei einer Inhouse-Verteilung mittels WLAN (siehe Bild 3) durch verschiedene Techniken wie beispielsweise Sendeleistungsregelung, geeignete Fehlerkodierung, Codeumwandlung (von MPEG-2 zu MPEG-4), MIMO, Multiplexing-Verfahren die

Exposition typischerweise um etwa 20 dB (Faktor 100) im Vergleich klassischen WLAN-Standard gesenkt werden. Bei sehr günstigen Eigenschaften des Funkkanals wäre alleine durch die Möglichkeit einer Sendeleistungsregelung und Reduktion der Datenrate eine Reduktion um typischerweise bis zu 50 dB (Faktor 100 000) möglich.

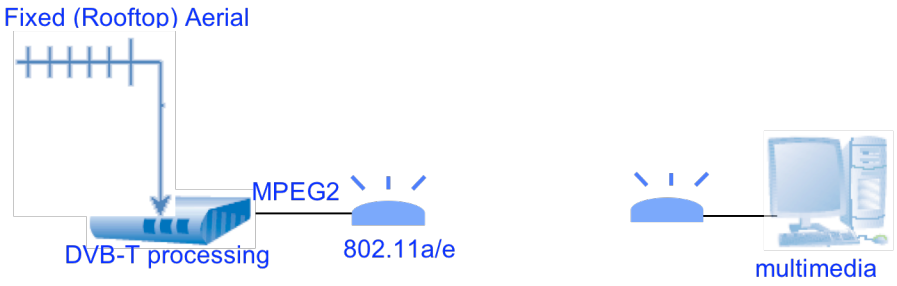

Bild 3: Verbreitung von Rundfunkinhalten über hausinterne Elemente wie beispielsweise WLAN.

Derzeit werden für WLAN-Anwendungen hauptsächlich die Frequenzbereiche um 2,4 GHz und 5,7 GHz verwendet. Es konnte gezeigt werden, dass bei der Verwendung von UHF-Frequenzen, welche dem Rundfunk zugewiesen sind, eine deutliche Senkung der Exposition erreicht werden könnte. Diese Reduzierung ist auf die bei niedrigeren Frequenzen kleinere Übertragungsdämpfung zurückzuführen. Für feste Punkt-zu-Punkt Verbindungen kann die höhere Übertragungsdämpfung zumindest teilweise durch den Einsatz von Antennen mit hohem Antennengewinn ausgeglichen werden. Bei portablen Systemen für Endverbraucher können große Antennengewinne aufgrund der dann erforderlichen Ausrichtung der Antennen nicht benutzerfreundlich genutzt werden, so dass bei den angestellten Untersuchungen Antennen ohne Gewinn bzw. Richtwirkung betrachtet wurden.

3.1.5 Hybride UMTS/DVB-H-Netze

Das Mobilfunksystem UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) bietet die Möglichkeit Videoinhalte mit Übertragungsraten von typischerweise bis zu 384 kbit/s zu übertragen. Aufgrund einer in der Summe begrenzten Übertragungsrate, die abhängig vom Spreizfaktor ist, können von einer einzelnen Basisstation nur wenige Nutzer mit einem derart hochratigen Dienst versorgt werden. Dadurch sind bei einer großen Nachfrage nach individuellen Informationen mit hohen Datenraten sehr viele Basisstationen erforderlich. Vor allem bei Großveranstaltungen wie Sportereignissen

werden von vielen Nutzern auf engem Raum gleiche Inhalte wie z.B. Videos von bestimmten Szenen als Wiederholung angefordert. Daher wurde im Rahmen des Vorhabens untersucht, welchen Einfluss das Aussenden hochratiger Dateninhalte mit hoher Nachfrage auf die Exposition hat. Verglichen wurden hierbei ein entsprechend ausgebautes reines UMTS-Netz mit einem UMTS-Netz, welches um ein zusätzliches DVB-H-Netz erweitert wurde (siehe Bild 4). Die zweite Realisierung wird als hybrides Netz bezeichnet. Das Rundfunknetz DVB-H (Digital Video Broadcasting - Handheld) ermöglicht, viele Nutzer gleichzeitig mit populären Informationen im Punkt-zu-Multipunkt-Modus zu versorgen. Die hybriden Netze stellen eine leistungsstarke Kombination von unabhängigen Netzen (UMTS und DVB-H) dar.

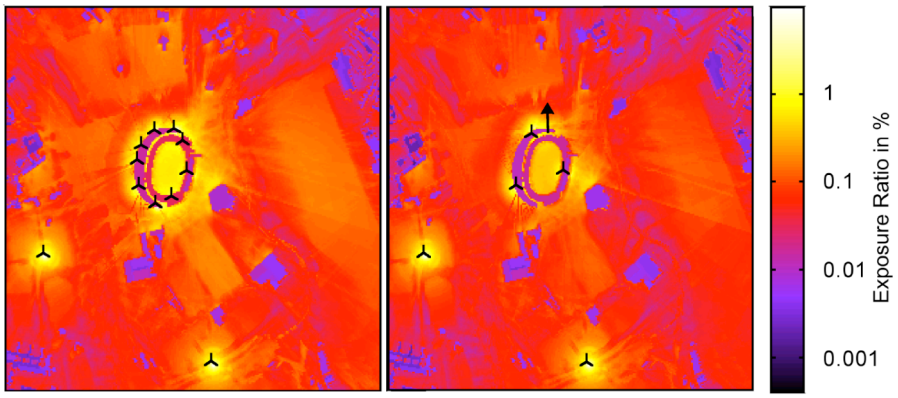

Bild 4: Vergleich der Grenzwertausschöpfung für die Versorgung zahlreicher Nutzer, die eine hohe Nachfrage nach populären Informationsinhalten stellen. Links: Reines UMTS-Netz mit großer Anzahl von Basisstationen. Rechts: UMTS-Netz, erweitert um einen DVB-H Sender.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass hybride Netze zu einer geringeren Ausschöpfung der Grenzwerte und damit zu einer geringeren Exposition führen können. Allerdings ist hierzu eine sehr große Nachfrage nach einer begrenzten Anzahl von Videoinhalten erforderlich. In dem betrachteten Szenario eines Fußballstadions können diese Voraussetzungen beispielsweise gut erfüllt werden. Zusätzlich wurde ein weiteres Szenario betrachtet, in dem auch Nutzer in Gebäuden mit einem größeren Umfang von Videoprogrammen versorgt werden sollten. In diesem Fall hat sich gezeigt, dass die Abstrahlung der hochratigen Dateninhalte über das DVB-H-Netz keinen Vorteil, hinsichtlich der für die Expositionsbewertung betrachteten statistisch relevanten Größen aufweist. Es konnte jedoch festgestellt werden, dass die maximale Grenzwertausschöpfung im betrachteten Gebiet reduziert werden kann.

Eine andere technische Erweitung von UMTS, MBMS (Multimedia Multicast/Broadcast Services), wurde hierbei nicht untersucht. Zum einen wurden bei MBMS Datenraten bis zu 256 kbit/s standardisiert, welche für Videoanwendungen nicht ausreichend sind. Zum anderen würden bestehende UMTS-Zellen derartig durch MBMS belastet werden, dass die Qualität der anderen Dienste stark in Mitleidenschaft gezogen würde.

3.1.6 Zusammenfassung

Die Untersuchungen zeigen, dass insbesondere bei WLAN-Anwendungen ein enormes Potential zur Senkung der Exposition vorhanden ist. Der Hauptgrund hierfür ist, dass für derartige Plug-and-Play Produkte, wie sie im Heimbereich in der Regel eingesetzt werden, Techniken sowie Sendeleistungen verwendet werden, die eine hohe Verbindungssicherheit bei geringem Aufwand erlauben. Dies führt insbesondere dazu, dass die verwendeten Sendeleistungen oftmals deutlich größer sind als aufgrund der jeweiligen Gegebenheiten notwendig. Mobilfunk- und Rundfunknetze werden hingegen speziell für die zu versorgenden Gebiete ausgelegt, so dass in diesem Fall eine ausschließliche Reduktion der abgestrahlten Leistung zu erheblichen Versorgungslücken führen würde. Der Einsatz von MIMO-Systemen sowie der Aufbau einer für die Exposition günstige Netzstruktur (kleine Zellen bei vielen Nutzern, hybride DVB-H/UMTS-Netze bei entsprechender Nachfrage nach hochratigen Diensten) kann aber auch hier noch zu deutlichen Expositionsreduktionen führen.

3.1.7 Literatur

[ICNIRP] ICNIRP, "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)," *Health Physics*, vol. 74, no. 4, pp. 494-522, 1998

3.1.8 Veröffentlichungen

Im Rahmen des Arbeitspaketes wurden bislang folgende Beiträge publiziert:

M.A. Baldauf, S. Knörzer, T. Kayser, and W. Wiesbeck, "Transmit Power Control in Mobile Communications and its Potential for a Reduction of EMF Exposure," *Proceedings of 4th International Workshop on Biological Effects of Electromagnetic Fields*, vol. 1, pp. 231-239, Crete, Greece, October 2006

M.A. Baldauf, W. Sörgel, and W. Wiesbeck, "Radio network planning and human exposure to electromagnetic fields," Advances in Radio Science - Kleinheubacher Berichte, vol. 5, pp. 379–384, June 2007

M.A. Baldauf, S. Knörzer, W. Sörgel, and W. Wiesbeck, "Cell Splitting and Exposure in GSM Networks," *13th International Conference on Telecommunications*, CD-ROM, Funchal, Madeira, May 2006

M.A. Baldauf, S. Knörzer, W. Sörgel, and W. Wiesbeck, "Exposure Reduction in GSM Networks by Cell Splitting," *German Microwave Conference (GeMIC)*, CD-ROM, Karlsruhe, Germany, March 2006

W. Endemann and R. Kays, "Drahtlose Vernetzungskonzepte im Heimbereich - Vergleich verschiedener Frequenzbänder," *22. Fachtagung der FKTG*, Potsdam, May 2006

T. Fügen, J. Maurer, T. Kayser, and W. Wiesbeck, "Capability of 3D Ray Tracing for Defining Parameter Sets for Future Mobile Communications Systems," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Special Issue on Wireless Communications,* Volume 54, Issue 11, Part 1, pp. 3125 - 3137, November 2006

T. Fügen, M. Porebska, and W. Wiesbeck, "Performance of Downlink Spatial-Multiplexing in Urban Macrocellular Multi-User MIMO Scenarios," in *Proceedings of the 17th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC '06)*, Helsinki, Finland, September 2006

T. Fügen, M. Porebska, and W. Wiesbeck, "Performance of Downlink Spatial-Multiplexing in Realistic Urban Multi-User MIMO Channels," in *Proceedings of the 64th IEEE Vehicular Technology Conference, VTC-2006 Fall*, Montreal, Canada, September 2006

P. Unger, M. Schack and T. Kürner, "Minimising the Electromagnetic Exposure at Hot-Spot Areas using Hybrid (DVB-H/UMTS) Networks," *German Microwave Conference (GeMIC)*, Karlsruhe, May 2006

P. Unger, M. Schack and T. Kürner, "Minimizing the Electromagnetic Exposure Using Hybrid (DVB-H/UMTS) Networks," *IEEE Transactions on Broadcasting*, Vol. 53, Issue 1, Part 2, pp. 418-424, March 2007

P. Unger, M. Schack and T. Kürner, "Impact of the Hybrid (DVB-H/UMTS) Network Structure on the Electromagnetic Exposure," *Int. Symposium on Wireless Communication Systems*, Valencia, September 2006

3.2 Minimierung der spezifischen Absorptionsrate (SAR) mobiler Endgeräte

koordiniert von Prof. Dr.-Ing. Ingo Wolff, IMST GmbH

3.2.1 Allgemeines

Obwohl oftmals von der Bevölkerung nicht so wahrgenommen, kann bereits durch einfache Abschätzungen gezeigt werden, dass die individuelle Exposition in der Regel maßgeblich von den körpernah betriebenen Endgeräten (wie Laptop mit UMTS Funktionalität) oder den Endgeräten, die im Körperkontakt betreiben werden (wie Mobiltelefon), bestimmt wird. So ist die im Körper hervorgerufene SAR (Spezifische Absorptionsrate) durch eine Mobilfunkbasisstation bereits in einem Abstand von wenigen Metern geringer als die SAR, die durch ein Mobiltelefon bei Betrieb am Kopf hervorgerufen wird, auch wenn dessen Leistung weitaus geringer ist, als die der Basisstation.

Ziel der Arbeiten war es deshalb zum einen die Exposition durch übliche körpernah betriebene Endgeräte zu bestimmen. Darüber hinaus sollten Maßnahmen zur Reduzierung dieser Exposition in Form der SAR untersucht werden und derer Minimierungspotential bestimmt werden. An dem Arbeitspaket waren Institute der Universitäten Karlsruhe und Wuppertal sowie die IMST GmbH beteiligt.

Repräsentativ für Geräte mit Körperkontakt sind hier in erster Linie Mobiltelefone. Daher wurden beispielsweise konstruktive Maßnahmen zur Reduzierung der SAR für Mobiltelefone der aktuell verwendeten Standards GSM und UMTS untersucht. Des Weiteren wurde das Minimierungspotential durch die zukünftig (beispielsweise in LTE) geplante Einführung von Mehrantennensystemen im Sinne von MIMO auf der Terminalseite betrachtet. Darüber hinaus konzentrierten sich die Arbeiten auf körpernah betriebene Endgeräte wie beispielsweise Laptops mit UMTS und WLAN-Funktionalität unter der Berücksichtigung, dass der Nutzer hier auch multiplen Feldquellen in seiner näheren Umgebung ausgesetzt sein kann. Durch den Vergleich der Immissionen durch Mobiltelefone und Basisstationen in bestimmten ausgesuchten Umgebungen kann die Exposition durch Geräte in unmittelbarer Umgebung des Körpers in Relation zur Exposition durch weiter entfernte Feldquellen gesetzt werden.

3.2.2 Minimierung der SAR von Mobiltelefonen bei Kopfbetrieb

Mobiltelefone (Handys) gehören mittlerweile zu etablierten Kommunikationsgeräten, die nahezu von Jedermann täglich verwendet werden. Gleichzeitig stellen sie die wohl stärkste Quelle für die individuelle Exposition dar. Vor Markteinführung wird mittlerweile die im Kopf des Benutzers hervorgerufene spezifische Absorptionsrate (SAR) jedes Mobiltelefon-Modells gemessen. Hierbei zeigt sich, dass die SAR der meisten Geräte deutlich unterhalb des zulässigen Grenzwerts [ICNIRP] liegen.

Die Untersuchungen haben allerdings gezeigt, dass es deutliche Unterschiede der über eine repräsentative Auswahl von Mobiltelefonen gemittelten SAR Werte hinsichtlich des Frequenzbandes (Unteres Band: GSM 900 oder Oberes Band: GSM1800 und UMTS) gibt. Im unteren Band ist der Mittelwert der SAR-Werte höher als im oberen Band. Hinsichtlich der verwendeten Antennen (externe oder integrierte Antennen) führte die Verwendung integrierter Antennen lediglich im oberen Frequenzband zu signifikant reduzierten Werten gegenüber externen Helix-Antennen [Manteuffel 2002]. Dieser Antennentyp wird allerdings mittlerweile in fast allen aktuellen Mobiltelefonen verwendet.

Im Rahmen des Projekts wurden verschiedene konstruktive Maßnahmen untersucht, welche die SAR reduzieren können ohne die Funk-Eigenschaften des Mobiltelefons signifikant einzuschränken. Für den unteren Frequenzbereich konnte beispielsweise durch das Einbringen einer Metallisierung auf der dem Nutzer zugewandten Seite, welche eine geeignete Stromverteilung führt, lokal eine Reduktion des Nahfeldes erreicht werden (siehe Bild 5). Hierdurch konnte die SAR des Mobiltelefons um etwa einen Faktor zwei gesenkt werden. Die Erkenntnisse flossen schon während der Projektlaufzeit in die Entwicklungen ein. Somit ist davon auszugehen, dass heute bereits einige aktuelle Mobiltelefone diese Maßnahmen anwenden.

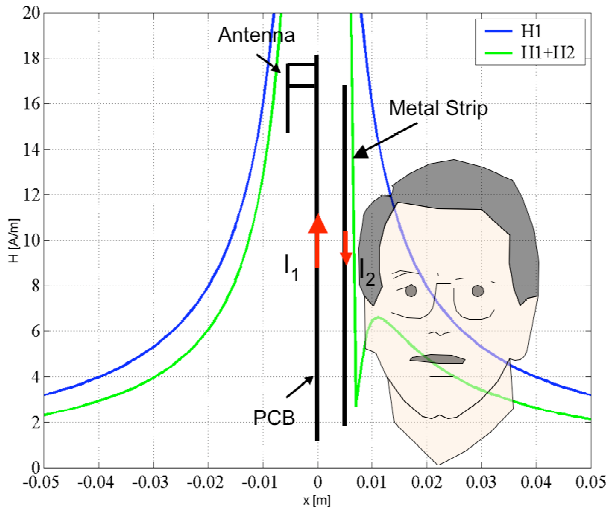

Bild 5: Innerhalb des Handys fließende Ströme (I_1) erzeugen Feldbeiträge im Nahfeld. Durch einen entgegengesetzt gerichteten Strom in der Nähe der Oberfläche des Handys (I_2) lässt sich das lokale Nahfeld, und somit die SAR, reduzieren.

3.2.3 SAR-Minimierung durch Handys mit MIMO-Antennentechnologie

Ziel des Arbeitspaketes war es, das Minimierungspotenzial hinsichtlich der SAR von Mobiltelefonen zu untersuchen, die auf zukünftigen Mobilfunkstandards basieren, welche Mehrantennensysteme auf der Terminalseite verwenden.

Solche unter dem Begriff MIMO (Multiple Input Multiple Output) bekannten Verfahren verwenden Mehrantennensysteme auf beiden Seiten der Übertragungsstrecke, um durch geschickte Aufteilung der zu sendenden Information auf die Einzelantennen eine Erhöhung der Übertragungskapazität im Vergleich zum SISO-Fall (Single Input Single Output) zu erreichen.

Die Erwähnung von Mehrantennensystemen führt in der Bevölkerung oft zu der Annahme, dass hierbei zwangsläufig die Exposition steigen müsse. Dies ist nicht zwingend der Fall. Nutzt man das Mehrantennensystem auf der Terminalseite beispielsweise nicht dazu die Kapazität zu erhöhen, sondern lediglich um den Status Quo zum Ein-Antennen Terminal zu halten, kann die Sendeleistung, wie Untersuchungen in diesem Arbeitspaket gezeigt haben, erheblich reduziert werden. Somit wäre es möglich, die individuelle Exposition des Benutzers durch das Mobiltelefon deutlich zu reduzieren.

Es wurde daher das Minimierungspotenzial hinsichtlich verschiedener generischer Mehrantennensysteme und MIMO-Algorithmen untersucht. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass sich einerseits bei konstanter Leistung die größte Übertragungskapazität bei Systemen mit Kanalkenntnis am Sender erreichen lässt. Andererseits kann die Expositionseffizienz, die als Maß für das Verhältnis zwischen Exposition und erreichbarer Übertragungskapazität eingeführt wurde, durchaus bei Systemen ohne Kanalkenntnis besser sein (siehe Bild 6).

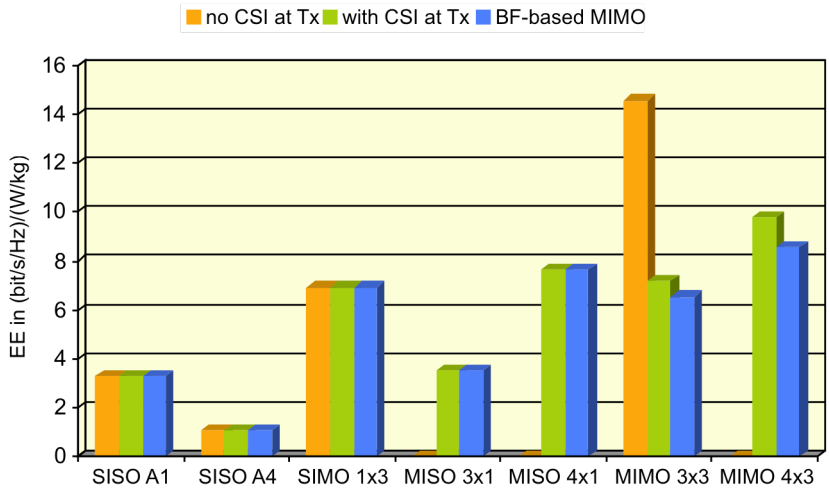

Bild 6: Expositionseffizienz für verschiedene Antennenkonfigurationen und MIMO-Verfahren. Bei den klassischen SISO-Systemen wurden verschiedene Antennenpositionen betrachtet. Mit zunehmender Anzahl von Antennen wird die Exposition pro übertragenem Bit pro Zeit und Bandbreite geringer.

3.2.4 Minimierung der SAR körpernah betriebener Endgeräte

Ziel des Arbeitspakets war die Untersuchung der SAR körpernah betriebener Endgeräte unter Berücksichtigung der verwendeten Antennen, der Gerätetopologie und des verwendeten Frequenzbands.

Viele drahtlose Kommunikationsendgeräte werden weder in direktem Körperkontakt, noch weit weg vom Körper betrieben. Solche körpernahen Quellen, die sich in Abständen zwischen einigen Zentimetern oder Dezimetern vom Körper befinden können, sind beispielsweise Basisstationen von Schnurlostelefonen, WLAN-Router (siehe Bild 7) oder Netzwerkkarten von PCs oder Notebooks.

In diesem Arbeitspaket wurden einige repräsentative Szenarien mittels numerischer Techniken untersucht und deren Exposition auf den Benutzer bestimmt. Des Weiteren

wurden konstruktive Maßnahmen zur Reduzierung der Exposition vorgeschlagen. Beispielhaft wurde gezeigt, dass die Ganzkörper-SAR wie auch die lokalisierte SAR hervorgerufen durch die Netzwerkkarte in einem Notebook sich abhängig davon an welcher Stelle die Netzwerkkarte im Notebook untergebracht ist um etwa eine Größenordnung unterscheiden kann.

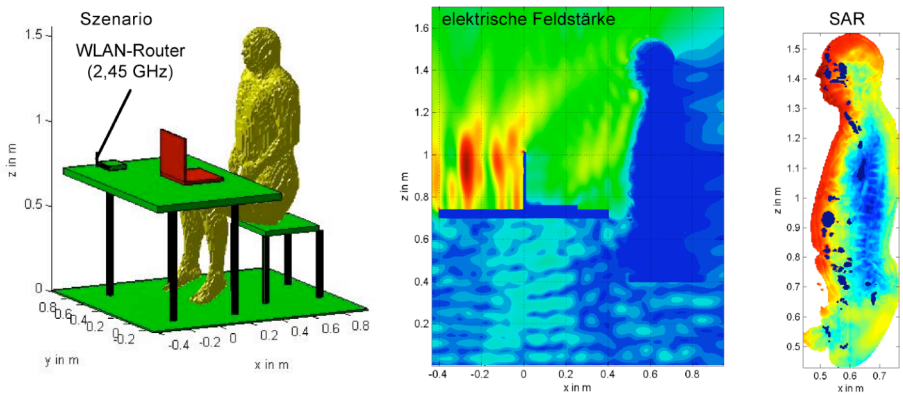

Bild 7: Evaluierung der Exposition bei einer Exposition durch einen WLAN-Router.

Das Arbeitspaket wurde vom BMU im Rahmen des Deutschen Mobilfunkforschungsprogramms unter dem Titel "Untersuchung des Einflusses von Antennen- und Gerätetopologien von körpernah betriebenen drahtlosen Kommunikationsendgeräten auf die von diesen verursachten SAR Werte" gefördert. Ein ausführlicher Endbericht ist über den Internetauftritt www.emf-forschungsprogramm.de als pdf-Datei verfügbar.

3.2.5 Gegenüberstellung der Immissionen durch Mobiltelefone und Basisstationen

Obwohl die individuelle Exposition von Mobiltelefonen bei Kopfbetrieb weitaus größer ist als die von Basisstationen, sind gerade die Basisstationen im öffentlichen Fokus. Als Grund wird hierbei oft angeführt, dass es sich bei Basisstationen um eine "unfreiwillige" und "nicht steuerbare" Exposition handele.

Ziel dieses Arbeitspaket war es deshalb, die Exposition durch Mobiltelefone und Basisstationen gerade in solchen Situationen zu vergleichen, bei denen "Unbeteiligte" in relevantem Ausmaß auch durch benachbarte Mobiltelefone exponiert werden. Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass es Situationen gibt, in denen nicht-telefonierende Personen wesentlich stärker durch die Mobiltelefone ihrer

telefonierenden Nachbarn exponiert werden, als durch Mobilfunkbasisstationen. Solche Situationen können beispielsweise im Zug (siehe Bild 8), in Lounges oder generell bei größeren Menschenansammlungen auftreten. Die SAR-Werte liegen allerdings auch hier weit unterhalb der SAR des Telefonierenden selbst und somit weit unterhalb der zulässigen Grenzwerte.

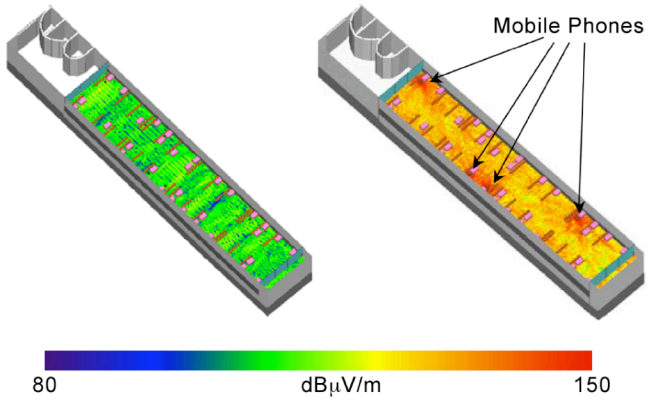

Bild 8: Innerhalb eines Zuges vorherrschende elektrische Feldstärke aufgrund einer Basisstation in ca. 50 m Entfernung (links) bzw. aufgrund von vier im Zug betriebenen Handys (rechts).

3.2.6 Zusammenfassung

Mobiltelefone stellen in üblicher Gebrauchshaltung (Betrieb am Kopf) die stärkste Quelle für die individuelle Exposition dar. Der erreichte SAR-Wert im Kopf liegt dennoch in der Regel deutlich unterhalb des zulässigen Grenzwerts [ICNIRP]. Bei Mobiltelefonen, die auf den aktuellen Standards wie GSM und UMTS beruhen ist durch konstruktive Änderungen eine Minimierung der SAR möglich. Diese Maßnahmen werden mittlerweile bei aktuellen Entwicklungen zum Teil angewendet. In Bezug auf zukünftige Standards ist durch die Verwendung von Mehrantennensystemen eine weitere Minimierung der Exposition möglich. Hier darf das Mehrantennensystem dann allerdings nicht ausschließlich dazu genutzt werden, die Übertragungskapazität zu erhöhen, sondern die effizientere Ausnützung des Funkkanals muss verwendet werden, um die Sendeleistung zu senken. Körpernah betriebene Endgeräte, wie Notebooks mit WLAN-Netzwerkkarte führen zwar zu einer geringeren Exposition als Mobiltelefone bei Kopfbetrieb, allerdings ist auch hier ein zusätzliches Minimierungspotenzial durch konstruktive Änderungen auszumachen.

Abschließend kann festgestellt werden, dass bei dichten Menschenansammlungen, wie sie im Zugabteil oder in Lounges auftreten, die Exposition Dritter durch die Mobiltelefone telefonierender Nachbarn größer sein kann als die Exposition durch die beteiligte Basisstation des Mobilfunknetzes.

3.2.7 Literatur

[ICNIRP] ICNIRP, "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)," *Health Physics*, vol. 74, no. 4, pp. 494-522, 1998

[Manteuffel 2002] Dirk Manteuffel, "Analyse und Synthese von integrierten Antennen für Mobiltelefone unter besonderer Berücksichtigung des Benutzereinflusses," Dissertation an der Universität Duisburg-Essen, Oktober 2002. Veröffentlicht in der Reihe: Berichte aus der Hochfrequenztechnik, Shaker Verlag, 2002, ISBN 3-8322-0976-X

3.2.8 Veröffentlichungen

Im Rahmen des Arbeitspaketes wurden bislang folgende Beiträge publiziert:

M.A. Baldauf, C. Kuhnert, S. Schulteis, and W. Wiesbeck, "Multiple Antenna Systems in Mobile Phones and their Performance in Terms of EMF Exposure," *Proceedings of 4th International Workshop on Biological Effects of Electromagnetic Fields*, vol. 2, pp. 775-283, Crete, Greece, October 2006

M.A. Baldauf, J.A. Pontes, J. Timmermann, and W. Wiesbeck, "Mobile MIMO phones and their human exposure to electromagnetic fields," *Proceedings of the 10th International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications*, ICEAA 2007, pp. 9–12, Torino, Italy, September 2007

Brian Beard, Wolfgang Kainz, Teruo Onishi, Takahiro Iyama, Soichi Watanabe, Osamu Fujiwara, Jianqing Wang, Giorgi Bit-Babik, Antonio Faraone, Joe Wiart, Andreas Christ, Niels Kuster, Ae-Kyoung Lee, Hugo Kroeze, Martin Siegbahn, Jafar Keshvari, Houman Abrishamkar, Winfried Simon, Dirk Manteuffel, Neviana Nikoloski: "Comparisons of Computed Mobile Phone Induced SAR in the SAM Phantom to that in Anatomically Correct Models of the Human Head," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility (EMC)*, vol. 48, no. 2, pp. 397 – 407, May 2006

C. Kuhnert, M.A. Baldauf, W. Sörgel, and W. Wiesbeck, "Near field characterization of MIMO antennas in hand-held devices with regard to exposure reduction," *Int. Conference on Electromagnetics in Advanced Applications*, September 2005

D. Manteuffel: "A concept to minimize the user interaction of mobile phones," *IEE AMS-2004 – Technical Seminar on Antenna Measurement and SAR*, Loughborough UK, May 2004

D. Manteuffel: "Numerical Dosimetry," invited paper in: *IEE AMS-2004 – Technical Seminar on Antenna Measurement and SAR*, Loughborough UK, May 2004

D. Manteuffel, W. Simon: "FDTD calculation of the SAR induced in the human head by mobile phones – new standards and procedures for the numerical assessment," invited paper in: *IWAT2005 - IEEE International Workshop on Antenna Technology: Small Antennas and Novel Metamaterials*, Singapore, March 2005

D. Manteuffel: "Analyse und Synthese von integrierten Antennen für Mobiltelefone," in der Rubrik: Ausgezeichnete Dissertationen der Zeitschrift: it- Information Technology Jahrgang 48 (2006) Heft 1, S. 60-64. Oldenburg Wissenschaftsverlag GmbH, München, ISSN 1611-2776

M. Wuschek, Ch. Bornkessel, D. Manteuffel, P. Schmidt, M. Schubert, Möglichkeiten und Grenzen der Minimierung von Mobilfunkimmissionen: Auf Messdaten und Simulationen basierende Optionen und Beispiele, Studie im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz Abschlußbericht, 2004

3.3 Analyse der Pulshaltigkeit von Funksignalen und Methoden zu deren Abschwächung

koordiniert von Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. habil. Robert Weigel,

Universität Erlangen-Nürnberg

3.3.1 Allgemeines

Ziel dieses Arbeitspakets war es, mit Hilfe von analytischen und simulativen Methoden einen wesentlichen Beitrag zum physikalischen Verständnis des Phänomens Pulshaltigkeit zu leisten, unterschiedliche bestehende drahtlose Übertragungssysteme bezüglich der Pulshaltigkeit zu vergleichen sowie Wege zur Abschwächung der Pulshaltigkeit aufzuzeigen. Bei GSM resultiert das Pulsverhalten aus dem eingesetzten Zeitschlitzverfahren, bei welchem beim Handy pro Sekunde 217 kurze Sendephasen, getrennt von jeweils siebenmal so langen Sendepausen auftreten (siehe Bild 9). Die wesentlichen Beiträge der Pulsfrequenzen liegen im Bereich einiger hundert Hz. Ausgehend von einer Studie der Pulshaltigkeit bei GSM wurde in der Folge das Phänomen auch für weitere schmalbandige, TDMA-basierte Verfahren (EDGE, DECT, TETRA) sowie für die breitbandigen Systeme UMTS, DVB-T und WLAN untersucht.

An dem Arbeitspaket waren Institute der Universitäten Karlsruhe, Erlangen-Nürnberg sowie der Universität des Saarlandes beteiligt.

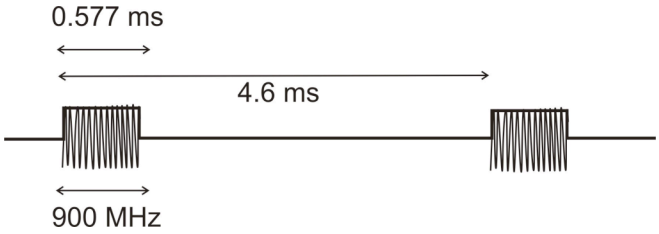

Bild 9: Zeitparameter des GSM-Systems. Die Pulshaltigkeit wird durch eine periodische Signalstruktur hervorgerufen.

3.3.2 Breitbandige Systeme

Im Rahmen der Arbeiten wurde die Pulshaltigkeit von Breitbandsignalen untersucht. Das erste Ziel bestand darin, eine Definition der Pulshaltigkeit zu erarbeiten, die deren Quantifizierung und Analyse ermöglicht:

Pulshaltigkeit ist das Verhältnis von Spitzenwert zur mittleren Spektralleistung der Slot/Rahmen-Einhüllenden des Signals hinter dem Detektor im Frequenzintervall von 1 Hz bis 1 kHz.

Unter Verwendung dieser Definition können die Pulshaltigkeit verschiedener Übertragungssysteme verglichen und Richtlinien für die Gestaltung von Systemen mit geringer Pulshaltigkeit gegeben werden.

Die auf dieser Basis durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass keine Beziehungen zwischen der Pulshaltigkeit und dem Modulationsverfahren oder anderen Details der Luftschnittstelle feststellbar sind. Die wesentlichen Gründe für die Pulshaltigkeit sind das Ein-Ausschalt-Verhalten von TDMA-Verfahren und/oder Leistungsregelungs-mechanismen. Mit dieser Erkenntnis bestand kein Grund dafür, sich detailliert mit den Details der physikalischen Schicht der Funkkommunikationssysteme auseinander-zusetzen. Stattdessen wurden die Einzelheiten der Variation der komplexen Einhüllenden bezüglich der Slots/Rahmen, so wie sie durch das Zeitschlitzverhalten vorgegeben sind, und die Auswirkung der Leistungsregelung auf die Pulshaltigkeit näher betrachtet.

Ausgehend von der oben zitierten Definition der Pulshaltigkeit wurde ihr Effekt in GSM untersucht und die Ergebnisse mit denen von UMTS, DVB-T und WLAN (IEEE802.11a) verglichen. Die Pulshaltigkeit von UMTS liegt deutlich unter der von GSM. DVB-T und WLAN (IEEE 802.11a) zeigen praktisch überhaupt keine Pulshaltigkeit. In TDMA-Systemen (also z.B. in GSM) führt eine einfache

Randomisierung der Zeitschlitzzuweisung zu einer deutlichen Reduzierung der Pulshaltigkeit. Bild 10 zeigt dass im niederfrequenten Spektralanteil eines UMTS-Signals keine ausgeprägten Anteile bei bestimmten Frequenzen auftreten. Die gewonnenen Ergebnisse werden sich als nützlich beim Entwurf von Funkkommunikationssystemen mit minimaler Pulshaltigkeit erweisen.

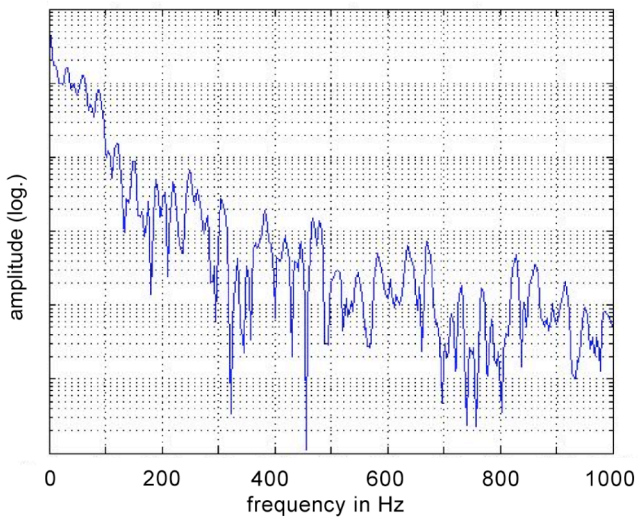

Bild 10: Niederfrequente Spektralanteile bei einem UMTS-FDD Signal.

Im Gegensatz zu Systemen, welche in einem koordinierten Zeitmultiplex arbeiten (GSM, DECT), beruhen die WLANs auf der Vermeidung von Kollisionen unter ansonsten freiem Zugriff auf das gemeinsame Medium. Es wurden typische Szenarien für die In-Haus-Multimedia-Verteilung angenommen. Hierbei konnte gezeigt werden, dass die Pulshaltigkeit breitbandiger Systeme wie der auf OFDM basierenden Systeme 802.11g und 802.11a sehr gering ist. Darüber hinaus konnte ebenfalls demonstriert werden, dass eine Priorisierung von Datenströmen, insbesondere von Multimedia-Daten hohen Datenaufkommens (wie etwa digitales Fernsehen), zu einem dem Zeitmultiplex ähnlichen Auftreten von Datenbursts innerhalb der Rahmenstruktur führt, welches die Pulshaltigkeit erhöht. Für alle untersuchten Szenarien konnte jedoch gezeigt werden, dass diese Erhöhung relativ gering ist.

3.3.3 Schmalbandige Systeme

Unter schmalbandigen Verfahren werden hier TDMA-Verfahren verstanden, die u.a. bei GSM, GPRS, EDGE, DECT und TETRA eingesetzt werden. Es handelt sich in allen genannten Fällen um Zeitmultiplexverfahren. Pulshaltigkeit hängt nicht mit den eigentlichen HF-Signalen sondern mit den Einhüllenden-Signalen (Hüllkurven der HF-Signale) zusammen, die beispielsweise mit Hilfe eines nichtlinearen Elements (etwa einer Diode) aus dem HF-Signal gewonnen werden können. Diese Einhüllenden-Signale nehmen bei den betrachteten Schmalbandverfahren die Form von im Wesentlichen periodischen Pulsen an, deren Periode durch das Zeitmultiplexverfahren bestimmt ist.

Zum Vergleich der Systeme wurde folgende Definition der Pulshaltigkeit angesetzt:

Pulshaltigkeit ist die Leistung des (reellen) Einhüllenden-Signals im Frequenzband beginnend bei 1 Hz bis zu einer variablen oberen Grenzfrequenz f_c bezogen auf die gesamte Leistung des komplexen Basisbandsignals.

In einigen Veröffentlichungen wurde diese obere Grenzfrequenz hart auf den Wert 1 kHz gesetzt. Im Gegensatz hierzu ist der Ansatz gewählt worden, diese obere Grenzfrequenz nicht fest sondern variabel zu halten.

Es lässt sich festhalten, dass die Pulshaltigkeit in GSM, GPRS und DECT unabhängig von den übertragenen Daten ist, weil Modulationsverfahren mit konstanter Einhüllenden angewandt werden. Im Gegensatz dazu ist bei TETRA und EDGE eine leichte Abhängigkeit von den Daten erkennbar.

Für die Mobilgeräte können folgende zusammenfassende Aussagen getroffen werden: Für eine gewählte obere Grenzfrequenz $f_c < 1$ kHz weist TETRA die mit Abstand größte Pulshaltigkeit auf. Dies ist mit der deutlich größeren TDMA-Rahmendauer, die eine kleine Grundwelle von 17 Hz zur Folge hat, zu begründen. Die Spektralanteile der gepulsten Hüllkurve verschieben sich daher bei TETRA hin zu niedrigeren Frequenzen. Für eine gewählte obere Grenzfrequenz $f_c > 1$ kHz zeigt sich, dass DECT die größte Pulshaltigkeit aufweist, gefolgt von GSM, EDGE und TETRA, wobei die Unterschiede nicht signifikant ausfallen. Bei den Basisstationssignalen ist die Pulshaltigkeit abhängig von der Rahmenbelegung. Bild 11 zeigt signifikante Beiträge

im Spektrum bei niedrigen Frequenzen, welche durch unbelegte Rahmen (IDLE Frame) beim GSM-System auftreten.

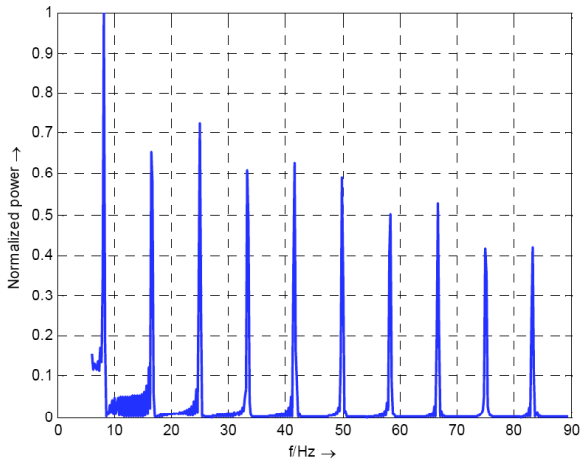

Bild 11: Spektrum im niedrigen Frequenzbereich aufgrund der IDLE Frames beim GSM. Durch den unbelegten 26. Rahmen im GSM Signal ergibt sich eine Pulsfrequenz von 8,3 Hz.

Bei den untersuchten TDMA-Systemen führt eine einfache Randomisierung der Zeitschlitzzuweisung zu einer Reduzierung der Pulshaltigkeit.

3.3.4 Zusammenfassung

Im Laufe der Arbeiten wurden unterschiedlichste Möglichkeiten diskutiert, Pulshaltigkeit mathematisch sauber zu definieren. Es ist festzuhalten, dass die Frage der endgültigen Festlegung der Definition von Pulshaltigkeit nicht eindeutig beantwortet ist, und dass im Rahmen des Projekts zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt wurden.

- Definition 1: Pulshaltigkeit ist die Leistung des (reellen) Einhüllenden-Signals im Frequenzband beginnend bei 1 Hz bis zu einer variablen oberen Grenzfrequenz f_c bezogen auf die gesamte Leistung des komplexen Basisbandsignals.
- Definition 2: Pulshaltigkeit ist das Verhältnis von Spitzenwert zur mittleren Spektralleistung der Slot/Rahmen-Einhüllenden des Signals hinter dem Detektor im Frequenzintervall (1 Hz, 1 kHz).

Mit beiden Ansätzen gelangt man zur einheitlichen Aussage, dass das Aufbrechen von Periodizität, beispielsweise erreichbar durch eine Randomisierung der

Zeitschlitzzuweisung in TDMA-Verfahren, zu einer Reduzierung der Pulshaltigkeit führt. Prinzipielle Aussagen und Trends weisen mit beiden Definitionen in vielerlei Hinsicht in ähnliche Richtungen. Die Diskussion, welche Definition nun Pulshaltigkeit nachhaltiger beschreibt, ist sicher sehr berechtigt und an dieser Stelle nicht final beendet. Es ist dies aus alleiniger Sicht des Ingenieurs auch gar nicht möglich, nur in weiterer Zusammenarbeit mit Biologen und Medizinern wäre eine klarere Festlegung denkbar.

Trotzdem kann zusammenfassend unabhängig von der gewählten Definition festgehalten werden, dass die breitbandigen Systeme UMTS, DVB-T und WLAN (OFDM-basiert) eine deutlich geringere Pulshaltigkeit im Vergleich zu den TDMA-basierten Schmalbandsystemen aufweisen. Bei WLANs führt die Priorisierung von Datenströmen, insbesondere von Multimedia-Daten hohen Datenaufkommens (wie etwa beim digitalen Fernsehen) zu einem dem Zeitmultiplex vergleichbaren Auftreten von Datenbursts innerhalb von MAC-Frames, welches die Pulshaltigkeit erhöht. Sie liegt allerdings deutlich unter der Pulshaltigkeit der betrachteten Schmalbandsysteme.

3.3.5 Literatur

[Skopec1998] M. Skopec, "Hearing aid electromagnetic interference from digital wireless telephones," *IEEE Trans. on Rehabilitation Engineering*, vol. 6, no. 2, pp. 235-239, 1998

[Knottnerus2002] J. A. Knottnerus, "Mobile telephones: An evaluation of health effects," Tech. Rep., Health Council of the Netherlands, Jan. 2002

[Silny2003] J. Silny, "Auswirkungen hochfrequenter Felder auf den Menschen," *Literaturstudie: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg*, Dez. 2003

[Dunlop2000] J. Dunlop, D. Girma and J. Irvine, *Digital Mobile Communications and the TETRA System*, Wiley, 2000

[Redl1995] S. M. Redl and M. K. Weber, *An Introduction to GSM*, Artech House, 1995

3.4 Analyse der Gesamtimmission bedeutender Funkdienste

koordiniert von Dipl.-Ing. Roland Götz, LS telcom AG

3.4.1 Allgemeines

Im Rahmen der durchgeführten Arbeiten wurde eine Analyse der Immissionen vorhandener terrestrischer Funkdienste vorgenommen. Die Arbeiten wurden unter der Beteiligung der IMST GmbH, LS telcom AG, der Mobilfunknetzbetreiber T-Mobile und Vodafone D2 sowie der Universität Karlsruhe durchgeführt.

Die Immissionen, die von den Rundfunk- und Mobilfunknetzen ausgehen wurden in separaten Arbeitspaketen betrachtet. Die EU-Ratsempfehlung (1999/519/EG) regelt dabei, wie verschieden frequente Immissionen zu gewichten sind. Grundsätzlich wird, je nach Frequenzbereich, zwischen einem so genannten "induzierten Körperstrom-Effekt" und einem "thermischem Effekt" unterschieden. Zur Bestimmung der Grenzwertausschöpfung kommen Formeln zur Anwendung, die beide Bereiche berücksichtigen und frequenzabhängig jeweils einen Wert ermitteln. Für den induzierten Körperstrom-Effekt werden Feldstärken betrachtet während für den thermischen Effekt die aus den Quadraten der Feldstärken gebildeten Leistungsdichten berücksichtigt werden.

So spielen im Frequenzbereich bis 10 MHz die induzierten Körperströme eine Rolle, die Auswirkungen auf das Nervensystem von Lebewesen haben können. Im Frequenzbereich ab 100 kHz werden zusätzlich die thermischen Effekte relevant. Oberhalb von 10 MHz, also in dem Bereich, in welchem die Dienste TV oder auch der Mobilfunk liegen, basieren die Grenzwerte ausschließlich auf thermischen Wirkungen.

3.4.2 Betrachtung von Rundfunknetzen

Um die Grenzwertausschöpfung bestimmen zu können wurden in zwei ausgewählten Gebieten, welche auch für Analyse der Mobilfunknetze betrachtet wurden, Berechnungen durchgeführt.

Die Analyse, bestehend aus Feldstärke- und der darauf basierenden Immissionsberechnung, wurde gemäß der EU-Ratsempfehlung (1999/519/EG) für ein

typisch städtisches (Mannheim/Ludwighafen) und ländliches (Region Odenwald) Gebiet durchgeführt (siehe Bild 12).

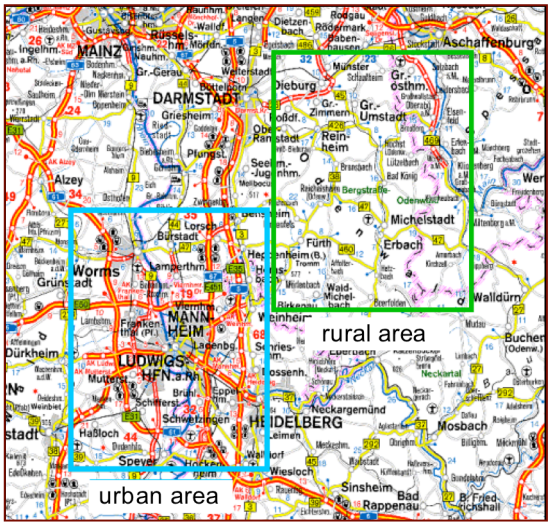

Bild 12: Betrachtete Regionen für die Analyse der Gesamtimmission.

Die analogen Dienste UKW und TV, wie auch LF/MF und HF, waren Teil der durchgeführten Untersuchungen. Die neuen digitalen Radio- und Fernsehdienste DAB und DVB-T wurden ebenfalls berechnet. Die Auswirkung der Digitalisierung auf die Immissionen, wurde anhand des Großraums München analysiert.

Die Berechnungen und Analysen wurden mit der LS telcom-Software CHIRplus_BC durchgeführt. Mit dieser Software ist es möglich, für die verschiedenen Dienste die entsprechenden Immissionswerte gem. EU-Ratsempfehlung (1999/519/EG) flächig zu ermitteln.

Ergebnisse der Berechnungen

Die berechneten Werte bleiben weit unter den vorgegebenen Grenzwerten. Dabei gilt es zu beachten, dass für die Analysen die maximalen international koordinierten Parameter verwendet wurden, diese können selbstverständlich von den tatsächlichen Betriebs-Parametern abweichen (in der Praxis werden die genehmigten Sendeleistungen oft unterschritten). Insbesondere trifft dies für den LF/MF-Bereich zu, da diese Dienste heutzutage nur noch eine geringe Popularität aufweisen. Bild 13 zeigt beispielhaft die Grenzwertausschöpfung durch den FM-Rundfunkdienst im Gebiet Mannheim/Ludwigshafen.

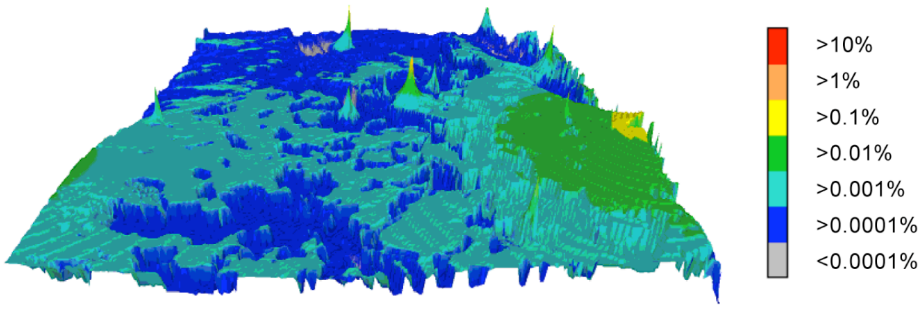

Bild 13: Darstellung der Grenzwertausschöpfung aufgrund des FM-Rundfunkdienstes im städtischen Gebiet Mannheim/Ludwigshafen.

Vergleich analoges TV – DVB-T im Großraum München

Zusätzlich zu den Berechnungen in den beiden o.g. Gebieten, wurde im Bereich München eine Vergleichsrechnung durchgeführt, um die Immissionen von DVB-T, welches seit geraumer Zeit in Betrieb ist, mit denen des vorherigen, analogen TV-Netzes zu vergleichen.

Durch die sechs leistungsstarken DVB-T-Kanäle und der zentralen Lage des Senders „München Olympiaturm“ ergibt sich eine durchschnittliche Grenzwertausschöpfung von 0,00033%.

Für das analoge TV beträgt die durchschnittliche Grenzwertausschöpfung 0,000183%.

Der Unterschied zwischen beiden Betriebsarten in Bezug auf den Ausschöpfungsgrad ist relativ gering. Im Vergleich der beiden Systeme fällt jedoch auf, dass beim analogen TV nur neun Programme zur Verfügung standen, während es bei DVB-T 26 sind.

3.4.3 Betrachtung von Mobilfunknetzen

Im Gegensatz zum Rundfunkbereich, bei dem ein „statisches Netz“ besteht, ist ein Mobilfunknetz als ein dynamisches System anzusehen. Die Sendeleistung der Basisstationen variiert dabei abhängig von der Netzauslastung. Mehr in Betrieb befindliche Mobiltelefone bedeuten einen höheren Verkehr, was direkt eine höhere Summensendeleistung bedeutet. Ebenso wird die Sendeleistung dynamisch den Erfordernissen (Kanalqualität) angepasst. Neben Berechnungen für den aktuell betriebenen Anlagenzustand mit maximaler Sendeleistung wird eine Berechnung mit

der maximal, von der Bundesnetzagentur genehmigten Sendeleistung an der Basisstation angenommen, unabhängig davon, welche Anzahl tatsächlich in Betrieb ist. Dies garantiert, dass dieser theoretische Wert, selbst bei einem Vollausbau des Netzes, niemals überschritten wird.

Da für jeden Frequenzbereich die physikalischen Bedingungen unterschiedlich sind (die Immissionsberechnung ist frequenzabhängig), wurden die Immissionen für GSM 900, GSM 1800 sowie UMTS separat berechnet und anschließend zusammengefügt. Im städtischen Bereich liegt der Ausschöpfungsgrad dabei erwartungsgemäß etwas höher als im ländlichen Gebiet (siehe Bild 14). Der durchschnittliche Ausschöpfungsgrad der Grenzwerte durch Mobilfunkdienste liegt deutlich unter 0,1‰. In unmittelbarer Nähe zu einer Mobilfunkbasisstation können maximale Grenzwertausschöpfungen im Bereich einiger Prozent auftreten.

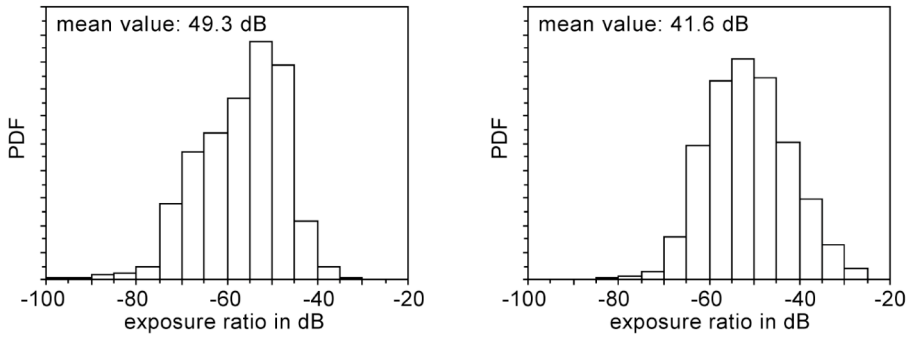

Bild 14: Wahrscheinlichkeitsdichte der Grenzwertausschöpfung im ländlichen (links) und städtischen Gebiet (rechts). Eine Grenzwertausschöpfung von -20 dB im logarithmischen Maßstab entspricht 1% im linearen Maßstab. -30 dB entspricht 0,1% usw.

3.4.4 Messtechnische Verifikation

In beiden Analyse-Gebieten wurden Feldstärkemessungen durchgeführt, um Vergleichswerte zu erhalten, die eine Aussage zur Genauigkeit der Ausschöpfungsgrad-Berechnungen ermöglichen. Eine für den einzelnen Funkdienst spezifische Expositionsmessung erfordert frequenzselektive und im Falle von UMTS auch codeselektive Messeinrichtungen.

Da die Computerprognosen an die Auflösung des Berechnungsgitters gebunden sind, wurden typische Expositionsvariationen über die aus der Auflösung resultierenden „Kacheln“ (50 m x 50 m für Rundfunk, 25 m x 25 m für Mobilfunk) messtechnisch

ermittelt. Diese sind vom betrachteten Funkdienst und vom Szenario abhängig und können durchaus mehr als 10 dB betragen.

Die gemessenen Werte stimmen im separat bestimmten Toleranzband meist mit den Berechnungswerten überein. Bei Berücksichtigung der Expositionsvariationen sind somit, für Betrachtungen der Exposition ausgelegte, Funkprognosetools in der Lage, den Trend sowie die ungefähre Größenordnung der Exposition richtig vorherzusagen (siehe Bild 15). Darüber hinausgehende, präzisere Prognosen an einem definierten Ort sind aber aufgrund der festgestellten Variation über einer Kachel nicht darstellbar. Im Falle von DAB und dem Mobilfunk wurden an einzelnen Messpunkten höhere Immissionen gemessen als per Berechnung ermittelt. Im Falle des Mobilfunks können die Abweichungen auf eine mittlerweile stark abweichende Netzstruktur sowie die, durch Berücksichtung lediglich der Daten eines Netzbetreibers, durchgeführte Extrapolation der Immission zurückgeführt werden. Für DAB können die Abweichungen auf die für die Berechnungen nur näherungsweise vorliegenden Richtcharakteristiken zurückgeführt werden. Dies zeigt, dass die Qualität der in die Berechnung eingehenden Daten einen großen Einfluss auf die Prognosegüte hat.

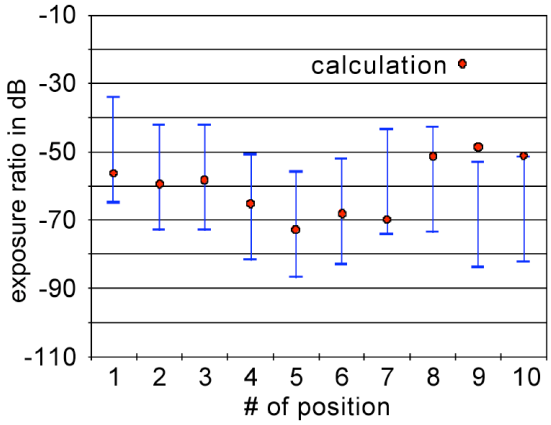

Bild 15: Vergleich der berechneten Grenzwertausschöpfungen (Punkte) mit den Messergebnissen für den Mobilfunk im städtischen Gebiet. Die separat bestimmten typischen Expositionsvariationen, die durch die Auflösung des Berechnungsgitters bestimmt werden, sind als Fehlerbalken dargestellt.

3.4.5 Zusammenfassung

Es hat sich gezeigt, dass für sämtliche berechneten Rundfunkdienste und auch die Mobilfunknetze die Ausschöpfungsgrade der Exposition deutlich unter den

Grenzwerten liegen. Tabelle 1 zeigt die durchschnittlichen Ausschöpfungsgrade für induzierte und thermische Wirkungen in den zwei betrachteten Gebieten.

Gebiet	Durchschnittlicher Ausschöpfungsgrad der Grenzwerte in %
Odenwald (ländlich) thermisch	0,0035
Odenwald (ländlich) induziert	2,32
Mannheim-Ludwigshafen (städtisch) thermisch	0,015
Mannheim-Ludwgshafen (städtisch) induziert	2,06

Tabelle 1: Übersicht des über alle Dienste summierten durchschnittlichen Grenzwert-ausschöpfungsgrad (Rundfunk + Mobilfunk).

Die Messungen ergaben, dass die Berechnungen des Ausschöpfungsgrades der Grenzwerte durchaus geeignet sind, die Immissionssituation realitätskonform abzubilden. Voraussetzung ist aber, dass eine aktuelle Sender-Datenbank mit den relevanten technischen Daten, sowie ein passendes Ausbreitungsmodell und präzise Geländedaten, zur Verfügung stehen.

3.4.6 Literatur

[EU1999] Rat der Europäischen Union: Empfehlung des Rates vom 12. Juli 1999 zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektro-magnetischen Feldern (0 Hz — 300 GHz), 1999/519/EG, 1999

[ICNIRP] ICNIRP, "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)," *Health Physics*, vol. 74, no. 4, pp. 494-522, 1998

3.4.7 Veröffentlichungen

Im Rahmen des Arbeitspaketes wurde bislang folgender Beitrag publiziert:

Chr. Bornkessel, "General public exposure around mobile phone base stations," *FGF-Workshop: "Sleep Disorders, EEG-Changes, Altered Cognitive Functions - Is There a Connection With the Exposure to Mobile Communication RF Fields?"*, Stuttgart, November 2007

3.5 Methoden zur Bilanzierung und Wertung

koordiniert von Prof. Dr. rer. nat. Olaf Dössel, Universität Karlsruhe (TH)

Das in diesem Bereich enthaltene Arbeitspaket "Entwicklung neuer Methoden zur Expositionsbewertung" wurde unter dem Titel "Entwicklung eines praktikablen rechentechnischen Verfahrens zur Ermittelung der tatsächlichen Exposition in komplizierten Immissionsszenarien mit mehreren verschiedenartigen HF-Quellen" im Rahmen des Deutschen Mobilfunkforschungsprogramms durch das BMU gefördert. Die Berichterstellung hierfür ist noch nicht abgeschlossen, wird aber über die Internetseite des Deutschen Mobilfunkforschungsprogramms (www.emf-forschungsprogramm.de) publiziert werden. Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf das vom BMBF geförderte Arbeitspaket "Entwicklung von vereinfachten Körpermodellen und Bewertung von Expositionssituationen mit und ohne Implantate".

3.5.1 Allgemeines

Für die Berechnung und Bewertung der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen im menschlichen Körper werden Modelle benötigt, welche die dielektrischen Eigenschaften des betrachteten Volumens möglichst realistisch beschreiben. Dazu können entweder detaillierte, mit Hilfe medizinischer Bild gebender Verfahren gewonnene Datensätze oder aber homogene, die Realität annähernde Modelle verwendet werden. Untersuchungsgegenstand des Arbeitspaketes war es, ob die einfachen im Vergleich zu den präzisen anatomischen Modellen eine gleichwertige Bestimmung der Feldverteilung und damit eine konservative Abschätzung der deponierten Leistungen ermöglichen.

Der zweite Aspekt des Arbeitspaketes bestand in der Bestimmung der Expositionssituation von implantierten medizinischen Geräten wie zum Beispiel Herzschrittmachern durch externe elektromagnetische Felder. Dabei wurden im Körper auftretende Feldstärken an typischen Implantationsorten in Hinblick auf den Norm Entwurf DIN VDE 0848-3-1 aus dem Jahr 2002 [DIN0848-3-1] zur Störfestigkeit von medizinischen Implantaten evaluiert.

3.5.2 Entwicklung vereinfachter Körpermodelle

Die Verwendung von vereinfachten, in diesem Fall homogenen, anstelle von detaillierten Modellen hat sich prinzipiell als machbar erwiesen. Diese Vorgehensweise ist zur messtechnischen Evaluation von Geräten heute üblich, da die exakte Nachbildung der menschlichen Anatomie zu komplex ist und auch immer nur die Verhältnisse eines speziellen Individuums abbilden würde. Es werden daher Phantome eingesetzt, die eine möglichst große Schnittmenge verschiedener Körpergeometrien darstellen.

Die Simulationen haben gezeigt, dass es lokal durch die geschichtete Anordnung verschiedener Gewebetypen mit unterschiedlichen dielektrischen Eigenschaften jedoch zu Reflexionen an den Grenzflächen kommen kann. Dadurch bilden sich stehende Wellen aus, die zu wesentlich höheren SAR-Werten führen, als dies ein homogenes Modell zeigen würde. Daher empfiehlt sich für räumlich detaillierte Untersuchungen der Expositionssituationen nach wie vor die Verwendung hoch aufgelöster anatomischer Modelle. In der Literatur finden sich Vorschläge, wie durch einfache Schichtmodelle diese lokalen Maxima ebenfalls untersucht werden können.

Die für diesen AP erstellten vereinfachten Körpermodelle basieren auf dreidimensional erfassten Körperoberflächen verschiedener Probanden. Die Rohdaten in Form von Punktewolken wurden aufbereitet und in Polygonmodelle überführt. Genauso wie die Phantome für die Labormessungen wurden auch die Polygonmodelle anschließend homogen mit einer „Body tissue simulating liquid“ (BTSL) gefüllt, um die dielektrischen Eigenschaften des Körperinneren nachzubilden. Die vorgestellte Methode ermöglicht es, vergleichsweise einfach und schnell verschiedenste Körpergeometrien und auch Körperhaltungen für die numerische Feldberechnung zugänglich zu machen.

3.5.3 Expositionssituationen mit und ohne Implantate

Für die Bewertung der Expositionssituation von Trägern medizinischer Implantate wurde im Rahmen des Arbeitspaketes ein Herzschrittmachermodell entwickelt, welches anschließend in ein hoch aufgelöstes Voxelmodell „implantiert“ wurde. Das Voxelmodell basiert auf dem Visible Human-Datensatz und beinhaltet im Bereich der Brust eine detaillierte Beschreibung der anatomischen Struktur. Dadurch lies sich eine

realistische subkutane Platzierung des Herzschrittmachers sowie die Führung der Elektrode durch Blutgefäße bis ins Herz nachbilden (siehe Bild 16).

Die Simulationen haben für körpernahe und körperferne Quellen im Frequenzbereich von WLAN und GSM keine Feldstärken ergeben, welche die im Normentwurf DIN VDE 0848-3-1 aus dem Jahr 2002 festgehaltenen Werte überschreiten. Die ebenfalls in diesem Normentwurf enthaltenen Werte für die Störspannungsfestigkeit sollten jedoch für jedes Herzschrittmacher-Elektroden-System individuell untersucht werden und können mit einem generischen Modell nur exemplarisch wiedergegeben werden.

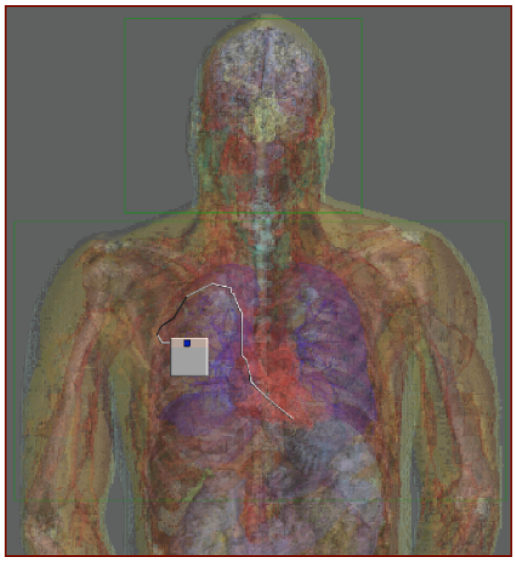

Bild 16: Implantierter Herzschrittmacher im hoch aufgelösten Modell.

3.5.4 Literatur

[DIN0848-3-1] DIN VDE 0848-3-1, *Sicherheit in elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern - Teil 3-1: Schutz von Personen mit aktiven Körperhilfsmitteln im Frequenzbereich 0 Hz bis 300 GHz*, Norm-Entwurf, VDE 0848-3-1:2002-05

3.5.5 Veröffentlichungen

Im Rahmen des Arbeitspaketes wurde bislang folgender Beiträge publiziert:

S. Seitz, O. Dössel, "Influence of body worn wireless mobile devices on implanted cardiac pacemakers," *4th European Congress for Medical and Biomedical Engineering 2008 (eMBEC)*, Antwerp, Belgium, November 2008