



Forschungsvorhaben

**Untersuchung des Einflusses von Antennen- und Gerätetopologien
von körpernah betriebenen drahtlosen Kommunikationsendgeräten auf
die von diesen verursachten SAR-Werte**

**Abschlussbericht
zum
31. Oktober 2007**

im Auftrag des

**Bundesamtes für Strahlenschutz
38201 Salzgitter**

**Prof. Dr.-Ing. Volkert Hansen, Dr.-Ing. Hervé Ndoumbè Mbonjo Mbonjo,
Dr.-Ing. Joachim Streckert, Dipl.-Ing. Yi Zhou**

Der vorliegende Abschlussbericht stellt eine Fortschreibung
des Zwischenberichts zum 30. April 2007 dar und ersetzt diesen.

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

Das Forschungsvorhaben stellt eine Ergänzung des BMBF-Vorhabens "Minimierung der Immission künftiger Funkdienste (kurz: miniWatt II-technischer Teil)" dar.

Abstract (deutsch)

Dieses Forschungsvorhaben befasste sich mit Endgeräten mobiler Kommunikationssysteme, die typischerweise in Abständen von Zentimetern bis Dezimetern zum menschlichen Körper betrieben werden (z.B. Notebook, DECT-Basisstation), d.h. weder in unmittelbarem Kontakt (wie z.B. das Handy am Ohr) noch weit entfernt (wie z.B. der Zentral-Router eines Funk-Netzwerks). Ziel des Projektes war die Bestimmung der Exposition eines Nutzers durch die von derartigen Endgeräten ausgehenden elektromagnetischen Felder. Als Kriterium für die Exposition wurde die Spezifische Absorptionsrate (SAR) herangezogen. Davon ausgehend wurde untersucht, welches Minimierungspotenzial sich für die Spezifische Absorptionsrate durch Modifizierung der Endgeräte, insbesondere durch Variation der Antennenposition und -geometrie, bietet, ohne dass die Kommunikationseigenschaften eingeschränkt werden.

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass insbesondere durch gezielte geräteseitige Abschirmmaßnahmen eine Verminderung der Ganzkörper-SAR um mehr als 80% erreicht werden kann, ohne eine Verschlechterung der Übertragungsqualität (beurteilt anhand des 'mean effective gain' (MEG)) in Kauf nehmen zu müssen. Dagegen scheidet die Möglichkeit einer Verkleinerung der SAR durch Aufteilung der Gesamtleistung auf mehrere Antennen wegen der Feldinterferenzen im Nahfeld und der engen Toleranzen für eine optimale Positionierung der körpernahen Endgeräte in der Regel aus, es sei denn, dass durch den gleichzeitigen Einsatz von MIMO-Technologien eine Reduzierung der Gesamt-Sendeleistung erzielt würde.

Es muss allerdings betont werden, dass die hier untersuchten Endgeräte die anerkannten Grenzwerte bei typischen Anwendungen nur zu einem sehr geringen Prozentsatz ausschöpfen.

Daraus kann geschlossen werden, dass Modifikationen zur Minimierung der SAR körpernaher Endgeräte voraussichtlich nur in Einzelfällen bzw. für Expositionssituationen mit multiplen Quellen zweckmäßig sein könnten.

Abstract (english)

This research project dealt with terminals of mobile communication systems being operated at distances of centimetres to decimetres from the human body (e.g. notebook, DECT base station), i.e. neither in body contact (as e.g. a mobile phone at the ear) nor far away (as e.g. the central router of a wireless network). The goal of the project was the determination of the user's exposure to electromagnetic fields originating from such devices, whereby the exposure was expressed by means of the specific absorption rate (SAR). Furthermore it was examined, which potential for minimizing the SAR is offered by modifications of the devices, especially by changes of the antennas' positions and geometries, but without diminishing the communication characteristics of the devices.

The obtained results confirm that especially by use of device-specific shielding techniques a reduction of the whole-body SAR by more than 80% is possible without deterioration of the mean effective gain (MEG). In contrast, minimizing the SAR by distributing the total power to multiple antennas seems to be unfavourable due to field interference effects in the near-field and to the narrow tolerances for the optimum position of the terminals, unless a reduction of the total transmitted power would be achieved by the additional application of MIMO technologies.

It must be pointed out, however, that the investigated terminals produce SAR values which exploit only a very low percentage of the acknowledged basic restrictions in typical applications.

Therefore it can be concluded that modifying commercially available mobile communication terminals, which are operated near the human body, with the objective of minimizing the SAR is presumably only purposive for particular cases or for exposure situations involving multiple sources.

Inhaltsverzeichnis

Abstract (deutsch)	3
Abstract (english)	4
Einleitung	6
AP 1 Marktübersicht, Auswahl und Spezifizierung interessierender Endgeräte	6
AP 2 Auswahl von Szenarien und Modellbildung	12
2.1 Prinzipielle Vorgehensweise	12
2.2 Festlegung der Konfigurationen	12
2.3 Körpermodelle	12
2.4 Gerätemodelle	17
AP 3 Simulationsrechnungen zur Feldbestimmung	20
3.1 Verfügbare Feldberechnungsverfahren	20
3.2 Auswahl des Berechnungsverfahrens	21
3.3 Feldberechnungen im Freiraum und messtechnischer Vergleich	23
3.4 Feldberechnungen für festgelegte Szenarien	30
AP 4 Bestimmung der SAR-Verteilungen	37
4.1 SAR-Grenzwerte	37
4.2 SAR-Verteilungen für die in Abschnitt 3.4 behandelten Szenarien	37
4.3 Katalog von SAR-Verteilungen für alle Szenarien aus Tabelle II	42
4.3.1 <i>Endgerät 1: Notebook-Schnittstellenkarte</i>	43
a) UMTS (1.950 MHz)	43
b) GPRS (900 MHz)	46
c) W-LAN (2.450 MHz)	49
d) Bluetooth (2.450 MHz)	52
e) Einfluss von Wänden	55
4.3.2 <i>Endgerät 2: W-LAN-Router (2.450 MHz)</i>	57
4.3.3 <i>Endgerät 3: DECT-Basisstation (1.900 MHz)</i>	62
4.4 Anmerkungen zu den SAR-Berechnungen	70
4.4.1 <i>Diskussion einiger Ergebnisse</i>	70
4.4.2 <i>Fehlerbudget</i>	70
4.4.3 <i>Repräsentativität der Ergebnisse</i>	76
AP 5 Modifikation der Endgeräte, Bewertung hinsichtlich des Minimierungspotenzials	79
5.1 Vorgehensweise zur SAR-Minimierung und zur Bewertung der Übertragungsqualität	79
5.2 Ergebnisse für einige ausgewählte modifizierte Szenarien	83
5.3 Katalog von SAR- und MEG-Ergebnissen für alle Szenarien aus Tabelle V	85
5.3.1 <i>Endgerät 1: Notebook-Funkschnittstelle</i>	86
5.3.2 <i>Endgerät 2: W-LAN-Router</i>	97
5.3.3 <i>Endgerät 3: DECT-Basisstation</i>	102
5.3.4 <i>Endgerät 1: Notebook auf den Oberschenkeln</i>	106
5.4 Fazit und Designkriterien zur Expositionsminimierung	108
Zusammenfassung	109
Summary	110
Literatur	111
Anhang	114
Anhang A: Mess- und Berechnungsergebnisse für Richtdiagramme der Endgeräte	115
Anhang B: Tabellen der für die Berechnungen verwendeten Materialdaten ϵ_r , κ , ρ der biologischen Gewebe und der technischen Bauelemente	123

Einleitung

Bei vielen drahtlosen Kommunikationssystemen werden die Endgeräte weder in unmittelbarem Kontakt zum Körper noch weit entfernt, sondern oft in Abständen von Zentimetern bis Dezimetern betrieben. Typische Beispiele sind Basisstationen von Schnurlostelefonen, W-LAN-Router und aktive Funkschnittstellen von PCs oder Notebooks. Zur Exposition des Menschen durch derartige körpernahe Quellen existieren bisher kaum relevante Untersuchungen; erste, bisher nicht verifizierte Zugänge wurden durch die Projekte „Bestimmung der Exposition bei Verwendung kabelloser Übermittlungsverfahren in Haushalt und Büro“ [Schmid et al. 2005] und „Exposition durch körpernahe Sender im Rumpfbereich“ [Christ et al. 2006] aus dem Deutschen Mobilfunkforschungsprogramm eröffnet.

Ziel dieses vom 1.11.2006 bis zum 31.10.2007 bearbeiteten Projektes ist die Bestimmung der Exposition eines Nutzers durch die von den erwähnten typischen Endgeräten ausgehenden elektromagnetischen Felder. Als Kriterium für die Exposition werden die Spezifischen Absorptionsraten (SAR, unterschieden nach Ganzkörper- und maximaler Teilkörper-SAR) herangezogen, nicht die elektrische bzw. magnetische (Ersatz-)Feldstärke. Davon ausgehend ist zu untersuchen, welches Minimierungspotenzial sich für die Spezifische Absorptionsrate durch Modifizierung der Endgeräte - insbesondere durch Variation der Antennengeometrie - bietet, ohne dass die Kommunikationseigenschaften eingeschränkt werden.

Eine messtechnische Vorgehensweise zur vollständigen Beurteilung der ausgewählten elektromagnetischen Expositionssituationen scheidet aus verschiedenen Gründen aus: Selbst wenn die zugrundeliegenden (Nah-)Felder der Endgeräte experimentell hinreichend genau erfassbar wären, bliebe das Problem, die Feld- bzw. SAR-Verteilungen innerhalb des menschlichen Körpers zu ermitteln, was bei lebenden Testpersonen nicht praktikierbar ist und wofür keine anatomisch aufgebauten Messphantome existieren, die mit Feldsonden bestückt werden könnten. Es werden daher – auf der Grundlage ausgereifter Feldlöser der Elektrodynamik und unter Verwendung hoch aufgelöster, anatomisch korrekter 3D-Computermodelle für den Menschen und realistischer Nachbildungen der technischen Geräte – numerische Simulationsrechnungen durchgeführt. Zur Validierung der Rechenmodelle für die Endgeräte werden die ohne Anwesenheit eines Menschmodells numerisch berechneten Abstrahlcharakteristika mit gemessenen Richtdiagrammen der Original-Geräte verglichen.

AP 1 Marktübersicht, Auswahl und Spezifizierung interessierender Endgeräte

In diesem Arbeitspaket wurde - ausgehend von der in [Schmid et al. 2005] gegebenen Übersicht - eine aktuelle Marktrecherche durchgeführt, anhand derer drei Endgeräte unterschiedlicher Anwendungsgebiete ausgewählt wurden, welche hinsichtlich der Zielsetzung der Studie eingehend untersucht werden. Gegenüber der zitierten Studie aus 2005 konnten keine Geräte für neue Anwendungen identifiziert werden. Für die aktuelle Studie „körpernah betriebener Kommunikationsendgeräte“ wurden Video- und Audioübertragungssysteme und Babyüberwachungsgeräte (von letzteren hatte sich in [Schmid et al. 2005] ein Gerät als besonders „strahlungsintensiv“ herausgestellt) nicht in die engere Wahl gezogen, weil sie bei bestimmungsgemäßem Betrieb nicht typischerweise körpernah platziert werden. Auch die für viele Anwendungen in Büro, Haushalt und Kraftfahrzeugen immer beliebter werdenden funktechnischen Systeme, wie z.B. Wetterstationen, Reifendrucksensoren usw. rechtfertigen aufgrund ihrer sehr geringen Sendeleistungen, und weil sie nicht unmittelbar den Kommunikationsgeräten zuzuordnen sind, keine nähere Betrachtung. Die wichtigsten Systeme sind mit einigen technischen Daten in Tabelle I zusammengestellt. Die Informationen über die Frequenzen stammen aus der in Deutschland durch die Bundesnetzagentur geregelten Frequenzordnung, bei Mehrfachnennungen wurden nur die Angaben für den ‚inhouse‘-Bereich übernommen.

Die Entscheidung über die hier zu untersuchenden Endgeräte fiel anhand der Kriterien „weite Verbreitung“, „lange Benutzungszeiten“ und „möglichst hohe Ausgangsleistung“ zugunsten eines Notebooks mit Einstecksystemen unterschiedlicher Funk-Dienste, eines W-LAN-Routers und eines DECT-Schnurlostelefon. Bei der konkreten Produktauswahl wurden noch Informationen über die „Marktgängigkeit“ verschiedener Modelle der Endgeräte mit berücksichtigt, die bei mehreren großen Elektronikkaufhäusern erfragt wurden.

Beschafft wurden schließlich

- eine GPRS-, UMTS- und W-LAN-fähige PCMCIA-Karte Typ T-Mobile wnw Card W-LAN und ein Bluetooth-USB-Adapter Typ BlueFritz! USB v2.0 (Klasse 1) mit Notebook Typ LENOVO Thinkpad T 60
- ein W-LAN-Router Typ D-Link DI-524 und
- ein DECT-Telefon Typ Siemens Gigaset A160.

Bezeichnung	Anwendung	Frequenz [MHz]	Max. mittlere Leistung oder EIRP (e)	TPC*	Verbreitung
(E-)GSM900 GSM1800 uplink	PCMCIA-Schnittstellen	(880)890-915 1.710-1.785	240 mW** 120 mW**	x	sehr stark
UMTS uplink	PCMCIA-Schnittstellen	1.920-1.980	200 mW***	x	noch wenig
DECT-System	Schnurlostelefon Basisstation	1.880-1.900 ⁺	9,2 mW e 215,8 mW****e	-	stark
W-LAN-Systeme	Datenübertragungs- netzwerke für				
- IEEE 802.11a	max. 54 Mbps	5.150-5.350 ⁺ 5.725-5.825 ⁺⁺	30 mW***** e	-	kaum
- IEEE 802.11b	max. 11 Mbps	2.400-2.483,5 ⁺	100 mW e	-	noch stark
- IEEE 802.11g	max. 54 Mbps	2.400-2.483,5 ⁺	100 mW e	-	sehr stark
- IEEE 802.11h	max. 54 Mbps	5.150-5.350 ⁺ 5.725-5.825 ⁺⁺	200 mW e 1000 mW e	x	noch wenig
- IEEE 802.11n	max. 600 Mbps	2.400-2.483,5 ⁺			in Etablierung
- IEEE 802.11p	Kommunikation zwischen Fahrzeugen	5.850-5.925			in Entwicklung
HiperLAN/2		5.150-5.350 ⁺ 5.470-5.725 ⁺	200 mW e 1000 mW e	x	kaum noch Marktchancen
Hiperaccess	max. 25 Mbps (km-Bereich)	40.500-43.500			kaum noch Marktchancen
HiperMAN	max. 155 Mbps (Stadt-Bereich)	2.000-11.000			kaum noch Marktchancen
Bluetooth	max. 723 kbps (typ. < 10 m; max. 100 m)				
- Klasse I		2.400-2.485 ⁺⁺	100 mW	x	stark
- Klasse II		2.400-2.485 ⁺⁺	2,5 mW	-	stark
- Klasse III		2.400-2.485 ⁺⁺	1 mW	-	stark
Wireless FireWire IEEE 802.15.3	Vernetzung von DVD- Playern, Festplatten, etc. max. 55 Mbps (bis 100 m)	2.400-2.485 ⁺⁺			in Etablierung
Babyphones (auch DECT)	Akustische Überwachung (Reichweite lt. Hersteller zw. 50 m und 3 km)	27-27,2 ⁺ 433,05-434,8 ⁺⁺ 2.400-2.485 ⁺⁺	82 mW bis 500 mW	teils	mäßig
Funk- Maus/Tastatur (auch Bluetooth)	Drahtlose Rechnerbedie- nung	~27 ⁺⁺	< 10 mW	-	stark
AV/TV-Link	HiFi/Video-Funkübertra- gung (bis 100 m bei LOS)	2.400-2.485 ⁺⁺	bis 100 mW	-	mäßig
Funk-Kopfhörer (auch Bluetooth)	Sprach- und Musik- Übertragung	863-865 ⁺	~16 mW	-	mäßig

Tabelle I: Verschiedene Kommunikationssysteme und -standards (*TPC Transmit Power Control (automatische Sendeleistungsregelung); ** power class 4, bei GPRS-Betrieb: x4 (multislot class 12); *** power class 1 und crest factor 10 dB; **** high capacity burst; ***** in Europa; ⁺durch Bundesnetzagentur allgemein zugeteilte Frequenzen; ⁺⁺ weltweit unlizensiertes ISM-Frequenzband

Die ausgewählten emittierenden Endgeräte werden von den Herstellern bezüglich der hier hauptsächlich interessierenden Eigenschaften (Frequenz, Leistung) wie folgt spezifiziert:

- **PCMCIA-Karte Typ T-Mobile wnw Card W-LAN**
GPRS-Betrieb: Nennfrequenz 900 MHz; max. Sendeleistung 2 W (power class 4)
UMTS-Betrieb: Nennfrequenz 1.950 MHz; max. Sendeleistung 250 mW (power class 3)
W-LAN-Betrieb gemäß IEEE 802.11g: Frequenzbereich 2.412 – 2.462 MHz,
max. Sendeleistung 89 mW
 - **Bluetooth-USB-Adapter Typ BlueFritz! USB v2.0**
Klasse 1; Frequenzbereich o.A. (lt. Bluetooth-Standard 2.402 – 2.480 MHz);
max. Sendeleistung 100 mW
 - **W-LAN-Router Typ D-Link DI-524**
IEEE 802.11g; Frequenzbereich 2.4 – 2.462 MHz, max. Sendeleistung 50 mW
 - **DECT-Telefon Typ Siemens Gigaset A160**
Frequenzbereich 1.880 – 1.930 (?) MHz ^a;
max. Sendeleistung 10 mW ^b
- a) Kommentar 1: lt. DECT-Standard: 1.880 – 1.900 MHz
(vgl. [BNetzA]: Frequenzordnung, Allgemeinzuteilung, Vfg 66 / 2003)
- b) Kommentar 2: gemäß DECT-Standard:
9,2 mW (EIRP bei 1 Nutzer und Normalbetrieb);
211,7 mW (theor. max. EIRP bei Multiuser-Vollauslastung im Normalbetrieb);
215,8 mW (theor. max. EIRP bei Vollauslastung und 'high capacity burst'-Betriebsart)

Da die Geräte – mit Ausnahme des Notebooks – zwecks Ermittlung der von den Herstellern verwendeten Antennenstrukturen zu öffnen und für die späteren Messungen auch zu modifizieren waren, wurden sie in doppelter Ausfertigung gekauft. Die Bilder 1 – 6 zeigen Außen- und gegebenenfalls Innenansichten der für die Untersuchungen vorgesehenen Endgeräte.



Bild 1: Notebook LENOVO Thinkpad T 60 mit eingesetzter PCMCIA-Karte Typ T-Mobile wnw Card W-LAN (typ. Nutzerentfernung: 1 – 50 cm)

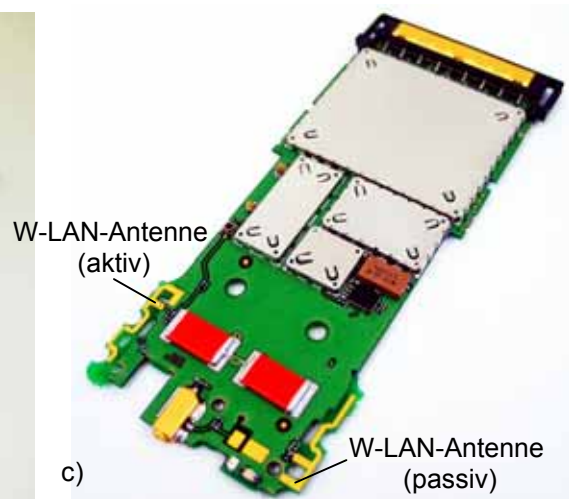


a)



b)

UMTS-/GPRS -
Antenne



c)

W-LAN-Antenne
(aktiv)

W-LAN-Antenne
(passiv)



d)

Bild 2: PCMCIA-Karte Typ T-Mobile wnw Card W-LAN

a) Außenansicht der Ober- und Unterseite

b) Oberseite der Platine mit aufgeschraubter UMTS-/GPRS-Multiband-Antenne

c) Oberseite der Platine mit abgenommener UMTS-/GPRS-Antenne. Die darunterliegende planare W-LAN-'inverted F'-Antenne wird sichtbar

d) Unterseite der Platine



Bild 3: Notebook LENOVO Thinkpad T 60 mit eingesetztem Bluetooth-USB-Adapter Typ BlueFritz!
USB v2.0 (typ. Nutzerentfernung: 1 – 50 cm)



a)



b)

Bild 4: Bluetooth-USB-Adapter Typ BlueFritz! USB v2.0
a) Außenansicht
b) Oberseite der Platine mit 2.450 MHz-Antenne

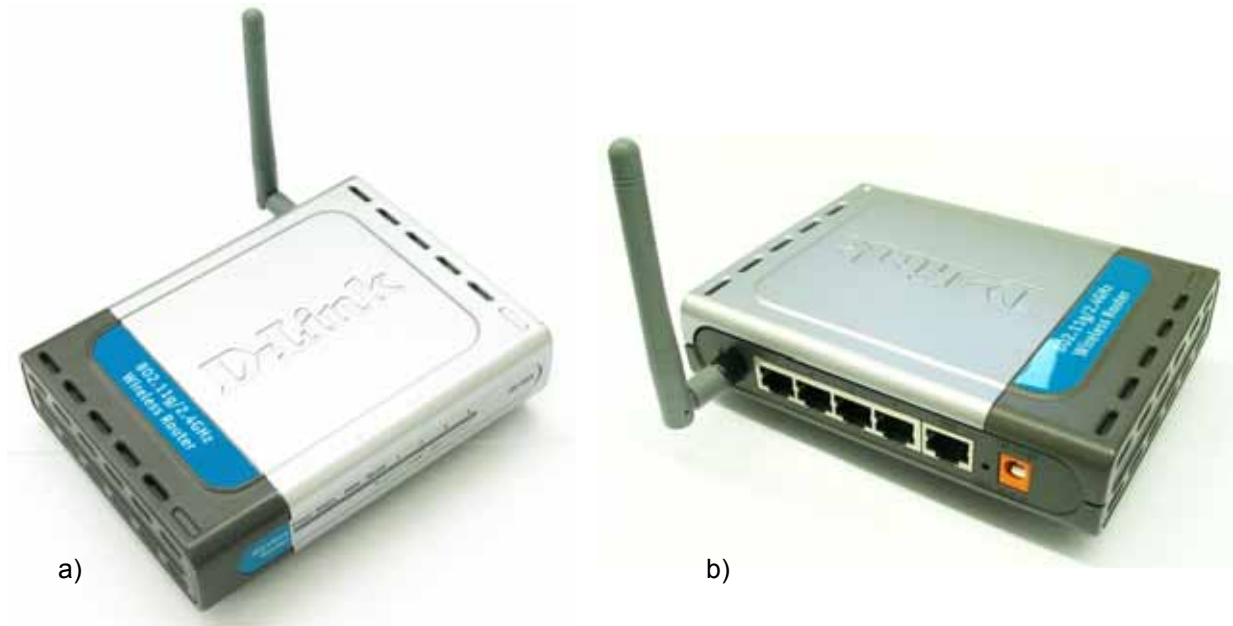


Bild 5: W-LAN-Router Typ D-Link DI-524 (typ. Nutzerentfernung: > 40 cm)
 a) Ansicht der Frontseite
 b) Ansicht der Rückseite mit Dipolantenne



Bild 6: DECT-Schnurlostelefon Typ Siemens Gigaset A160 (typ. Nutzerentfernung: 40 cm)
 a) Gesamtansicht
 b) Außenansicht der Basisstation
 c) Oberseite der Basisstations-Platine mit 'inverted-F'-Antenne

AP 2 Auswahl von Szenarien und Modellbildung

2.1 Prinzipielle Vorgehensweise

Ziel dieses Arbeitspakets war zum einen die Auswahl von Konfigurationen, die einen realistischen Einsatz der Endgeräte widerspiegeln. Darunter ist beispielsweise die Positionierung der Geräte in Bezug auf den Benutzer zu verstehen, aber auch die Körperhaltung der Person sowie die nähere Umgebung, in die das Szenario "Mensch - Endgerät" eingebettet ist. Wie in der Einleitung bereits anklung, lässt sich die Problemstellung nur durch numerische Berechnungen adäquat behandeln. Daher bestand ein weiteres Ziel darin, Computermodelle sowohl für die Endgeräte als auch für den menschlichen Körper bereitzustellen.

2.2 Festlegung der Konfigurationen

Zum Endgerät 1 (Notebook-Funkschnittstelle) wird als Grundszenario eine Person (Erwachsener bzw. Jugendlicher) betrachtet, die entweder an einem Schreibtisch mit darauf platziertem Notebook sitzt oder das Notebook auf den Oberschenkeln abgelegt hat (vgl. Bild 7). Alle bei den Frequenzen 900, 1.950 bzw. 2.450 MHz emittierenden GPRS-, UMTS-, W-LAN- oder Bluetooth-Schnittstellen werden separat voneinander berücksichtigt. Da aufgrund von Voruntersuchungen nicht erwartet wird, dass bei körpernahen Quellen, außer evtl. durch den Schreibtisch und den Stuhl, ein relevanter Einfluss durch endlich große Objekte in der entfernteren Umgebung (Schränke und andere Einrichtungsgegenstände) auf die Feld- bzw. SAR-Verteilungen ausgeübt wird, ist das Szenario „Person/Notebook/Stuhl/Schreibtisch“ in den ansonsten freien Raum eingebettet. Zur Absicherung werden als 'worst case'-Szenario metallische Wände nahe der Person installiert, um quantitative Aussagen über das Störpotenzial der Umgebung zu gewinnen. Es wird ferner untersucht, welche Unterschiede sich ergeben, wenn das Notebook in auf- oder zugeklapptem Zustand mit den Funkschnittstellen betrieben wird. Tabelle IIa enthält die Parameterkombinationen der für das Endgerät 1 durchgeführten Einzelfalluntersuchungen.

Das Endgerät 2 (W-LAN-Router) wird zunächst ebenfalls als Tischgerät in das Szenario eingefügt. Der Schreibtisch steht dabei an einer Wand, die geschlossen oder mit einem Fenster versehen ist. Der Router wird aber auch - wie in der Realität häufig anzutreffen - unter dem Schreibtisch auf dem Fußboden platziert, wobei die Exposition für sitzende und am Schreibtisch stehende Personen bestimmt wird. Außerdem wird der Router als wandmontiertes Gerät modelliert, sodass der Kopf einer davor stehenden Person dem Sender relativ nahe kommt (vgl. Bild 8). Die untersuchten Szenarien sind im Einzelnen dem oberen Teil der Tabelle IIb zu entnehmen.

Endgerät 3 (DECT-Basisstation) steht - allein oder mit aufgelegtem Mobilteil - in Griffweite der Person auf dem Schreibtisch. Es werden sitzende und stehende Personen sowie hinter dem Schreibtisch eine Wand mit Fenster bzw. ein fensterloses Wandelement angenommen. Bei einem Szenario steht zusätzlich zur emittierenden DECT-Basisstation ein aufgeklapptes Notebook auf dem Schreibtisch. Die konkreten Konfigurationen sind im unteren Teil von Tabelle IIb zusammengestellt.

2.3 Körpermodelle

Mittlerweile steht eine Reihe von je nach Zielsetzung mehr oder weniger geeigneten kommerziellen oder frei verfügbaren anatomischen Personenmodellen für numerische Feldberechnungen zur Verfügung. Eine kurze Übersicht bisher entwickelter Modelle enthält beispielsweise die Norm DIN EN 62311 [DIN 2007] im Anhang C oder [Nagaoka et al. 2004].

Oft wurden in der Vergangenheit für Vergleiche mit Messungen, aber auch für numerische Abschätzungen, vereinfachte Körper- bzw. Teilkörpermodelle unterschiedlicher Geometrie und innerer Struktur benutzt. Die schlichteste Ausführung stellt das dem messtechnischen Pendant nachempfundene Flachphantom dar, gefolgt von weiteren homogen gefüllten, durch gekrümmte Oberflächen schon eher an menschliche Körperformen erinnernde Geometrien bis hin zu Modellen mit realistischer äußerer Formgebung des Kopfes oder auch des ganzen Körpers, die im Inneren homogen oder schalenförmig aufgebaut sind. Durch die Verfügbarkeit immer leistungsfähigerer Feldlöser und Rechner ist die Bedeutung einfacher Körpermodelle – abgesehen von Simulationsrechnungen für Messverfahren, bei denen nur die Verwendung flüssigkeits- oder gelgefüllter Körperphantome praktikabel ist – stark zurückgedrängt worden[#]. Auch in der Leistungsbeschreibung des Auftraggebers zu diesem Forschungsvorhaben wird die Verwendung homogener Körpermodelle ausgeschlossen.

[#]Außerdem sind früher in der Literatur aufgestellte Behauptungen, mit stark vereinfachten Körpermodellen oder Messphantomen eine konservative, aber realistische Abschätzung bezüglich der SAR sicher gewährleisten zu können, durch verschiedene Untersuchungen widerlegt. Als Beispiel seien die in [Christ et al. 2006] und in [Schmid et al. 2005] dargestellten Rechenergebnisse zum Vergleich zwischen Flachphantom und anatomischem Körpermodell angeführt, die in Einzelbeispielen Unterschätzungen der lokalen SAR durch den Flachphantom-Ansatz um bis zu ca. 54% belegen. Ein Teil dieser Abweichungen wird der unzulänglichen Modellbildung in der Simulation angelastet, die Ergebnisse wurden aber auch nur an einem einzigen anatomischen Modell verifiziert. Bei Berücksichtigung der anatomischen Variabilitäten realer Körper sind noch weitaus größere Abweichungen, auch in die "unsichere" Richtung, zu erwarten.

Endgerät	Szenario	System (f [MHz])	Personenmodell				Anordnung Endgerät				Umgebung	
			Erwachsener		Jugendlicher		Notebook				Wände	Freiraum
1: Funkschnittstellen-Karte			stehend	sitzend	stehend	sitzend	offen	geschl.	Tisch	Knie		
ohne Notebook (Referenz)	1	UMTS (1.950)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X
mit Notebook	2	UMTS (1.950)	-	X	-	-	X	-	-	X	-	X
mit Notebook	3	UMTS (1.950)	-	-	-	X	X	-	-	X	-	X
mit Notebook	4	UMTS (1.950)	-	X	-	-	X	-	X	-	-	X
mit Notebook	5	UMTS (1.950)	-	-	-	X	X	-	X	-	-	X
mit Notebook	6	UMTS (1.950)	-	-	-	X	-	X	X	-	-	X
ohne Notebook (Referenz)	7	GPRS (900)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X
mit Notebook	8	GPRS (900)	-	X	-	-	X	-	-	X	-	X
mit Notebook	9	GPRS (900)	-	-	-	X	X	-	-	X	-	X
mit Notebook	10	GPRS (900)	-	X	-	-	X	-	X	-	-	X
mit Notebook	11	GPRS (900)	-	-	-	X	X	-	X	-	-	X
mit Notebook	12	GPRS (900)	-	-	-	X	-	X	X	-	-	X
ohne Notebook (Referenz)	13	W-LAN (2.450)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X
mit Notebook	14	W-LAN (2.450)	-	X	-	-	X	-	-	X	-	X
mit Notebook	15	W-LAN (2.450)	-	X	-	-	X	-	X	-	-	X
mit Notebook	16	W-LAN (2.450)	-	-	-	X	X	-	X	-	-	X
mit Notebook	17	W-LAN (2.450)	-	-	-	X	-	X	X	-	-	X
ohne Notebook (Referenz)	18	Bluetooth (2.450)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X
mit Notebook	19	Bluetooth (2.450)	-	X	-	-	X	-	-	X	-	X
mit Notebook	20	Bluetooth (2.450)	-	-	-	X	X	-	-	X	-	X
mit Notebook	21	Bluetooth (2.450)	-	X	-	-	X	-	X	-	-	X
mit Notebook	22	Bluetooth (2.450)	-	-	-	X	-	X	X	-	-	X
mit Notebook	23	UMTS (1.950)	-	X	-	-	X	-	X	-	X	-
mit Notebook	24	GPRS (900)	-	X	-	-	X	-	X	-	X	-
mit Notebook	25	W-LAN (2.450)	-	X	-	-	X	-	X	-	X	-

Tabelle IIa: Szenarien für Endgerät 1

Endgerät	Szenario	System (f [MHz])	Personenmodell				Anordnung Endgerät			Umgebung	
			Erwachsener		Jugendlicher		Router			Freiraum oder	
			stehend	sitzend	stehend	sitzend	Tisch	Wand	Boden	Wand	Fenster
2: W-LAN-Router											
Referenz für Messung	1	W-LAN (2.450)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	W-LAN (2.450)	-	x	-	-	x	-	-	-	x
	3	W-LAN (2.450)	-	-	-	x	x	-	-	-	x
	4	W-LAN (2.450)	-	x	-	-	x	-	-	x	-
	5	W-LAN (2.450)	-	-	-	x	x	-	-	x	-
	6	W-LAN (2.450)	x	-	-	-	--	x	-	x	-
	7	W-LAN (2.450)	-	-	x	-	-	x	-	x	-
	8	W-LAN (2.450)	-	x	-	-	-	-	x	-	-
	9	W-LAN (2.450)	-	-	-	x	-	-	x	-	-
	10	W-LAN (2.450)	x	-	-	-	-	-	x	-	-
	11	W-LAN (2.450)	-	-	x	-	-	-	x	-	-
3: DECT-Basisstation											
			stehend	sitzend	stehend	sitzend	Basisstation auf Tisch mit(x) / ohne(-) Mobilteil			Freiraum oder	
Referenz für Messung	1	DECT (1.900)	-	-	-	-				-	-
	2	DECT (1.900)	-	x	-	-				-	x
	3	DECT (1.900)	-	-	-	x				-	x
	4	DECT (1.900)	-	x	-	-				x	-
	5	DECT (1.900)	-	-	-	x				x	-
	6	DECT (1.900)	x	-	-	-				-	x
	7	DECT (1.900)	-	-	x	-				-	x
	8	DECT (1.900)	x	-	-	-				x	-
	9	DECT (1.900)	-	-	x	-				x	-
	10	DECT (1.900)	-	x	-	-			x	x	-
	11	DECT (1.900)	-	-	-	x			x	x	-
	12	DECT (1.900)	-	x	-	-			x	-	x
	13	DECT (1.900)	-	-	-	x			x	-	x
	14	DECT (1.900)	x	-	-	-			x	x	-
	15	DECT (1.900)	-	-	x	-			x	x	-
	16	DECT (1.900)	-	x	-	-			mit aufgeklapptem Notebook	x	-

Tabelle IIb: Szenarien für Endgeräte 2 und 3



Bild 7: Beispielszenarien mit sitzender Person und Endgeräten
a) auf dem Schreibtisch oder b) auf den Oberschenkeln



Bild 8: Beispielszenario mit stehender Person vor wandmontiertem W-LAN-Router

Ausgangspunkt für die numerische Dosimetrie ist hier daher das weltweit bisher wohl am häufigsten verwendete, von den Brooks Air Force Base Laboratories öffentlich bereitgestellte anatomisch korrekte Modell eines männlichen Erwachsenen. Darin wurden die im 'Visible Human Project' der National Library of Medicine [NLM 1986] aus 1878 Transversalschnitten einer gefrorenen Leiche gewonnenen anatomischen Rohdaten, die als digitale fotografische Farbbilder mit 24 bit Informationstiefe und einer Auflösung von 0,32 mm x 0,32 mm in Querrichtung und 1 mm in Richtung der Körperlängsachse vorliegen, durch kubische 1 mm³-Voxel diskretisiert, denen gewebespezifische dielektrische Parameter (Permittivität und Leitfähigkeit) und Dichten zugeordnet wurden. Ungeachtet des tatsächlichen Körpergewichts von 199 lb. [Spitzer et al. 1996] (ca. 90,26 kg) ergibt sich mit den Brooks-Originaldaten für das Modell eine Körpermasse von ca. 105 kg[#] bei einer Länge von 1,88 m^{##}. Bild 9 zeigt eine 3D-Ansicht und zwei Längsschnitte dieses Körpermodells.

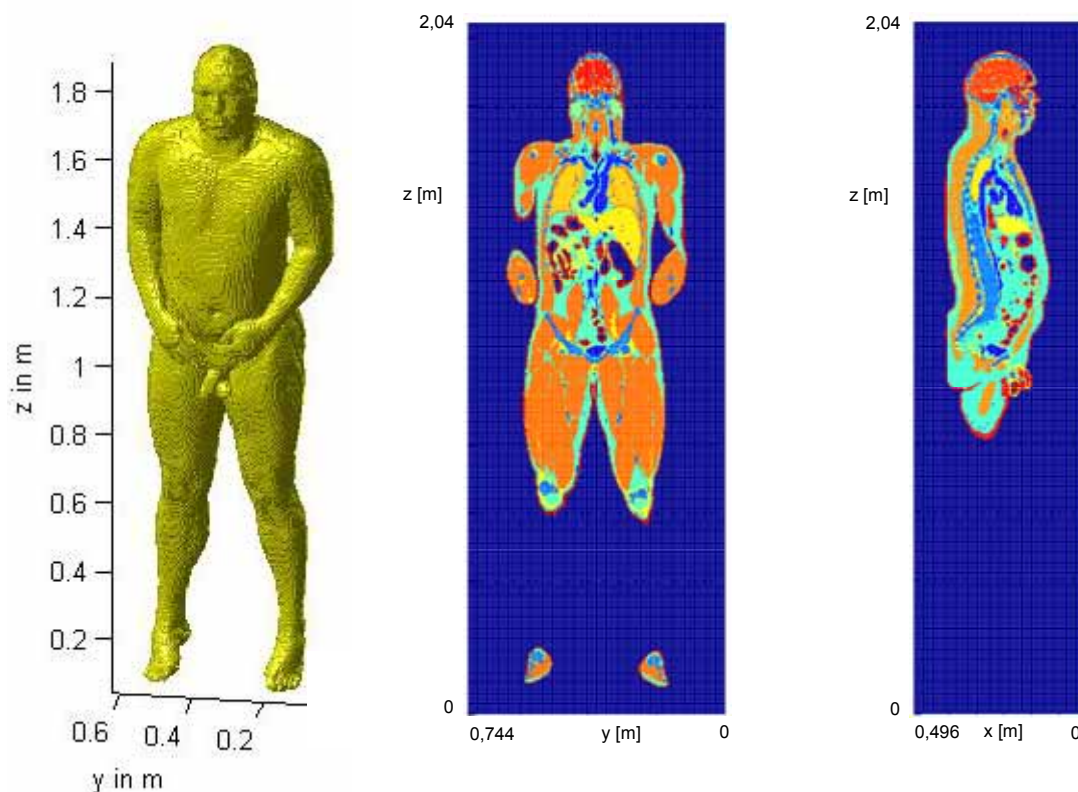


Bild 9: 3D-Ansicht und zwei Längsschnitte durch das 105 kg-Menschmodell nach "Brooks"

Die häufig geäußerte Kritik an dem Menschmodell der Brooks Air Force Base Laboratories, der Körperbau spiegle nicht den eines typischen männlichen Erwachsenen wider, hat zu wiederholten Aufforderungen geführt, neue Modell-Familien mit realistischeren Menschmodellen zu erstellen. Entsprechende Arbeiten wurden mittlerweile z.B. von IT'IS vorgenommen und sind sicherlich äußerst wertvoll. Da aber zu Beginn des vorliegenden Projekts neue Personenmodelle noch nicht durch unabhängige Wissenschaftlergruppen validiert und wie der von „Brooks“ umgesetzte 'visible human' frei verfügbar waren, wurde – auch aus Gründen der Vergleichbarkeit – der bisherige Standard angewandt.

Da im Rahmen dieses Projektes die räumliche SAR-Verteilung im gesamten Volumen des Körpermodells berechnet werden muss, ist trotz der Benutzung eines Großrechners mit paralleler Prozessorstruktur in Anbetracht der Vielzahl von Fallrechnungen eine Verringerung der Rechenzeiten durch Reduzierung der Voxelanzahl notwendig.

Es wird daher neben einem mit 1 mm aufgelösten Kopfmodell und einem 2 mm-Voxel-Ganzkörpermodell, die für Referenzberechnungen verwendet werden, mit einem inhomogen aufgelösten Körpermodell gearbeitet (lineare Auflösung maximal 4 mm; 1 mm senkrecht zu Koordinaten-Teilflächen, die durch die Endgeräte verlaufen, 2 mm im Übergangsbereich).

[#] Es muss betont werden, dass es ein einheitliches 'visible human'-Modell nicht gibt, sondern diverse Modelle, die trotz der Verwendung der Rohdaten des 'Visible Human Project' je nach gewählter Auflösung, Vorgehensweise bei der Diskretisierung, Anzahl der unterschiedlichen Gewebearten und Wahl der Gewebeparameter voneinander abweichen können. Eine auffällige und für die Bestimmung der Ganzkörper-SAR wichtige Kenngröße ist immer die Körpermasse. Dabei ist anhand der zur Verfügung gestellten Angaben häufig nicht nachzuvollziehen, welche Maßnahmen bei der Modellierung dazu geführt haben, dass sich im Einzelfall eine kleinere (Bsp.: 90,3 kg [Christ et al. 2006]) oder eine größere (Bsp.: 103 kg [Bernardi et al. 2003]) Gesamtmasse für das jeweilige Modell ergibt.

^{##} Unterschiedliche Längenangaben von 1,80 m bzw. 1,88 m erklären sich dadurch, dass entweder die Strecke vom Scheitel bis zur Ferse oder bis zu den nach unten gestreckten Zehen als Maß zugrundegelegt wird.

Darüber hinaus wurde durch Anwinkelung der Knie-, Hüft- und Ellenbogengelenke ein sitzendes Personenmodell mit inhomogener Auflösung wie oben generiert, um die Situation am Schreibtisch realitätsnah nachbilden zu können.

Durch Skalierung der beschriebenen Modelle (im Folgenden „Erwachsener“ genannt) wurde an der Bergischen Universität Wuppertal das Modell eines in der europäischen Normgebung DIN EN 50383 [DIN 2002] eingeführten „16 Jahre alten Arbeitnehmers“ mit einer vorgegebenen Körpermasse von 42 kg erstellt (im Folgenden „Jugendlicher“ genannt). Um die gewünschte Masse zu erhalten, wurde die ursprüngliche Kantenlänge aller Volumenelemente mit dem Faktor $\sqrt[3]{42/105} \approx 0,73$ multipliziert. Somit ergibt sich eine Größe des „leichten“ Körpermodells von ca. 1,36 m bei konservierten Proportionen. Die größte lineare Auflösung beträgt bei diesem Modell 2,9 mm. Die Materialparameter wurden im Vergleich zum Erwachsenen-Modell unverändert übernommen.

Für jede zu betrachtende Frequenz müssen andere Parametersätze für die elektrischen Materialdaten (Permittivität ϵ_r und Leitfähigkeit σ) der 40 berücksichtigten unterschiedlichen Gewebearten in den Körpermodellen verwendet werden.

Tabellen mit den Gewebeparametern für alle betrachteten Frequenzen sind dem Anhang beigelegt.

2.4 Gerätemodelle

In den numerischen Berechnungen werden realistische Computermodelle der ausgewählten Endgeräte als Feldquellen eingesetzt. Es wurde angestrebt, anhand der Topologie des tatsächlichen Gerätes ein Simulationsmodell zu erstellen, das insbesondere die Antenne möglichst originalgetreu nachbildet, aber auch die spezifische Gehäuseform und die Geometrie der Schaltungsplatinen erkennen lässt, wobei großflächig mit elektronischen Bauelementen bestückte Bereiche durch Metallisierungen nachgebildet wurden. Teilweise wurde in einem zweiten Schritt aus dem originalgetreuen Modell ein leicht vereinfachtes Modell entwickelt und validiert, das optimal dem kartesischen Diskretisierungsgitter des angewandten Rechenverfahrens angepasst ist. Die räumliche Auflösung beträgt dabei $1 \text{ mm}^{\#}$.

Die nachstehenden Bilder 10 - 14 zeigen die verwendeten Modelle. Die modell- und frequenzabhängigen Materialdaten für Kunststoffgehäuse und Platinenmaterial sind ebenfalls im Anhang tabelliert.

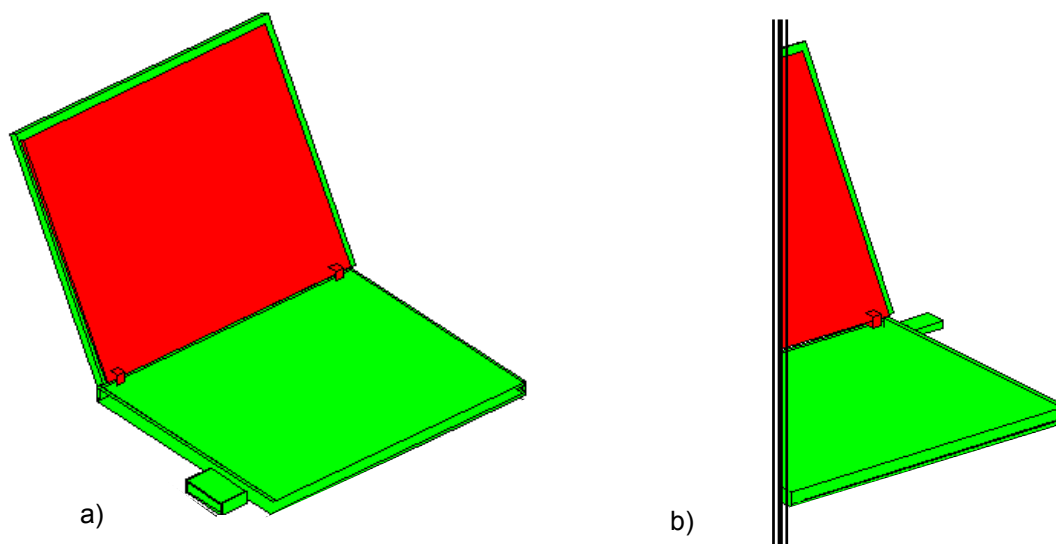


Bild 10: Rechenmodell des Notebooks mit a) PCMCIA-Karte bzw. b) Bluetooth-USB-Adapter
Das Modell besteht aus einem zweiteiligen Kunststoffgehäuse aus Polyvinylchlorid (PVC-U) mit leitend verbundenen metallischen Kernen (nur beim offenen Bildschirmteil sichtbar). Es existieren eine geschlossene Version und zwei Modelle, bei denen der Bildschirmteil um 90° oder 120° aufgeklappt ist.

[#] Für manche Anwendungen, bei denen die Nachbildung sehr fein strukturierter Objekte (z.B. der Bauelemente auf der Platine) notwendig ist, müssen Modelle mit feineren Auflösungen verwendet werden. Dann wäre aber auch das Lösungsvolumen deutlich kleiner als die Ausdehnung der hier zu untersuchenden Szenarien zu wählen, um die Anzahl der durch das Rechenverfahren zu lösenden Unbekannten (vgl. Abschnitt 3.2) in den von leistungsfähigen Computern handhabbaren Grenzen zu halten.

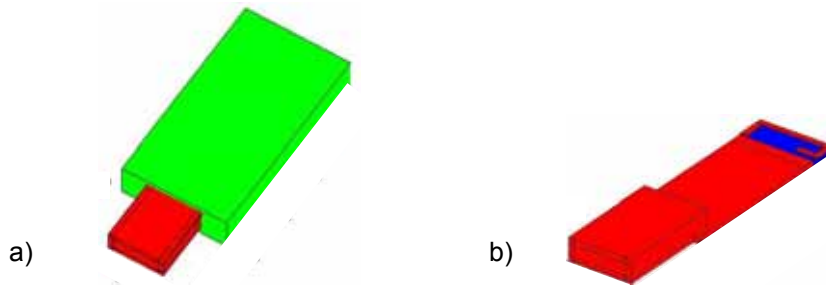


Bild 11: Rechenmodell des Bluetooth-USB-Adapters a) mit und b) ohne PVC-U-Gehäuse
Blau ist das Substratmaterial RO4003C der Platine dargestellt, rot die Metallisierungen.

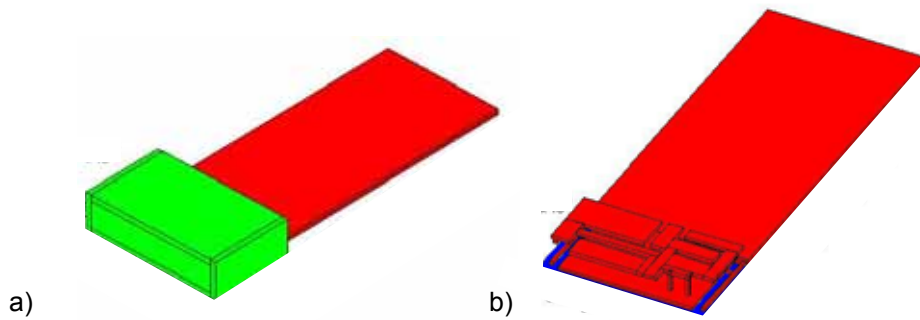


Bild 12: Rechenmodell der PCMCIA-Karte a) mit PVC-U-Gehäuse und b) geöffnet, mit vereinfachten Multiband- und W-LAN-Antennen, die über der Leiterplatte angeordnet sind.

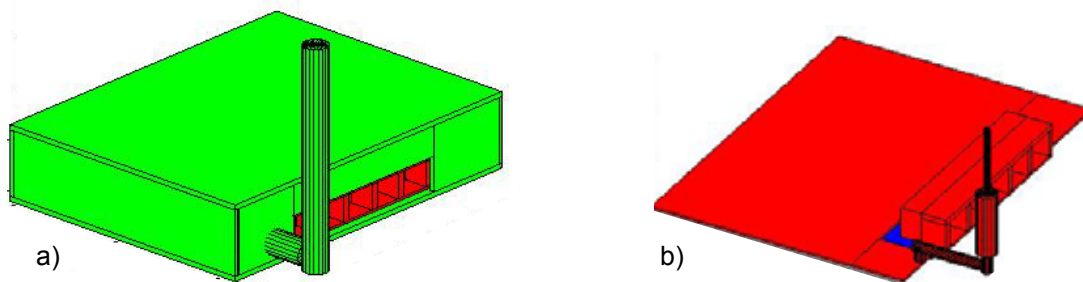
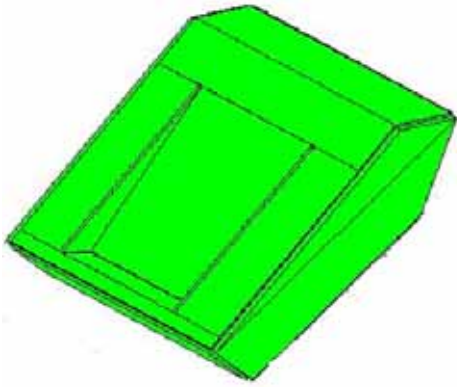
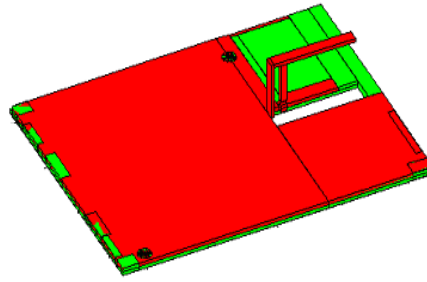


Bild 13: Rechenmodell des W-LAN-Routers a) mit Gehäuse aus Polycarbonat + ABS (Acrylnitril-Butadien-Styrol) und b) geöffnet, mit Platine, Steckerleiste und Dipolantenne mit Sperrtopf



a)



b)

Bild 14: Rechenmodell der DECT-Basisstation: a) Gehäuse aus ABS und b) Platine, bestehend aus Substrat RO4003C und Metallisierung, mit 'inverted F'-Antenne

AP 3 Simulationsrechnungen zur Feldbestimmung

Zur numerischen Simulation der in Abschnitt 2.2 festgelegten Szenarien muss auf Einzelfallberechnungen unter Verwendung der genannten Körpermodelle in Kombination mit den verschiedenen, möglichst realistisch modellierten Endgeräten - ggfs. auch unter Berücksichtigung von Umgebungseinflüssen - zurückgegriffen werden.

3.1 Verfügbare Feldberechnungsverfahren

Seit Maxwell im Jahr 1873 die später nach ihm benannte Theorie formulierte [Maxwell 1873], sind sämtliche elektromagnetischen Erscheinungen grundsätzlich auf äußerst kompakte Weise beschreibbar. Dennoch ist der Aufwand, um bei einer konkreten Problemstellung zu einer brauchbaren Lösung für die Felder zu gelangen, in der Regel erheblich. Analytische Lösungen der Maxwell'schen Gleichungen existieren nur für eine begrenzte Anzahl von Fällen, die - von wenigen Ausnahmen abgesehen - kaum praktische Bedeutung haben. Bei komplizierten Geometrien und realistischen Materialverteilungen ist die Berechnung elektromagnetischer Felder meist nur mit Hilfe numerischer Verfahren möglich.

Die direkteste Vorgehensweise besteht dabei in einer Diskretisierung der Maxwell'schen Gleichungen im gesamten Lösungsraum. Dazu wird z.B. von den Maxwell'schen Gleichungen in Differenzialform ausgegangen. Werden die Differenzialausdrücke durch Differenzenquotienten ersetzt, führt dies auf die Methode der Finiten Differenzen (FD), die meist zur Berechnung von Lösungen im Zeitbereich als so genannte FDTD (Finite Difference Time Domain)-Methode verwendet wird [Kunz and Luebbers, 1993; Taflove 1995; Taflove and Hagness 2005]. Die elektrischen und magnetischen Feldstärken werden bei FD-Verfahren nur in diskreten Punkten des Lösungsgebietes berechnet und hängen nur von den Feldwerten in den jeweiligen Nachbarpunkten ab. Daher gehören FD-Verfahren zur Gruppe der so genannten lokalen Feldberechnungsverfahren. Es resultieren lineare algebraische Gleichungssysteme, die nur schwach besetzt sind, und es können beliebig inhomogene Materialverteilungen berücksichtigt werden. Beliebiger bedeutet in diesem Zusammenhang, dass der Grad der Inhomogenität nur durch den benötigten Rechenzeit- und Speicherbedarf sowie die Art der Diskretisierung eingeschränkt wird. Um bei der Anwendung der FDTD trotz des durch den Ansatz bedingten relativ homogenen Gitters auch sehr fein strukturierte Körper mit einem vertretbaren Aufwand an Rechenressourcen modellieren zu können, kann auf Techniken wie Untergitter (s. z.B. [Mayer et al. 2002; Donderici and Teixeira 2005]) und partiell mit Material gefüllte Zellen (s. z.B. [Railton and Schneider 1999; Marrocco et al. 1998]) zurückgegriffen werden. Eng mit der FDTD verwandt ist die Finite Integrationstechnik (FIT) [Weiland 1996], die von der Integraldarstellung der Maxwell'schen Gleichungen ausgeht und in einen zur FDTD äquivalenten Algorithmus mündet.

Weitere Verfahren aus der Gruppe der lokalen Methoden sind die Transmission Line Modeling (TLM)-Methode [Christopoulos 1995], bei der der Lösungsraum mit einem Gitternetz aus Übertragungsleitungen diskretisiert wird, und die Methode der Finiten Elemente (FE), die von einer so genannten schwachen Formulierung des Feldproblems ausgeht und die Methoden der Variationsrechnung nutzt. Eine schwache Formulierung des Feldproblems bedeutet, dass integrale Ausdrücke (Energien usw.) betrachtet werden, die gewisse Stationaritätseigenschaften aufweisen. Grundlegende Darstellungen der FE-Methode sind z.B. in [Silvester and Ferrari 1990; Braess 1992; Jin 1993] enthalten. Die von früheren FE-Anwendungen her bekannte Problematik der so genannten 'spurious modes', die eine nicht physikalische Verfälschung der Feldlösungen zur Folge haben können, kann spätestens seit den 90er Jahren als gelöst betrachtet werden. Die FE-Methode wird nahezu ausschließlich im Frequenzbereich eingesetzt, es sind jedoch auch Zeitbereichsformulierungen verfügbar (s. z.B. [Lee and Buris 1994]).

Lokale Verfahren haben für viele Feldprobleme, wie z.B. Antennenberechnungen, den Nachteil, dass der Lösungsraum unendlich groß ist und entsprechend nicht mit endlichem Aufwand diskretisiert werden kann. Somit besteht die Notwendigkeit, das Lösungsgebiet durch Verwendung einer Randbedingung einzuschränken, möglichst ohne das Feldverhalten im interessierenden Raumbereich zu verändern. Von den verschiedenen physikalisch oder rein numerisch begründeten Ansätzen, rückwirkungs-freie Randbedingungen zu erzeugen, wird derzeit wahrscheinlich der auf [Berenger 1994; 1996] zurückgehende 'perfectly matched layer' (PML) am häufigsten eingesetzt.

Eine weitere Möglichkeit, numerische Feldberechnungsverfahren zu entwerfen, besteht darin, zunächst analytische Umformungen der Maxwell'schen Gleichungen vorzunehmen, beispielsweise auf der Grundlage der Integralsätze der Vektoranalysis, um daraus Integraldarstellungen der Felder in Abhängigkeit von Quellverteilungen zu formulieren. Weil die Wirkung einzelner Quellen an jedem Ort eines Lösungsgebietes unmittelbar identifiziert werden kann, werden solche Verfahren, die auf Integraldarstellungen beruhen, üblicherweise als globale Verfahren bezeichnet. Entsprechend sind die aus der Diskretisierung resultierenden linearen algebraischen Gleichungssysteme voll besetzt, woraus häufig ein enormer numerischer Aufwand für ihre Lösung resultiert. Attraktiv sind globale Verfahren deshalb nur dann,

wenn der Diskretisierungsaufwand gering ist, d.h., wenn beispielsweise - wie bei den Oberflächenintegralgleichungsverfahren - durch Anwendung des Huygens'schen Prinzips und Verwendung der das Lösungsgebiet charakterisierenden Green'schen Funktionen dreidimensionale Problemstellungen auf zweidimensionale zurückgeführt werden können oder wenn nur eindimensionale Strukturen (z.B. Drahtmodelle) simuliert werden müssen. Auch die Behandlung stark inhomogener Bereiche wird sehr schnell aufwändig, weil alle Grenzflächen mit Materialänderungen diskretisiert werden müssen. Die grundlegende Formulierung einer Oberflächenintegraldarstellung geht auf die Arbeiten von Stratton und Chu aus den 1940er Jahren zurück [Stratton 2007]; weitere mathematische Details findet man in [Monzon 1993]. Eine sehr umfassende Darstellung von Integralgleichungsverfahren ist in [Mittra 1987] enthalten. Die für Integralgleichungsverfahren am weitesten verbreitete numerische Lösungsmethode ist die Momentenmethode (MoM) [Harrington 1968]. Obwohl sie nicht nur auf Integralgleichungen angewendet werden kann, wird in der Literatur der Begriff "MoM" oft als Synonym für Integralgleichungsverfahren benutzt. Grundlage der MoM ist die Darstellung der unbekannt Ströme durch einen Reihenansatz. Dieser besteht aus Produkten unbekannter Koeffizienten mit bekannten Ansatzfunktionen (so genannten Basisfunktionen). Das Feldproblem besteht folglich darin, die Koeffizienten so zu bestimmen, dass die Randbedingungen erfüllt werden. Vorteilhaft ist die flexible Gestaltung der Diskretisierung, weil die Basisfunktionen nahezu beliebig angeordnet werden können. Bei ideal leitfähigen Körpern kommt hinzu, dass nur deren Oberfläche diskretisiert werden muss. Integralgleichungsverfahren werden meist im Frequenzbereich, zunehmend aber auch im Zeitbereich verwendet. Durch die Verwendung von in den letzten Jahren entwickelten schnellen Lösungsalgorithmen konnten die Integralgleichungsverfahren deutlich beschleunigt werden.

Eine dritte Klasse von Feldberechnungsverfahren bilden die als asymptotische Verfahren bezeichnete Physikalische Optik (PO) und ihre Weiterentwicklung, die Physical Theory of Diffraction (PTD), sowie die geometrische Beugungstheorie (GTD) und die darauf aufbauende vereinheitlichte geometrische Beugungstheorie (UTD). Gemeinsam ist den Verfahren, dass sie zur näherungsweisen Berechnung der Streuung an einfach strukturierten Körpern, die groß im Vergleich zur Wellenlänge sind, viel effizienter als lokale oder globale Verfahren eingesetzt werden können. Da die Verfahren insbesondere zur Beschreibung der Wirkung von Objekten geeignet sind, die deutlich weiter entfernt sind als bei den hier zu diskutierenden Szenarien, wird auf eine nähere Erläuterung an dieser Stelle verzichtet.

Um bei komplexen Problemstellungen die Vorteile bestimmter Verfahren zu nutzen, ohne ihre Nachteile hinnehmen zu müssen, wurden zahlreiche Vorschläge für so genannte Hybridverfahren gemacht, in denen mehrere Einzelverfahren derart miteinander verknüpft werden, dass auf jeden Teilbereich einer Problemstellung das jeweils am besten geeignete Verfahren angewendet wird und eine vollständige Feldlösung zustande kommt. Die in der Literatur vorgestellten Kombinationen können hier nicht alle aufgelistet werden. Beispielhaft seien die Hybridverfahren angeführt, die im unmittelbaren Umfeld des Auftragnehmers entstanden sind. Dabei ist zunächst eine Methode zu nennen, die die FE mit einem Integralgleichungsverfahren für ebene geschichtete Strukturen zusammenfasst [Eibert 1997]. Diese bereits sehr leistungsfähige und auf ein breites Spektrum von Problemen anwendbare Hybridmethode wurde in den Folgejahren noch um jeweils eine dritte Methode zur FE-MoM-PO- [Alaydrus et al. 2001] bzw. zur FE-MoM-UTD-Frequenzbereichs-Hybridmethode [Alaydrus et al. 2002] erweitert und wird durch einen extrem schnellen MoM-Code (mit implementierter 'multilevel fast multipole method') auch den mittlerweile gestiegenen Anforderungen gerecht [Tzoulis and Eibert 2005]. Aus der Notwendigkeit heraus, das Feldproblem für einen Lösungsraum mit stark inhomogenen, elektrisch großen Objektbereichen sowie mit davon ein paar Wellenlängen entfernten metallischen Quellenstrukturen zu lösen, wurde in einem weiteren Verfahren die FE-MoM-UTD-Hybridmethode mit der FDTD kombiniert [Bitz et al. 2002]. Wie in [Bitz 2004] ausgeführt wird, handelt es sich dabei allerdings nicht um ein echtes Hybridverfahren, weil eventuelle Rückwirkungen der Objekte auf die Quellen nicht geschlossen, sondern nur iterativ beschreibbar sind. Mit dem Ziel, zukünftig auch transiente elektromagnetische Randwertprobleme, die im Zuge der Entwicklung von Ultra-Breitbandtechnologien und der Lösung von nicht-linearen Problemstellungen an Interesse gewinnen, möglichst universell bearbeiten zu können, wurde jüngst ein vollständig hybridisiertes FDTD-MoM-UTD-Zeitbereichsverfahren entwickelt [Becker 2006].

3.2 Auswahl des Berechnungsverfahrens

Prinzipiell steht also eine Reihe numerischer Verfahren zur Analyse der von Antennen erzeugten Feldverteilungen im freien Raum und in Materie zur Verfügung.

Die Durchsicht der Literatur zeigt, dass bisher - bis auf wenige Ausnahmen - alle Untersuchungen zur Wirkung elektromagnetischer Quellen auf komplexe biologische Systeme, wie Zellkulturen, Versuchstiere oder Menschen, mit Hilfe der FDTD-Methode durchgeführt wurden. Das betrifft z.B. auch die Untersuchungen im Rahmen von "miniWatt II" [miniWatt II 2007] zur Optimierung der Antennen von Mobil-

funkendgeräten am Kopf, einige in [Schmid et al. 2005] enthaltene Rechnungen, die vielen Arbeiten der Gruppe um Prof. Kuster, IT'IS Zürich, zur numerischen Dosimetrie und viele andere weltweit veröffentlichte Untersuchungen.

Mit dem in [Meyer et al. 2003] beschriebenen FE-MoM-UTD-Hybridverfahren wurden bisher nur Feldberechnungen für Menschmodelle vor Basisstationen publiziert, wobei die Körperfelder mit dem Finite Elemente-Teil ermittelt wurden. Das prinzipielle Verfahren ist unmittelbar mit der an der Bergischen Universität Wuppertal entwickelten so genannten Hybrid⁽²⁾-Methode [Alaydrus 2001] vergleichbar. Der Nachteil dieser Vorgehensweise ist bedingt durch den vergleichbar hohen rechnerischen Aufwand der FE, der eine detaillierte Modellierung eines großen, anatomisch korrekten Menschmodells verhindert. So wurden nur Ergebnisse für homogene Körpermodelle mit einzelnen, wiederum homogenen Organen gezeigt. Eine Aussage über die Ganzkörper-SAR ist somit näherungsweise möglich, wohingegen Aussagen über die Teilkörper-SAR nur sehr bedingt zulässig sind.

Die MoM hat als eigenständiges Verfahren für die Feldberechnung innerhalb von biologischen Strukturen praktisch gar keine Bedeutung, sie wird sehr effektiv nur zur Berechnung der Antennenfelder verwendet. Dabei kommt ihr der Vorteil des globalen Verfahrens zugute, dass der homogene Raum zwischen Antenne und biologischem Objekt nicht diskretisiert werden muss.

Die Vorteile der FDTD-Methode bestehen – wie bereits erwähnt - vor allem in ihrer unmittelbaren Folge aus den Maxwell'schen Gleichungen, ihrer einfachen Umsetzbarkeit in Computercodes und ihrer Flexibilität bei der Modellierung von inhomogenen dielektrischen Strukturen. Die Modellbildung mit der FDTD ist allerdings begrenzt durch die normalerweise in den Labors zur Verfügung stehenden Rechnerkapazitäten, durch die meist große Anzahl von Unbekannten (im allgemeinen Fall müssen pro Voxel 6 komplexwertige Feldkomponenten berücksichtigt werden; im Standardansatz soll die Anzahl der Gitterpunkte pro Raumkoordinate größer als 10 pro (Material-)Wellenlänge sein) und durch den damit verbundenen hohen Rechenzeitbedarf (für ein würfelförmiges Lösungsgebiet steigt dieser z.B. in erster Näherung kubisch mit der Kantenlänge an). Grundsätzlich führt zwar die Verwendung der beispielsweise für die numerische Dosimetrie von Tierexperimenten oder für Einzelorganbetrachtungen üblichen Untergitter, die in geschlossenen kleinvolumigen Bereichen eine erhöhte räumliche Auflösung erlauben, zu einer gewissen Erweiterung dieser Grenzen, letztlich sind aber bei Ganzkörperuntersuchungen am Menschen, die möglicherweise noch Einflüsse der Umgebung berücksichtigen sollen, und in Anbetracht der zu beobachtenden Tendenz, immer feinere Auflösungen zu betreiben, intolerabel lange Rechenzeiten in der Größenordnung von 1 Woche pro Einzelszenario trotz in den letzten Jahren stetig gesteigener Rechnerleistungen nach wie vor keine Seltenheit.

Um die Vorteile des FDTD-Verfahrens auszunutzen, die Nachteile aber möglichst zu vermeiden, sollte die Methode nach Auffassung des Auftragnehmers als eigenständiges Verfahren daher nur innerhalb oder in unmittelbarer Nähe inhomogener Materialverteilungen (ggfs. einschließlich der Berücksichtigung dort vorhandener Quellen) eingesetzt werden. Wenn sich zwischen der Quelle und den Materialverteilungen große luftgefüllte Gebiete befinden, lassen sich durch Kombination der FDTD mit für die Feldberechnung in Leerräumen geeigneteren Verfahren (beispielsweise MoM) meist große Zeitgewinne erzielen. Ebenfalls zur Verkürzung der Rechenzeiten sollten, falls die Ressourcen verfügbar sind, für die Berechnungen Rechnercluster mit parallelen Prozessoren eingesetzt werden. Eine weitere Zeiterparnis bietet die Reduzierung der Anzahl der Gitterpunkte bzw. Voxel, die mit der Verwendung einer weniger hohen Ortsauflösung einhergeht. Eine extreme räumliche Auflösung großer inhomogener Volumina täuscht häufig nur eine Genauigkeit vor, die - ganz anders als bei technischen Systemen - der realen Variabilität biologischer Systeme nicht angemessen ist.

Unter Berücksichtigung der hier zu lösenden Problemstellung und der beim Auftragnehmer vorhandenen unterschiedlichen Rechnersysteme und Softwaretools fiel die Entscheidung, bei der Bestimmung der Exposition von Personen durch körpernah betriebene Endgeräte die Feldverteilungen durch numerische Berechnungen mit Hilfe des Finite Difference Time Domain (FDTD)-Verfahrens zu ermitteln, wobei das Lösungsvolumen für die elektromagnetischen Felder sowohl das Endgerät (beispielsweise das Notebook mit Bluetooth-Adapter) als auch ein anatomisch korrektes Personenmodell (s. 2.3) enthält. Die Verwendung des eigenständigen FDTD-Verfahrens anstelle einer Hybrid-Methode bietet sich hier aus folgenden Gründen an: 1. Die oben erwähnte Voraussetzung, dass die Quellen sich nahe des inhomogenen Körpers befinden, sind in idealer Weise erfüllt. 2. In Voruntersuchungen wurde festgestellt, dass die oben spezifizierten Szenarien mit den genannten Eigenschaften der Rechenmodelle (Auflösung 1 – 4 mm) und mit Quellen in Körperabständen bis zu ca. 1 m, die eine Gitterpunktanzahl in der Größenordnung von 100 Mio. erfordern, unter Anwendung parallelisierter Computercodes auf Mehrprozessor-Maschinen (≥ 20 Knoten) zuverlässig und mit akzeptablen Rechenzeiten (≤ 1 Tag) simuliert werden können. Erst für größere Abstände würde der Vorteil einer Kombination der FDTD mit der MoM durchschlagen.

Da der Auftragnehmer Zugang zu dem neuen Parallelrechner ALiCENext der Bergischen Universität hat, der einer der leistungsfähigsten universitären Parallelrechner in Deutschland ist, wurden die am

Lehrstuhl selbst entwickelten und für Anwendungen auf biologische Strukturen in komplexen Umgebungen spezialisierten FDTD-Tools parallelisiert und erfolgreich auf dem System installiert. Vorteilhaft dabei war, dass sich das FDTD-Verfahren mit seinen einfachen Differenzgleichungen und hohen Stützstellenzahlen geradezu zur Parallelisierung aufdrängt, während die Umsetzung der MoM bzw. des komplexeren Hybrid²-Verfahrens auf die vorhandene Parallelrechner-Architektur der ALiCENext problematischer und zurzeit der Projektbearbeitung noch nicht endgültig geklärt war.

Das numerische Verfahren liefert als erstes Zwischenergebnis die räumliche Verteilung der sechs Feldkomponenten von elektrischer und magnetischer Feldstärke.

Der hier interessierende Anteil der auf den menschlichen Körper auftreffenden HF-Leistung, der in jedem Gewebeelement mit dem Volumen dV aufgrund der elektrischen Verluste absorbiert wird (lokale Verlustleistung dP_V), kann aus dem Betrag des Phasors der elektrischen Feldstärke E (gemittelt aus den E-Feldkomponenten jeweils eines Voxels) und der Gewebeleitfähigkeit κ über den Zusammenhang

$$dP_V(\vec{r}) = \frac{1}{2} \kappa(\vec{r}) |\vec{E}(\vec{r})|^2 dV \quad (3.1)$$

bestimmt werden. Mit der ortsabhängigen Materialdichte ρ des Körpergewebes ergibt sich die auf ein bestimmtes Volumen V bezogene Spezifische Absorptionsrate (SAR) dann zu[#]

$$SAR(V) = \frac{1}{V} \int_V \frac{dP_V(\vec{r})}{\rho(\vec{r})} = \frac{1}{2V} \int_V \frac{\kappa(\vec{r})}{\rho(\vec{r})} |\vec{E}(\vec{r})|^2 dV \quad (3.2)$$

Die Auswertung der SAR-Verteilungen im Körpermodell für die in Abschnitt 2.2 definierten Szenarien wird in AP 4 vorgenommen.

Die Absolutwerte der Feldstärken und der SAR hängen natürlich von der Sendeleistung P_S der Quelle ab. Um eine gewünschte Antennen-Sendeleistung korrekt in die numerische Rechnung einfließen zu lassen, wird folgendes Prozedere angewendet: Da die Sendeleistung P_S zum Teil in den Objekten des Szenarios absorbiert wird (P_{abs}) und zum anderen Teil das Szenario als Strahlung verlässt (P_{rad}), gilt die Bilanz $P_S = P_{abs} + P_{rad}$. Die gesamte absorbierte Leistung P_{abs} setzt sich aus der Verlustleistung P_V im Menschmodell und aus der in den verlustbehafteten Materialien der Geräte und Möbel absorbierten Leistung $P_{abs, Gegenstände}$ zusammen. Die Strahlungsleistung P_{rad} wird durch Integration des Poynting-Vektors über eine das Szenario umgebende, geschlossene Fläche berechnet. Diese Vorgehensweise ist zwar vergleichsweise aufwändig, liefert aber viel zuverlässigere Ergebnisse als die Abschätzung der Sendeleistung über die Klemmendaten der Antenne (z.B. Eingangsimpedanz). Da in einem gegebenen Szenario sowohl P_{abs} als auch P_{rad} der Sendeleistung direkt proportional sind, kann P_S auf jeden gewünschten Wert umnormiert werden.

3.3 Feldberechnungen im Freiraum und messtechnischer Vergleich

Zur Validierung der mit den Modellen für die Endgeräte erzielten numerischen Ergebnisse wurden Vergleiche zwischen Simulationsberechnungen und Messungen der Abstrahlcharakteristika der Endgeräte vorgenommen. Der Vergleich wurde am Fernfeldrichtdiagramm der Endgeräte unter Quasi-Freiraumbedingungen durchgeführt. Dazu war ein vorhandener automatisierter Fernfeld-Messplatz [Kotyba 2007] auf die durch die neuen Testobjekte bedingten Anforderungen zu modifizieren. Der auf einem schrittmotorgetriebenen Drehversteller montierte Objektisch wurde vollständig aus Styropor aufgebaut, und die bisherige einseitig offene Absorberabtrennung wurde geschlossen und vergrößert sowie mit einer Decke versehen, die mit gleichartigen Absorbern des Typs ECCOSORB AN-79 von Emerson & Cuming verkleidet wurde. Die so mit einer Grundfläche von 4,8 m x 2,8 m entstandene Absorberkammer bietet genügend Platz für eine 3 m-Messstrecke. Als Messantenne wurde eine log.-per. Breitbandantenne des Typs HL 025 von Rohde & Schwarz verwendet. Bild 15 zeigt eine Innenansicht des Absorberraums mit dem drehbaren Objektisch und der Messantenne.

Alle für den Betrieb des Messplatzes erforderlichen Steuer-, Sende- und Empfangsgeräte waren außerhalb des Absorberraumes aufgestellt.

Da die Messungen nicht mit den stark zeitvariablen Signalen der jeweiligen Dienste, sondern mit Dauerstrich-Signalen (CW) durchgeführt wurden (Ausnahme: Bluetooth-USB-Adapter), mussten entsprechende externe Einspeisungen an den Endgeräten vorgesehen werden. Teilweise waren dazu die Originalplatinen durch geänderte Platinen zu ersetzen, um Platz für die Eingangsstecker zu schaffen. Die

[#] Für ein Bezugsvolumen V der Masse m trifft auf die SAR gemäß Gl. (3.2) der in vielen Veröffentlichungen und in einschlägigen Normungsempfehlungen verwendete Terminus „über die Masse m gemittelte Spezifische Absorptionsrate“ zu.

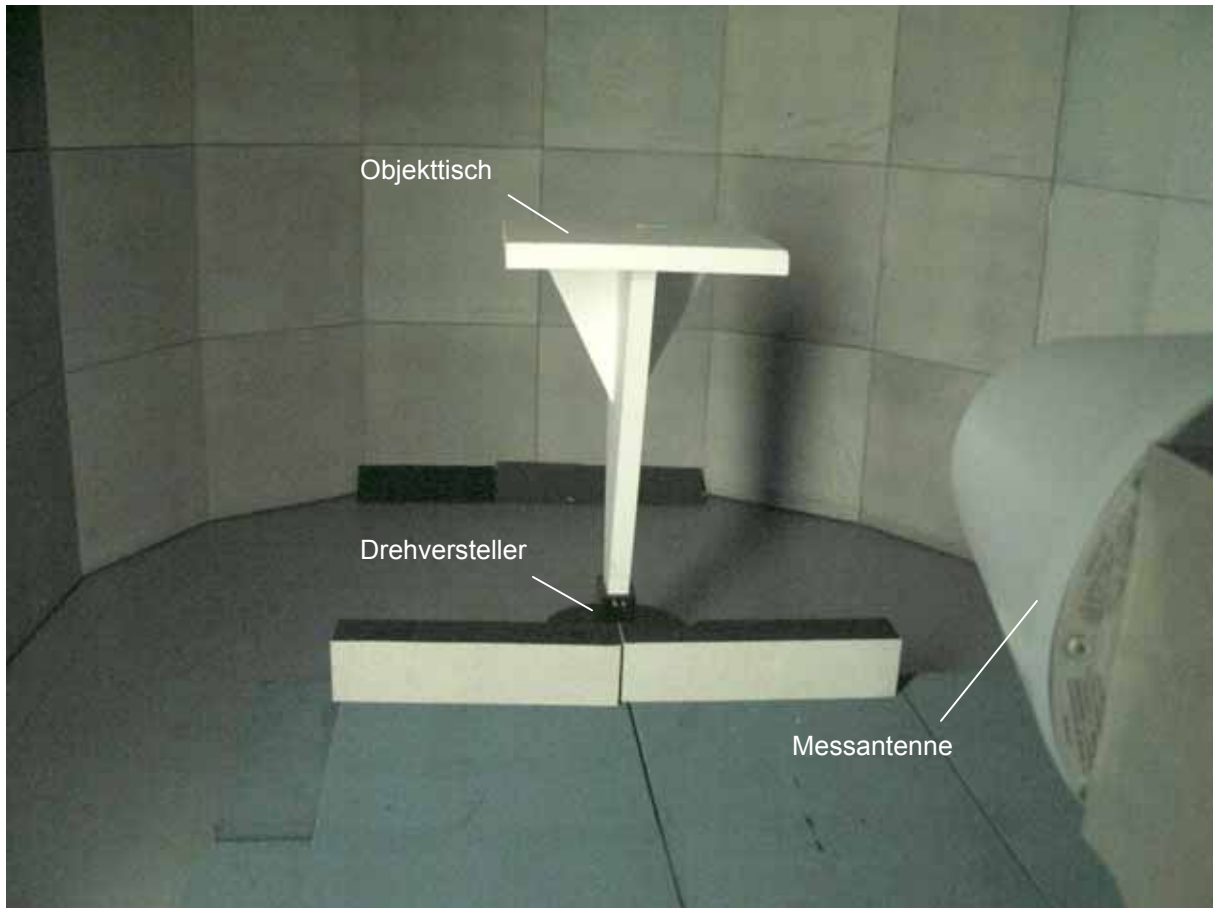


Bild 15: Messstrecke im Absorberraum mit Drehtisch und Messantenne

Bilder 16 - 18 zeigen die als Messphantome verwendeten modifizierten Endgeräte.

Die Endgeräte wurden mit einem Signal bei einer für den bestimmungsgemäßen Betrieb vorgesehenen Frequenz gespeist. Als Messsender und -empfänger diente ein Netzwerkanalysator Agilent E8363A, mit dem auch die Kontrolle der Anpassung (S_{11}) der Messphantome vorgenommen wurde. Es wurden jeweils sowohl horizontale als auch vertikale Richtdiagramme aufgenommen, in der Regel für beide Polarisationsrichtungen. Das Winkelinkrement betrug $2,33^\circ$.

Im Falle der PCMCIA-Karte und des Bluetooth-Adapters wurde ohne das Notebook gemessen, weil seine spezifische innere Materialstruktur nicht ermittelt werden konnte, aber selbst Abweichungen im Detail - insbesondere die Anordnungen metallischer Teile - einen erheblichen Einfluss auf die Richtcharakteristik haben können. Aus demselben Grund wurde das Messphantom der PCMCIA-Karte auch mit einer den Abmessungen der Originalplatine entsprechenden Leiterplatte ausgestattet.

Da beim Bluetooth-Adapter keine externe CW-Einspeisung möglich war, wurde für die Messung eine echte Bluetooth-Verbindung mit einer Gegenstelle außerhalb des Absorberraums hergestellt, wobei durch Maximierung der Funkfelddämpfung angestrebt wurde, mit dem Testobjekt soviel Leistung wie möglich abzustrahlen. Die Auswertung des Messsignals erfolgte in diesem Fall mit einem Spektrumanalysator Agilent E4440AR.

Darüber hinaus wurden die Fernfelder auf der Basis der in Abschnitt 2.4 behandelten Gerätemodelle mit dem eigenen FDTD-Programmcode berechnet, nachdem auch ein numerischer Abgleich des Frequenzgangs des Reflexionsfaktors (S_{11}) der Modellantennen erfolgt war. Größtenteils wurden die Rechnungen zum Vergleich auch mit dem kommerziellen Feldlöser Microwave Studio™ [CST 2006] wiederholt. Die Bilder 19 - 30 geben eine Auswahl von Mess- und Berechnungsergebnissen für die normierte Richtcharakteristik in logarithmischer Darstellung wieder. Die übrigen Richtdiagramme sind als Anhang diesem Abschlussbericht beigelegt.

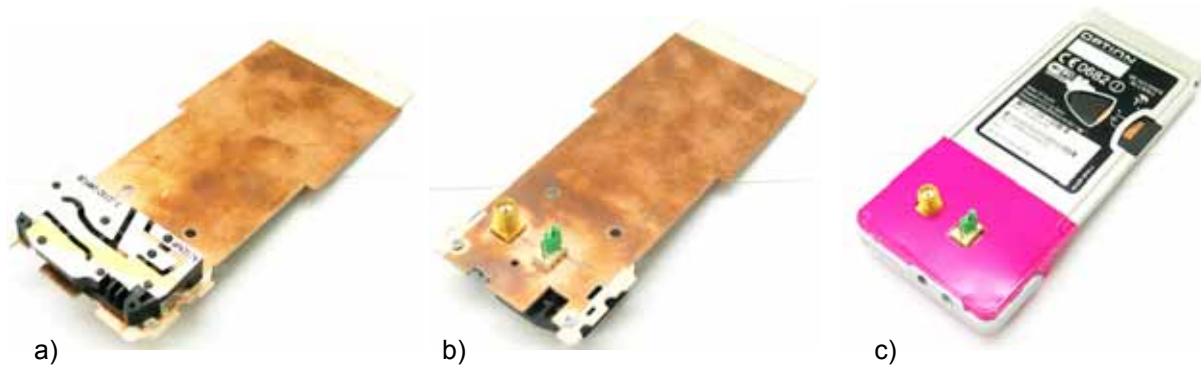


Bild 16: Messphantom der PCMCIA-Karte

- a) Kupferkaschierte Ersatz-Leiterplatte mit integrierter W-LAN-Antenne und aufgeschraubter Original-Multiband-Antenne
- b) Leiterplatten-Unterseite mit HF-Eingangsstecker und Jumper zur Antennenauswahl
- c) Gehäuseeinbau (abgesehen von der Farbgebung entspricht das Gehäuse dem Original aus Bild 2a)

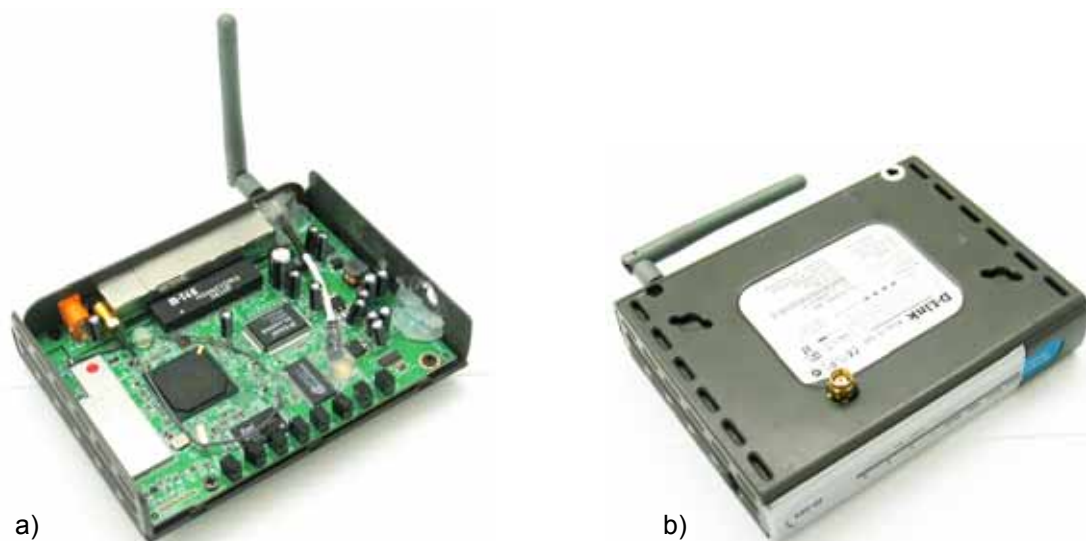


Bild 17: Messphantom des W-LAN-Routers:

- a) Original-Platine mit nachträglich eingebauter externer Antennen-Einspeisung
- b) Unterseite des Original-Gehäuses mit HF-Eingangsstecker

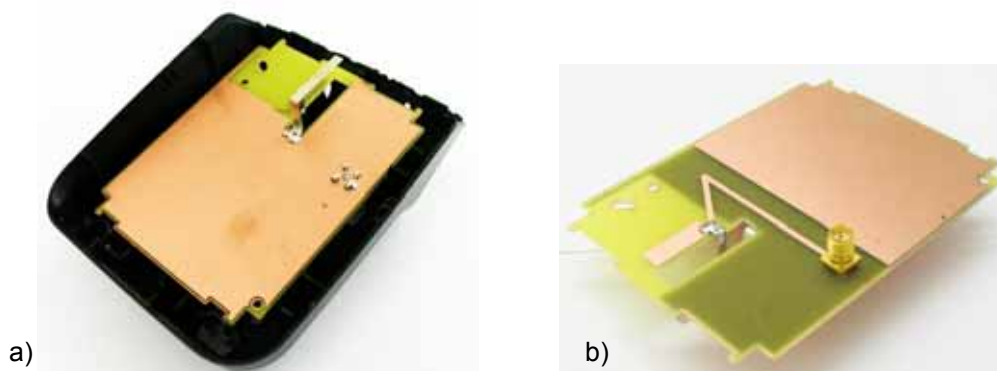


Bild 18: Messphantom der DECT-Basisstation:

- a) Ersatz-Leiterplatte mit extern gespeister 'inverted F'-Antenne im Original-Gehäuse
- b) Leiterplatten-Unterseite mit HF-Eingangsstecker

PCMCIA-Karte: Die originale Struktur basiert auf der Antenne gemäß Bild 16a, die vereinfachte Struktur entspricht dem "begradigten" Antennenmodell aus Bild 12b.

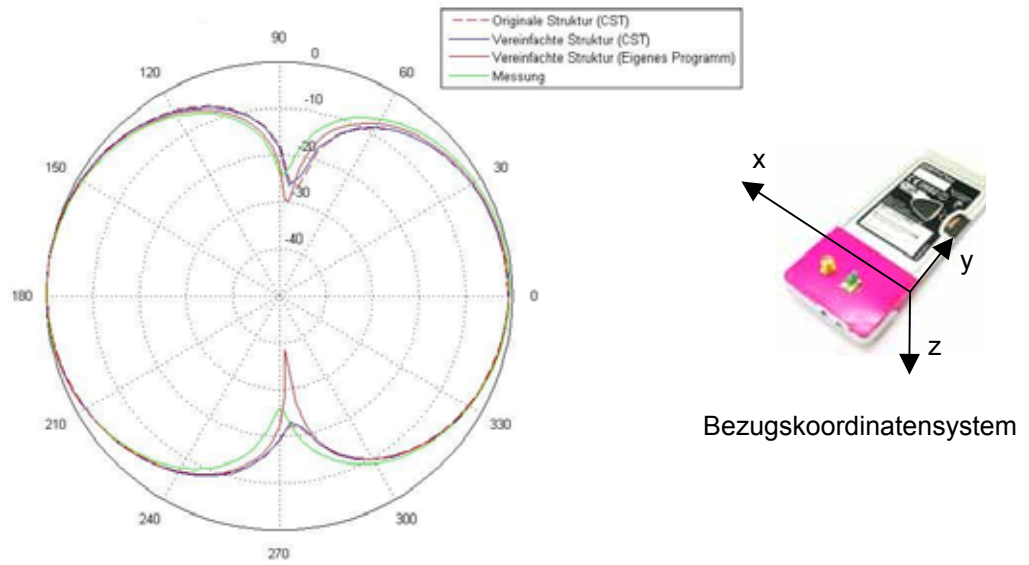


Bild 19: Frequenz 900 MHz: Horizontales Richtdiagramm bei $\vartheta = 90^\circ$ für horizontale Polarisation

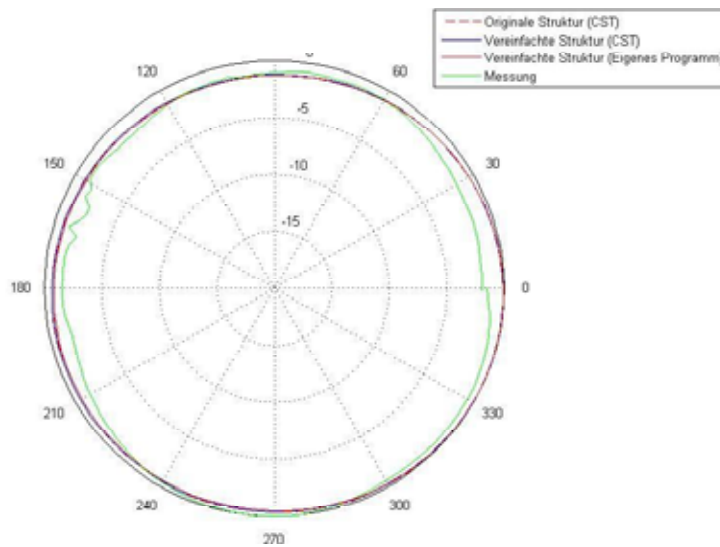


Bild 20: Frequenz 900 MHz: Vertikales Richtdiagramm bei $\varphi = 0^\circ$ für horizontale Polarisation

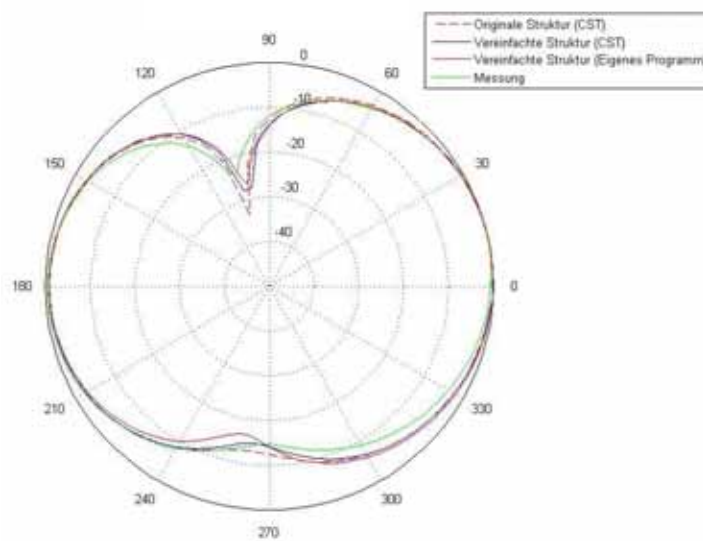


Bild 21: Frequenz 900 MHz: Vertikales Richtdiagramm bei $\varphi = 90^\circ$ für vertikale Polarisation

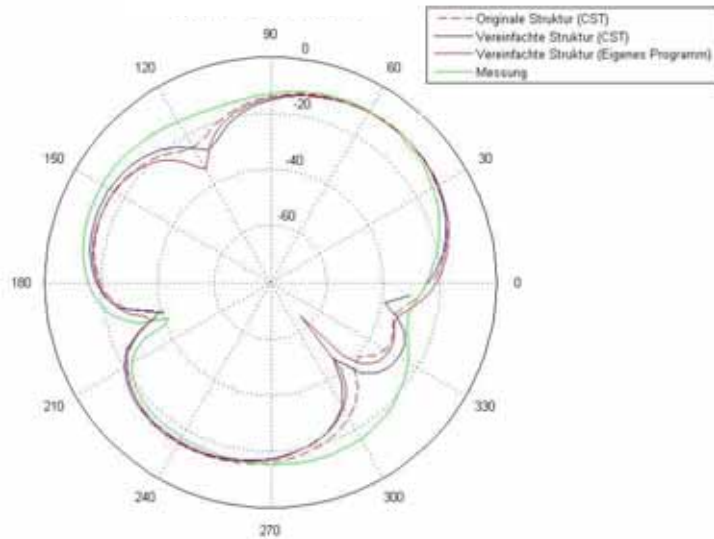


Bild 22: Frequenz 1.800 MHz: Horizontales Richtdiagramm bei $\vartheta = 90^\circ$ für horizontale Polarisation

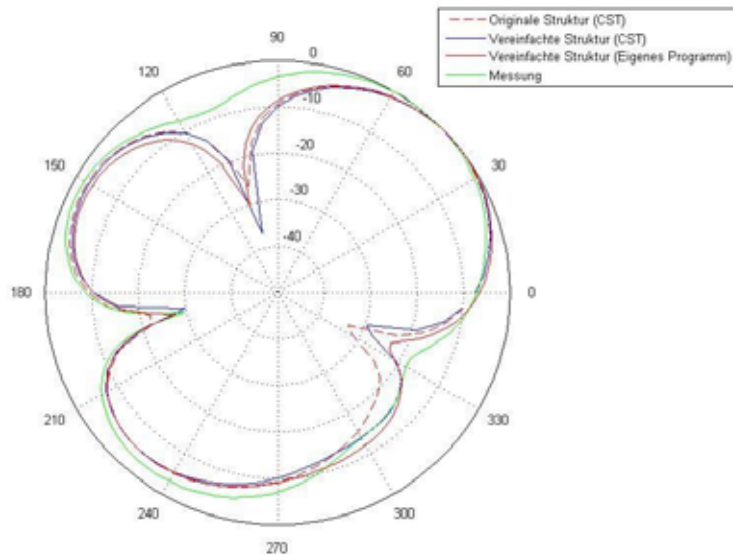


Bild 23: Frequenz 1.800 MHz: Vertikales Richtdiagramm bei $\varphi = 90^\circ$ für vertikale Polarisation

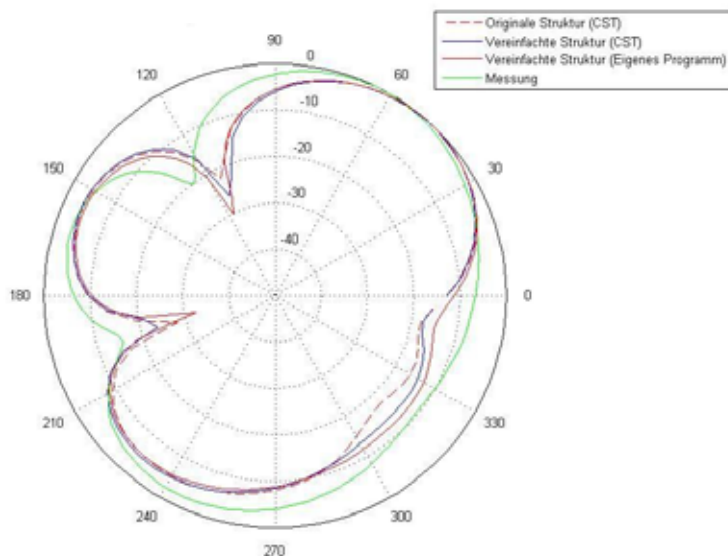


Bild 24: Frequenz 1.950 MHz: Horizontales Richtdiagramm bei $\vartheta = 90^\circ$ für horizontale Polarisation

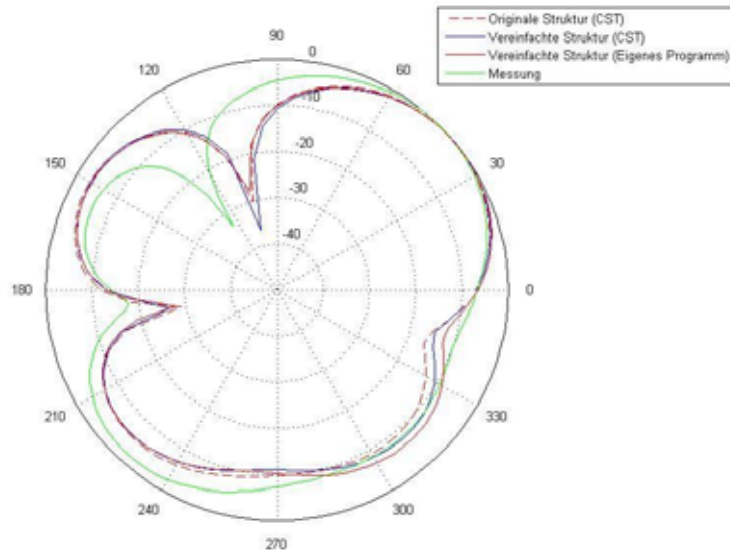
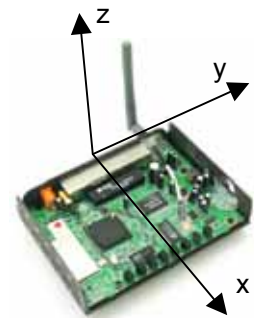
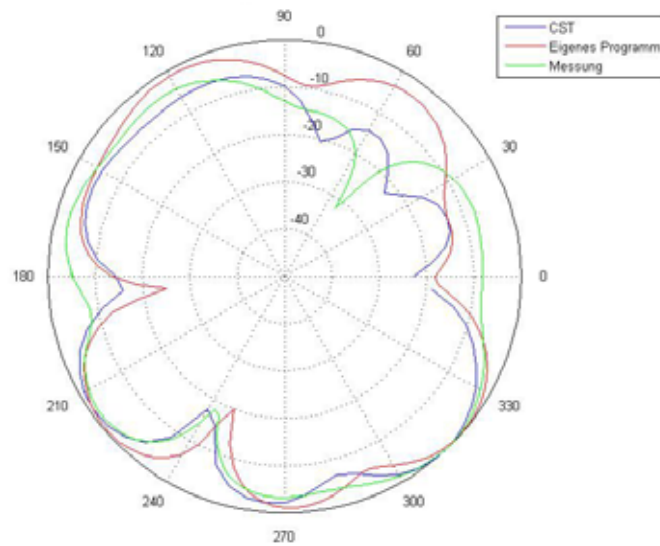


Bild 25: Frequenz 1.950 MHz: Vertikales Richtdiagramm bei $\varphi = 90^\circ$ für vertikale Polarisation

W-LAN-Router:



Bezugskoordinatensystem

Bild 26: Frequenz 2.450 MHz: Horizontales Richtdiagramm bei $\vartheta = 90^\circ$ für horizontale Polarisation

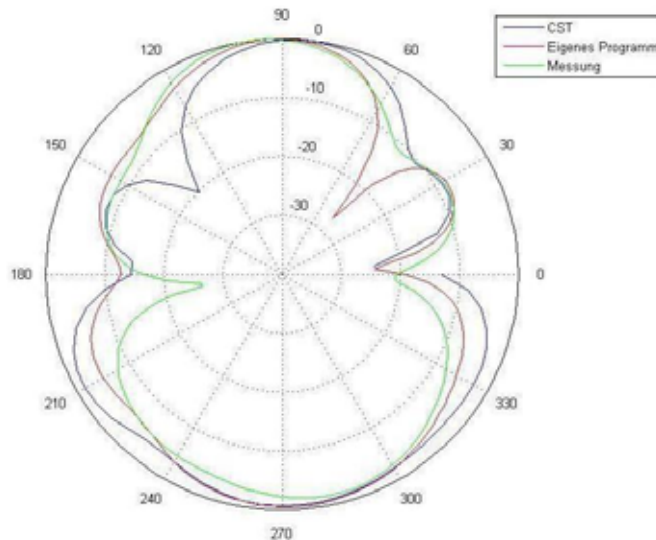


Bild 27: Frequenz 2.450 MHz: Vertikales Richtdiagramm bei $\varphi = 0^\circ$ für vertikale Polarisation
 DECT-Basisstation:

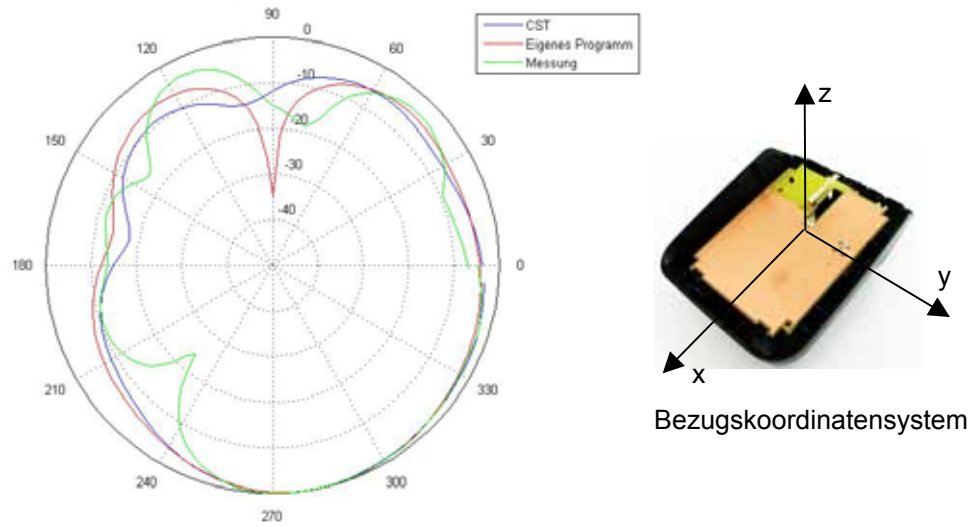


Bild 28: Frequenz 1.900 MHz: Horizontales Richtdiagramm bei $\vartheta = 90^\circ$ für horizontale Polarisation

Bluetooth-USB-Adapter:

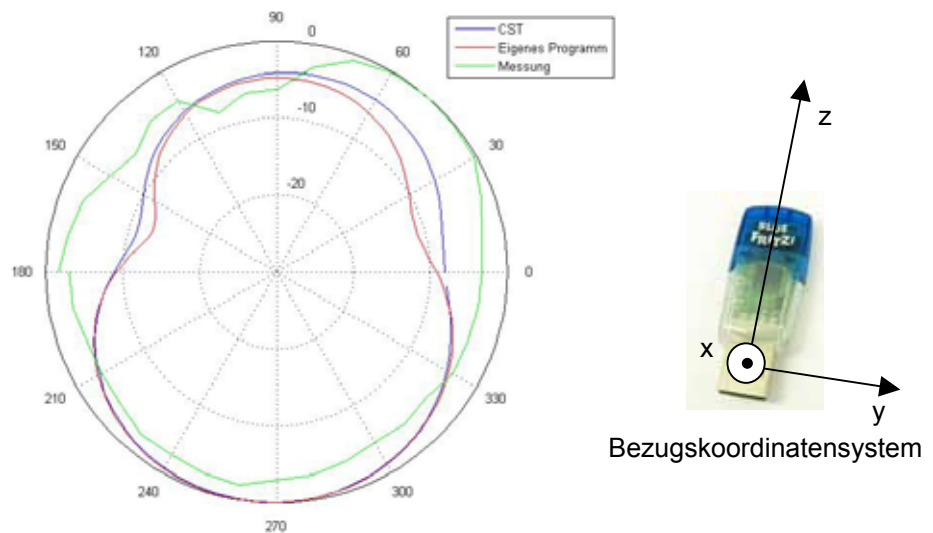


Bild 29: Frequenz 2.450 MHz: Horizontales Richtdiagramm bei $\vartheta = 90^\circ$ für horizontale Polarisation

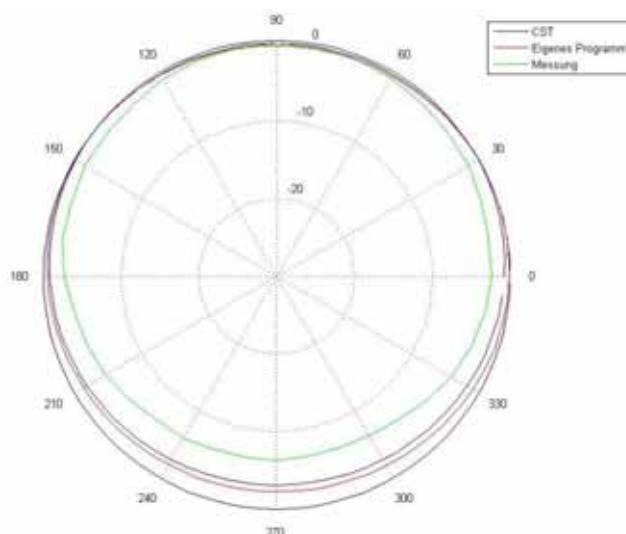


Bild 30: Frequenz 2.450 MHz: Horizontales Richtdiagramm bei $\vartheta = 90^\circ$ für vertikale Polarisation

Fazit des Vergleichs Messung – Rechnung:

Die durch die Richtdiagramme charakterisierten Strahlungseigenschaften der Endgeräte sollen an dieser Stelle im Einzelnen nicht diskutiert werden. Entscheidend ist vielmehr, dass – trotz gewisser Abweichungen im Detail – global betrachtet die Übereinstimmung zwischen den numerischen Rechenergebnissen und den Messdaten als äußerst zufrieden stellend bezeichnet werden kann. Insofern wird die Absicht, die weiteren Untersuchungen auf rein rechnerischer Basis mit den erstellten Gerätemodellen vorzunehmen, durch die Vergleichsergebnisse voll gestützt.

3.4 Feldberechnungen für festgelegte Szenarien

Bei der Entwicklung von Endgeräten ist die Kenntnis der von ihnen erzeugten Feldverteilungen essenziell und unter Systemaspekten als primäre Information vor der Spezifischen Absorptionsrate (SAR) anzusehen. Im vorliegenden Fall bereits vorhandener funktionsfähiger Endgeräte spielen die Felder dagegen im Zusammenhang mit der Immissionsproblematik nur als Zwischenergebnisse auf dem Weg zur SAR-Bestimmung eine Rolle. Insofern ist auch die ausführliche Darstellung und Auswertung von Feldverteilungen nicht zielführend und wird daher hier nur beispielhaft für einige Szenarien vorgenommen.

Zunächst wird ein Szenario ähnlich Bild 7a behandelt, wobei als aktives Endgerät die Basisstation eines DECT-Telefons auf dem Schreibtisch betrachtet wird. Das Gesamt-Rechenmodell ist in Bild 31 wiedergegeben (vgl. Tab. IIb, Endgerät 3, Szenario 16). Es enthält neben dem sitzenden Menschmodell des Erwachsenen und dem Gerätemodell für die DECT-Basisstation nach Bild 14 das Notebook-Modell, dessen Funkschnittstellen allerdings ausgeschaltet sind, einen Stuhl mit Metallgestell, schaumstoffgepolsterter Holz-Sitzfläche und -Rückenlehne und einen Tisch mit Holzplatte, ebenfalls auf einem Metallgestell. Der Fußbodenbelag besteht aus 1 cm starkem PVC-Material, der Boden selbst ist zur 'worst case'-Approximation einer stahlbewehrten Betonplatte als ideal leitend angenommen. Der Schreibtisch steht vor einer ebenfalls ideal leitenden, fensterlosen Wand, an den Seiten des Tisches und hinter dem Stuhl wurden offene Randbedingungen eingepreßt. Der Abstand der Antenne der Basisstation von der vorderen Tischkante beträgt etwa 30 cm. In Bild 31 ist das Rechenmodell dreidimensional und in einem willkürlich gewählten y-Längsschnitt dargestellt.

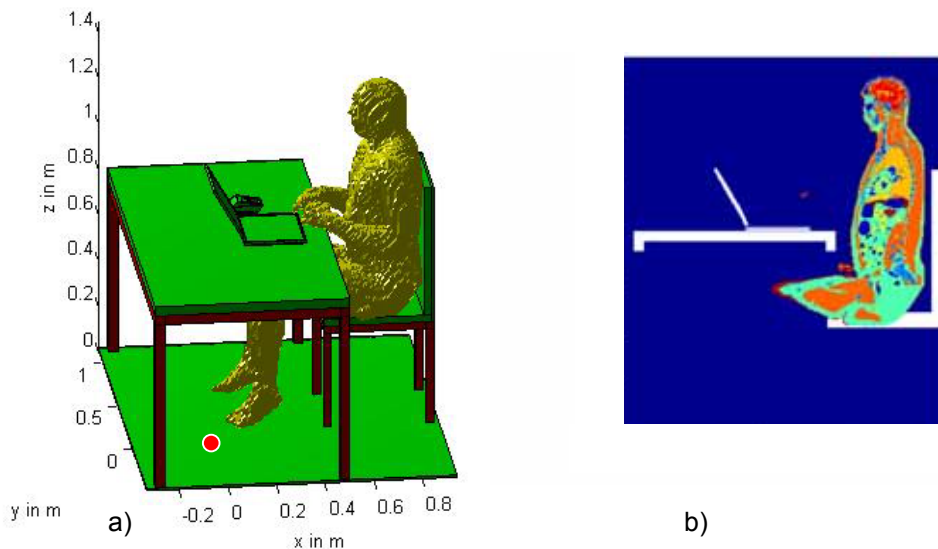


Bild 31: Rechenmodell des Szenarios mit DECT-Basisstation als Feldquelle
a) in 3D-Darstellung (die rote Markierung deutet die Lage des Ursprungs des hier verwendeten Koordinatensystems an); b) in einem Längsschnitt bei $y = 0,35$ m.

Bild 32 zeigt zwei Verteilungen des Betrags der elektrischen Feldstärke. Am y-Schnitt mittig durch das Körpermodell in Bild 32a sind die durch Reflexionen an der Wand (links im Bild) und am Fußboden bedingten Stehwelligkeiten des 1.900 MHz-Feldes gut zu erkennen. Das durch die Feldüberhöhung an den Kanten der Metallplatten von Bildschirm- und Bedienteil des Notebook-Modells auftretende Feldstärkemaximum verhindert eine gleichzeitige kontrastreiche Darstellung des Feld in Körpernähe. Daher wird in Bild 32b ein x-Schnitt des Feldes durch den von der Rückseite her betrachteten Körper gewählt. Die niedrigeren Feldstärken treten im linken Raumbereich auf, den der Körper vor der Strahlung der etwas rechts vom ihm platzierten Quelle teilweise abschirmt.

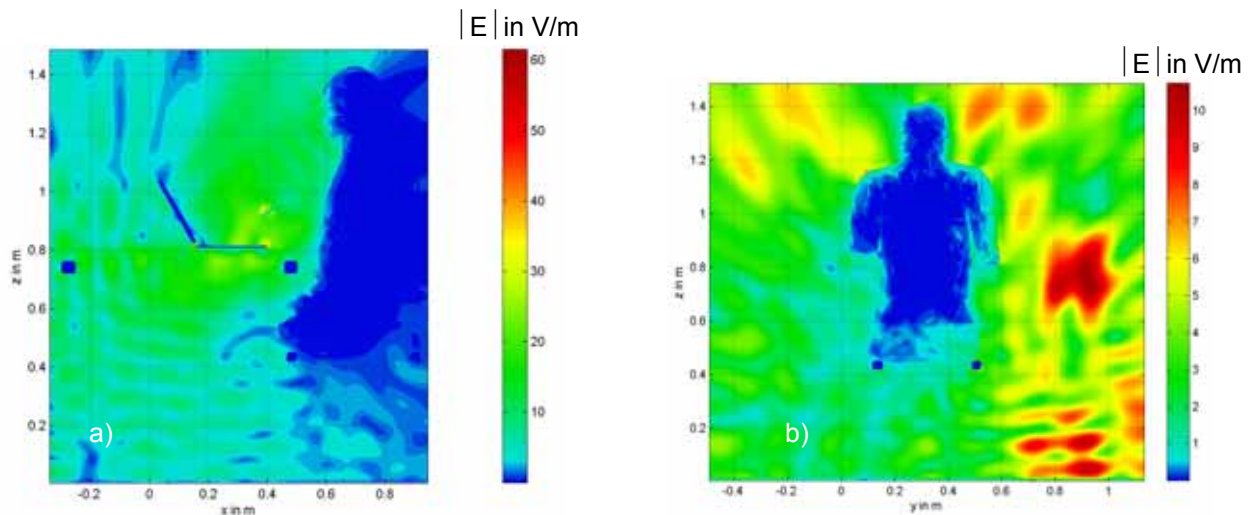


Bild 32: Von der mit 215 mW bei 1.900 MHz abstrahlenden DECT-Basisstation hervorgerufene elektrische Feldstärkeverteilung (Gesamtbetrag) in zwei Längsschnitten durch den sitzenden Erwachsenen bei a) $y = 0,32$ m und b) $x = 0,73$ m

Grundsätzlich fallen der immer bei biologischen Systemen durch die Reflexion infolge des großen Permittivitätssprungs auftretende Feldstärkeeinbruch beim Eintritt in den Körper und das rasche Abklingen des Körperfeldes aufgrund der Gewebeleitfähigkeit auf. Die Absolutwerte der Feldstärken liegen selbst für die hier angenommene maximale Strahlungsleistung einer DECT-Basisstation (vgl. AP 1) relativ niedrig, wobei eine quantitative Bewertung aber erst über die Spezifische Absorptionsrate in AP 4 erfolgen soll.

Beim folgenden Szenario wird ebenfalls die DECT-Basisstation als Quelle betrachtet. Sie ist, diesmal mit aufgelegtem Mobilteil, an der gleichen Position wie in Bild 31 platziert, jedoch ist nun das Notebook (wie auch bei allen weiteren DECT-Szenarien) entfernt, und vor dem Schreibtisch ist das stehende Körpermodell des Jugendlichen angeordnet (vgl. Tab. IIb, Endgerät 3, Szenario 15). Die Feldverteilung in Bild 33 zeigt jetzt auch vor dem Körper ausgeprägte Stehwelligkeiten, weil die abschirmende Wirkung des Notebook-Bildschirms entfällt. Bei gleicher Leistung wie zuvor ergeben sich auch Feldstärkewerte in derselben Größenordnung.

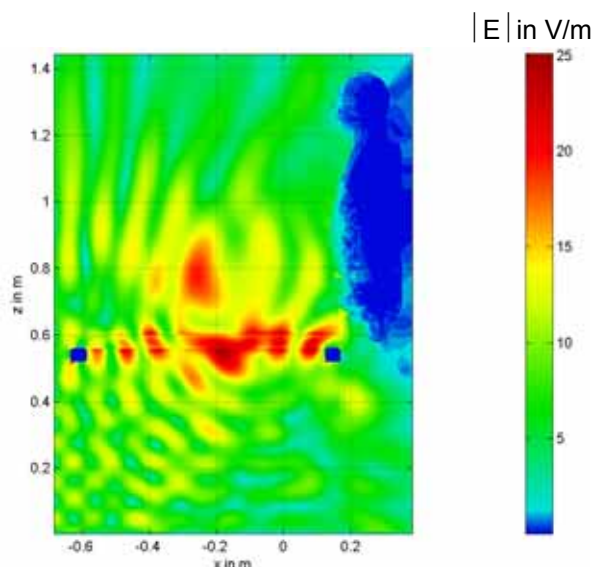


Bild 33: Von der mit 215 mW bei 1.900 MHz abstrahlenden DECT-Basisstation hervorgerufene elektrische Feldstärkeverteilung in einem Längsschnitt durch den stehenden Jugendlichen bei $y = 0,34$ m

Als drittes Beispiel wird ein sitzender Jugendlicher mit auf den Oberschenkeln abgelegtem Notebook betrachtet, das über eine PCMCIA-Karte im GPRS-Modus, also bei einer Frequenz von 900 MHz, Signale aussendet (vgl. Tab. IIa, Endgerät 1, Szenario 9). Das dem Szenario aus Bild 7b nachempfundene Rechenmodell wird in Bild 34 präsentiert. Abweichend von Bild 7b wird hier der Fall behandelt, dass die Person auf einem Stuhl mit Metallgestell sitzt, der mitten im Raum steht, sodass das elektromagnetische Feld unbeeinflusst von Wänden ist. Der Fußboden ist wie in Bild 31 modelliert, das Modell des Notebooks entspricht Bild 10a. Da das Notebook in diesem typischen Beispiel mittig in Bezug auf den Körper des Jugendlichen positioniert ist, befindet sich die Antenne der PCMCIA-Karte nicht unmittelbar über dem Oberschenkel.

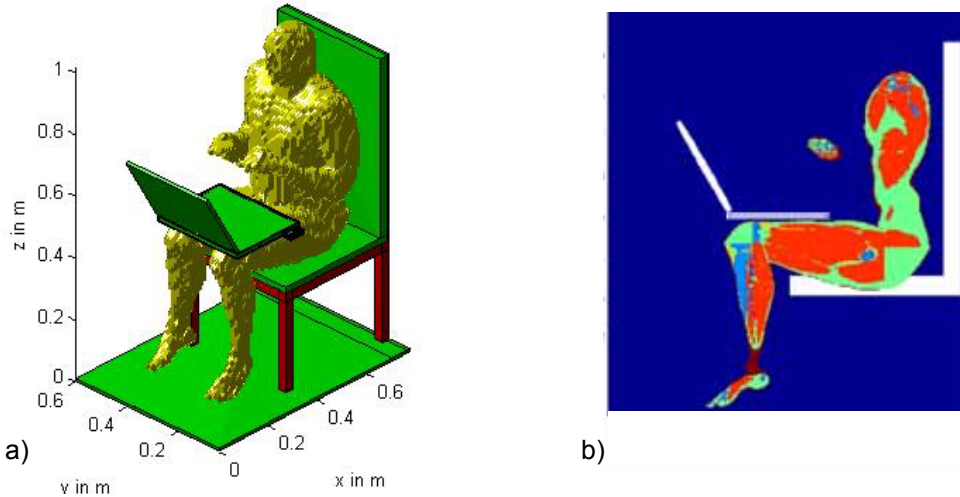


Bild 34: Rechenmodell des Szenarios mit sitzendem Jugendlichen, Notebook auf den Oberschenkeln und PCMCIA-Karte im GPRS-Modus als Feldquelle
a) in 3D-Darstellung; b) in einem Längsschnitt bei $y = 0,24$ m.

Bild 35 gibt für eine Sendeleistung von 960 mW die elektrische Feldstärkeverteilung in zwei y-Schnittebenen wieder. Zum einen wurde ein Schnitt nahezu mittig durch das Körpermodell gewählt, zum zweiten ein Schnitt, der durch den im Wesentlichen betroffenen Oberschenkel verläuft. Es wird klar, dass das Feld nur in der Nähe des Senders auffallend tief in den Körper eindringt.

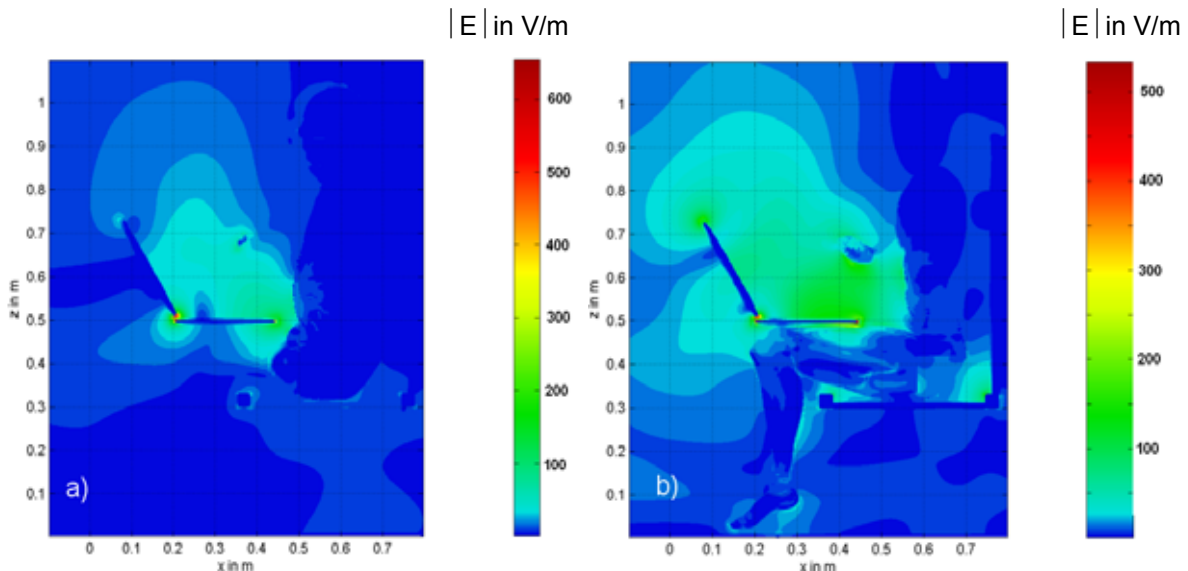


Bild 35: Von der mit 960 mW bei 900 MHz (GPRS) abstrahlenden PCMCIA-Karte (Notebook auf den Oberschenkeln) hervorgerufene elektrische Feldstärkeverteilung in zwei Längsschnitten durch den Jugendlichen; a) bei $y = 0,34$ m und b) bei $y = 0,24$ m (wie in Bild 34b)

Das Rechenmodell aus Bild 34 wird jetzt in Kombination mit dem UMTS-Betrieb der PCMCIA-Schnittstelle verwendet (vgl. Tab. IIa, Endgerät 1, Szenario 3). Als Sendeleistung wird der Maximalwert von

200 mW gemäß Tabelle I gewählt. Die Feldverteilung im y-Schnitt aus Bild 36 weist wie Bild 35a eine Konzentration des Feldes zwischen der Vorderseite des Körpers und dem Bildschirm des Laptops auf. Der x-Schnitt in Bild 36b zeigt im Vergleich zum selben x-Schnitt für die DECT-Basisstation aus Bild 32b, dass die elektrischen Feldstärken nun auf der linken, der Quelle näher liegenden Seite des Körpers am größten sind.

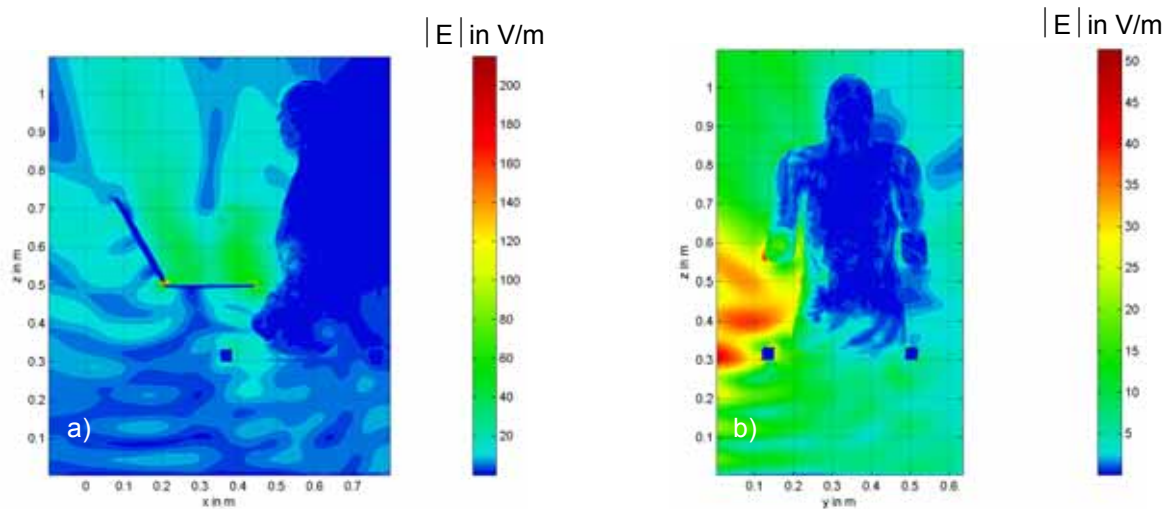


Bild 36: Von der mit 200 mW bei 1.950 MHz (UMTS) abstrahlenden PCMCIA-Karte (Notebook auf den Oberschenkeln) hervorgerufene elektrische Feldstärkeverteilung in zwei Längsschnitten durch den Jugendlichen; a) bei $y = 0,34$ m und b) bei $x = 0,6$ m

Im nächsten Szenario wird die PCMCIA-Karte des auf dem Schreibtisch vor dem sitzenden Erwachsenen platzierten Notebooks im W-LAN-Modus bei 100 mW Sendeleistung betrieben (vgl. Tab. IIa, Endgerät 1, Szenario 15; Modell vergleichbar Bild 31, aber ohne DECT-Basisstation). Die Felddarstellung in Bild 37 lässt erkennen, dass die Maxima des infolge der Bodenreflexion entstehenden Stehwellenfeldes wegen der kleineren Wellenlänge deutlich enger beieinander liegen als im Fall der DECT-Basisstation (Bild 32b).

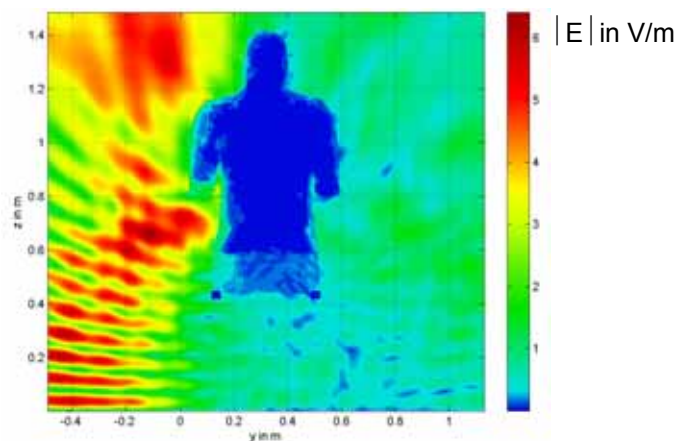


Bild 37: Von der mit 100 mW bei 2.450 MHz (W-LAN) abstrahlenden PCMCIA-Karte (Notebook auf dem Tisch) hervorgerufene elektrische Feldstärkeverteilung im Längsschnitt $x = 0,73$ m durch den sitzenden Erwachsenen

Der Übergang zum folgenden Szenario (vgl. Tab. IIa, Endgerät 1, Szenario 21) ist bei ansonsten unveränderten Umgebungsbedingungen durch Abschalten der PCMCIA-Karte und Aktivieren des Bluetooth-USB-Adapters gekennzeichnet, der gemäß Bild 10b nahe der rechten hinteren Ecke des Notebook-Gehäuses eingesteckt ist und ebenfalls bei der Frequenz 2.450 MHz mit 100 mW Leistung sendet. Die Positionierung der Quelle begünstigt das Auftreten hoher Feldstärkewerte in der Umgebung des Knickbereiches zwischen Bildschirm und Tastaturteil (Bild 38a), wobei sich wesentliche Feldanteile parallel zur Körperfront ausbreiten, sodass auch auf der linken Seite des Notebooks ein Feldmaximum entsteht (Bild 38b).

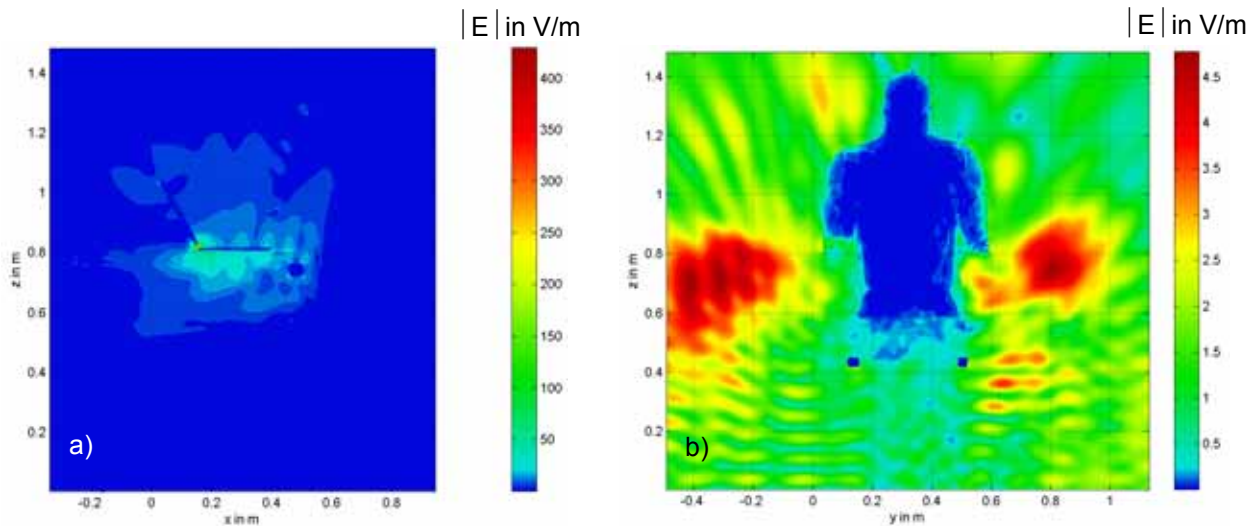


Bild 38: Von dem mit 100 mW bei 2.450 MHz abstrahlenden Bluetooth-USB-Adapter (Notebook auf dem Tisch) hervorgerufene elektrische Feldstärkeverteilung in zwei Längsschnitten durch den sitzenden Erwachsenen; a) $y = 0,32$ m; b) $x = 0,73$ m

Ein weiteres Szenario, das hier für die Felddarstellung ausgewählt wurde, betrifft die an der Wand unmittelbar unter dem W-LAN-Router stehende erwachsene Person in Anlehnung an Bild 8. Der in ca. 2 m Höhe montierte Router emittiert bei einer Frequenz von 2.450 MHz, die Dipolantenne weist nach oben. Das Rechenmodell des Szenarios ist in Bild 39 dargestellt, der Kopf der Person ist ca. 30 cm vom Router entfernt (vgl. Tab. IIb, Endgerät 2, Szenario 6).

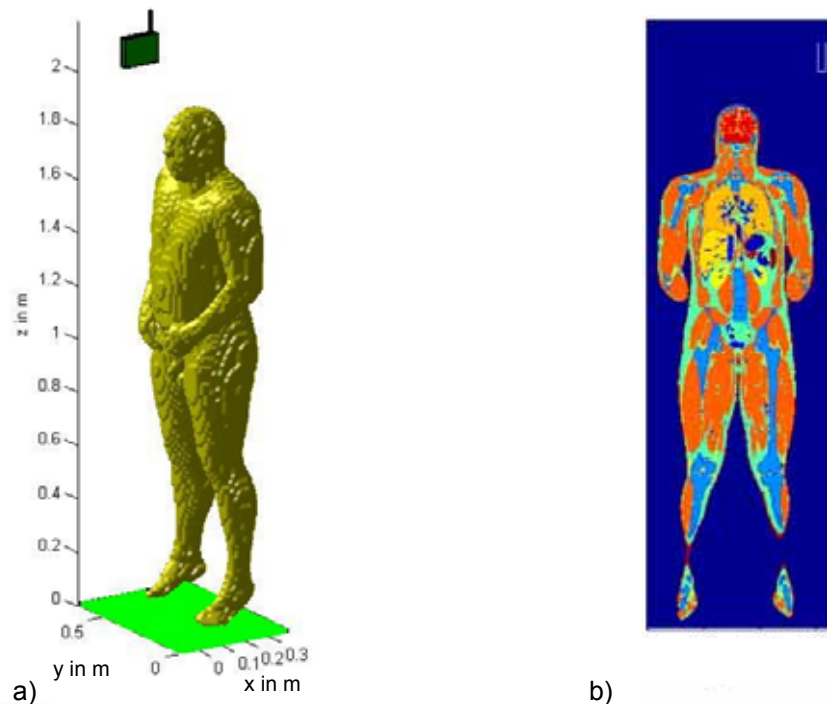


Bild 39: Rechenmodell des Szenarios mit Erwachsenem und wandmontiertem W-LAN-Router als Feldquelle; a) in 3D-Darstellung; b) in einem Längsschnitt bei $x = 0,22$ m (Ansicht von hinten).

Bild 40 gibt die elektrische Feldverteilung für eine Sendeleistung von 100 mW in zwei Schnittebenen wieder. Anhand der Stehwelligkeiten werden die Reflexionen des einfallenden Feldes am Kopf bzw. am als ideal leitend vorausgesetzten Fußboden deutlich.

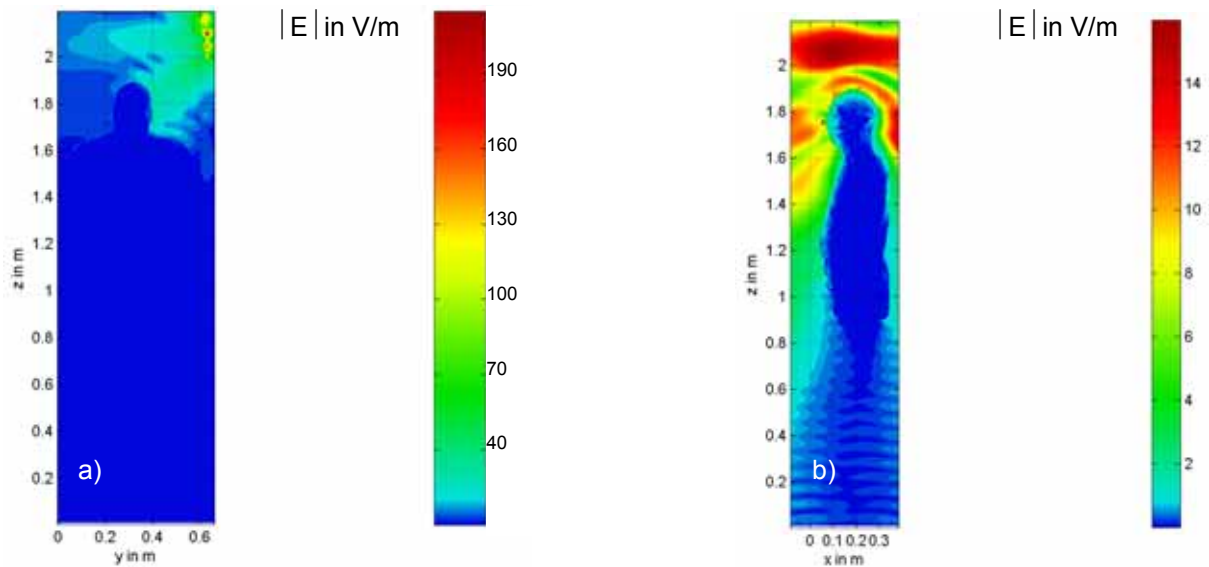


Bild 40: Von dem mit 100 mW bei 2.450 MHz abstrahlenden wandmontierten W-LAN-Router hervorgerufene elektrische Feldstärkeverteilung in zwei Längsschnitten durch den stehenden Erwachsenen; a) bei $x = 0,22$ m (wie in Bild 39b) und b) bei $y = 0,32$ m

Ebenfalls durch die Strahlung eines mit 100 mW sendenden W-LAN-Routers exponiert wird ein Jugendlicher, der sich in einem Bild 7a entsprechenden Szenario aufhält (vgl. Tab. IIb, Endgerät 2, Szenario 3). Der W-LAN-Router steht auf dem Schreibtisch, etwa 1 m vom Rumpf des sitzenden Menschen entfernt. Wie bei allen Szenarien mit nicht wandmontierten W-LAN-Routern ist außerdem ein aufgeklapptes Notebook vorhanden. In der Wand hinter dem Schreibtisch befindet sich ein Fenster. Die Verteilung der elektrischen Feldstärke, in Bild 41 durch einen Schnitt bei $y = 0,34$ m repräsentiert, zeigt keine nennenswerten Auffälligkeiten.

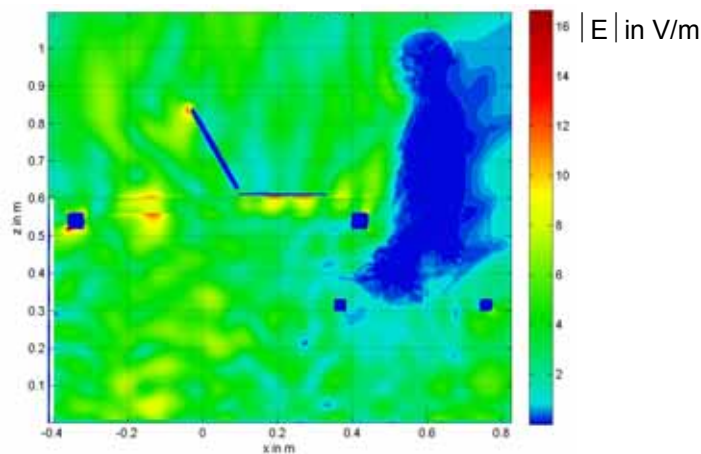


Bild 41: Von dem mit 100 mW bei 2.450 MHz abstrahlenden W-LAN-Router (auf dem Schreibtisch mit Notebook platziert) hervorgerufene elektrische Feldstärkeverteilung im Längsschnitt $y = 0,34$ m durch den sitzenden Jugendlichen

Beim letzten hier betrachteten Szenario ist ein W-LAN-Router (2.450 MHz, 100 mW) auf dem Fußboden in ca. 40 cm Abstand vor den Füßen des am Schreibtisch sitzenden Jugendlichen aufgestellt. An den Schnittdarstellungen des elektrischen Feldes in Bild 42 wird klar, dass sich im Wesentlichen eine Welle in Bodennähe ausbreitet, während die Feldstärken nach oben hin rasch abnehmen.

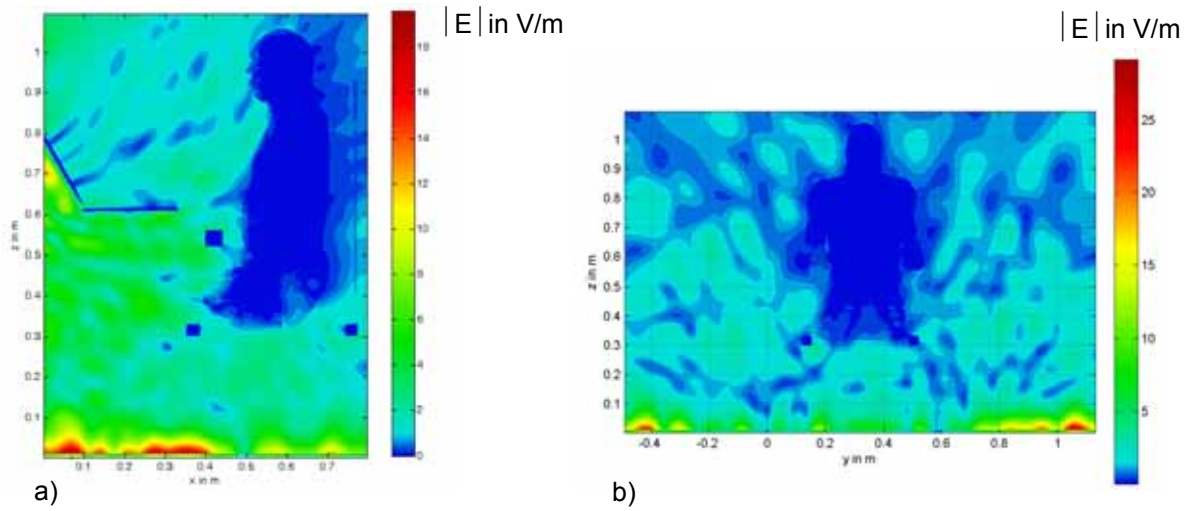


Bild 42: Von dem mit 100 mW bei 2.450 MHz abstrahlenden W-LAN-Router (auf dem Fußboden unter dem Schreibtisch platziert) hervorgerufene elektrische Feldstärkeverteilung in zwei Längsschnitten durch den sitzenden Jugendlichen; a) bei $y = 0,34$ m und b) bei $x = 0,6$ m

AP 4 Bestimmung der SAR-Verteilungen

4.1 SAR-Grenzwerte

Tabelle III gibt die von der International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection im Frequenzbereich von 100 kHz bis 10 GHz aufgestellten Basisgrenzwerte [ICNIRP 1998] zum Schutz der allgemeinen Bevölkerung wieder, die auch vom Rat der Europäischen Union den Mitgliedsstaaten zur Umsetzung in nationale Bestimmungen empfohlen worden sind. Alle SAR-Werte sind als Mittelwerte über jeweils 6 Minuten aufzufassen. Das Bezugsvolumen für die Teilkörper-SAR soll 10 g Gewebemasse enthalten, ist aber hinsichtlich seiner geometrischen Form nicht eindeutig festgelegt.

Hier wird - wie in den meisten publizierten Untersuchungen - immer ein würfelförmiges Gewebevolumen verwendet. Die entsprechende Vorgehensweise zur Bestimmung der SAR wird in [BfS 2006] erläutert.

Ganzkörper-SAR (bezogen auf den gesamten Körper)	Teilkörper-SAR (bezogen auf 10 g Gewebe in Kopf und Rumpf)	Teilkörper-SAR (bezogen auf 10 g Gewebe in den Gliedmaßen)
0,08 W/kg	2 W/kg	4 W/kg

Tabelle III: SAR-Grenzwerte für die Allgemeinbevölkerung

4.2 SAR-Verteilungen für die in Abschnitt 3.4 behandelten Szenarien

In Bild 43 ist für den am Schreibtisch vor einer DECT-Mobilstation und einem Notebook sitzenden Erwachsenen in derselben Schnittebene wie in Bild 32a die Verteilung der lokalen SAR in logarithmischer Skalierung dargestellt. Der Bezugswert $SAR_{\text{voxel_max}}$ ist das Maximum des jeweiligen Verhältnisses von lokaler Verlustleistung und Gewebemasse aller im gezeigten Schnitt auftretenden Voxel, wobei beim vorliegenden Körpermodell sowohl die Gewebemasse der Voxel als auch die Voxelgröße variiert.

Qualitativ ist zu erkennen, dass die SAR im oberflächennahen vorderen Teil des Kopfes/Rumpfes am größten ist und nach innen sehr schnell abnimmt. Die wichtigen SAR-Vergleichsgrößen Ganzkörper-SAR (SAR_{GK}) und maximale 10 g-Teilkörper-SAR ($SAR_{\text{max}}^{10\text{g}}$) errechnen sich aus der räumlichen SAR-Verteilung für den gesamten Körper; daher spielt der o.g. Maximalwert $SAR_{\text{voxel_max}}$ des einzelnen Schnittes nur eine untergeordnete Rolle. Da die SAR-Werte auch in Bezug auf die geltenden Grenzwerte beurteilt werden sollen und diese unterschiedlich für Rumpf/Kopf und Extremitäten sind, wird im Rechenverfahren bei der Suche von $SAR_{\text{max}}^{10\text{g}}$ zwischen diesen beiden Körperregionen unterschieden.

Für das vorliegende Szenario erhält man bei der im DECT-Multiuserbetrieb bei Vollauslastung möglichen mittleren Leistung von 215 mW^{*}: $SAR_{\text{GK}} = 421 \mu\text{W/kg}$ (0,53% vom Grenzwert), $SAR_{\text{max}}^{10\text{g}} = 15,7 \text{ mW/kg}$ im Rumpf (0,78%) und $SAR_{\text{max}}^{10\text{g}} = 47,5 \text{ mW/kg}$ in den Gliedmaßen (1,19%), wobei das Maximum in der rechten Hand auftritt, weil sie dem Endgerät am nächsten kommt. Bei anderen Sendeleistungen im ansonsten gleichen Szenario, beispielsweise bei für einen DECT-Einzelnutzer realistischerweise anzunehmendem Höchstwert von ca. 10 mW, können die SAR-Werte einfach linear umgerechnet werden: $SAR_{\text{GK}} = 19,6 \mu\text{W/kg}$ (0,025% vom Grenzwert), $SAR_{\text{max}}^{10\text{g}} = 2,2 \text{ mW/kg}$ in den Gliedmaßen (0,06%).

^{*}) Die Sendeleistung wurde hier als 'worst case' der maximalen EIRP gemäß DECT-Spezifikationen gleichgesetzt.

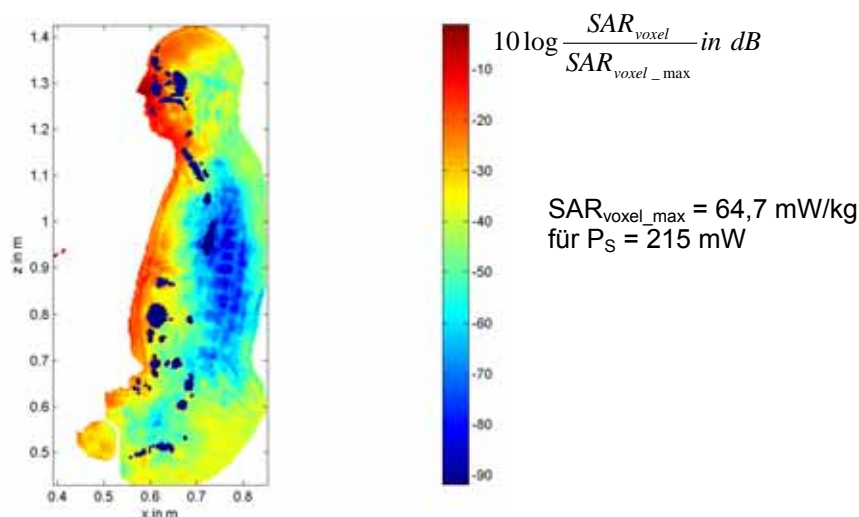


Bild 43: Lokale SAR-Verteilung für das Szenario mit DECT-Basisstation als Feldquelle in einem Längsschnitt durch den sitzenden Erwachsenen bei $y = 0,32 \text{ m}$

Die zum Feldschnitt aus Bild 33 für einen am Schreibtisch mit DECT-Basisstation stehenden Jugendlichen gehörende lokale SAR-Verteilung ist in Bild 44a wiedergegeben. Erwartungsgemäß wird der Körper durch das in ca. 60 cm Höhe rechts vor dem Nutzer positionierte Endgerät von der Frontseite her exponiert, vor allem rechtsseitig, wie Bild 44b zeigt. Aber auch der Beinbereich von den Knien abwärts ist in durchaus vergleichbarer Größenordnung der durch die Tischplatte transmittierten Strahlung ausgesetzt. Bei 215 mW mittlerer Sendeleistung ergibt sich: $SAR_{GK} = 330 \mu\text{W/kg}$ (0,41% vom Grenzwert), $SAR_{max}^{10g} = 4,8 \text{ mW/kg}$ im Rumpf (0,24%) und $SAR_{max}^{10g} = 10,3 \text{ mW/kg}$ in den Gliedmaßen (0,25%). Dabei liegt das Maximum an der rechten Hand.

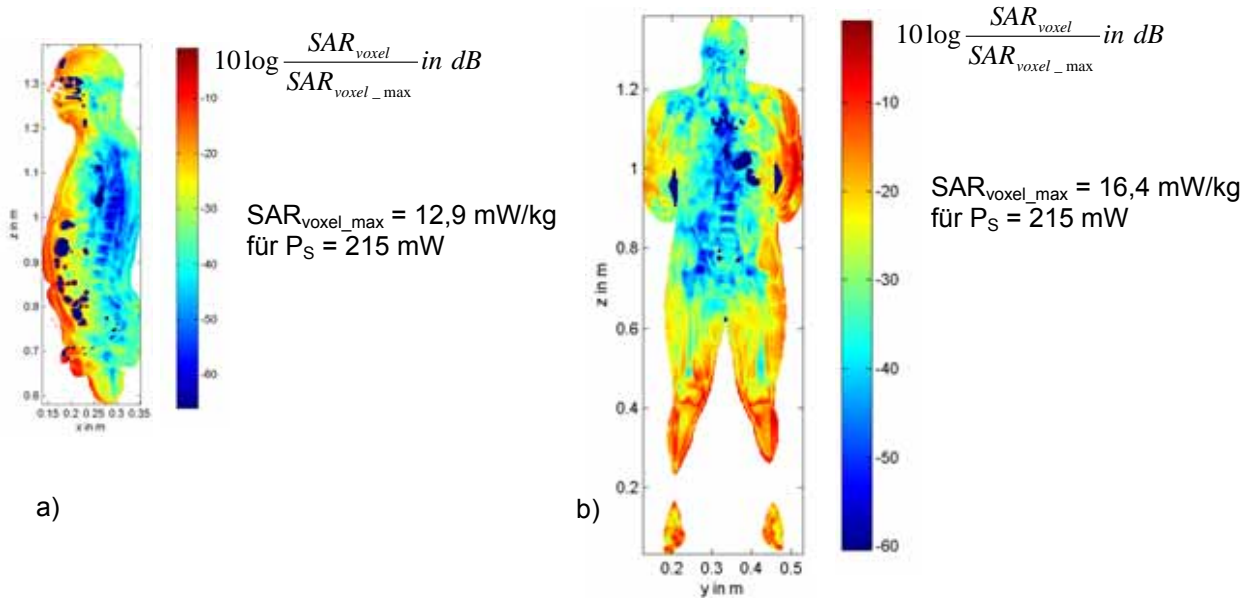


Bild 44: Lokale SAR-Verteilung für das Szenario mit DECT-Basisstation als Feldquelle in zwei Längsschnitten durch den stehenden Jugendlichen;
a) bei $y = 0,34 \text{ m}$ (wie in Bild 33) und b) bei $x = 0,26 \text{ m}$

In Bild 45 ist die SAR-Verteilung für den Jugendlichen mit Laptop im GPRS-Betrieb in der gleichen Schnittebene wie in Bild 35b dargestellt. Es dominiert der lokale Einfluss des Feldes in unmittelbarer Nähe der PCMCIA-Karte. Unter Annahme einer gemäß 'power class 4' zulässigen Sendeleistung von 1,92 W pro Zeitschlitz (2 W pro HF-'burst') und der 'multislot class 12' (Tab. I) ergeben sich eine mittlere Leistung von 960 mW und die SAR-Werte $SAR_{GK} = 8,8 \text{ mW/kg}$ (11,2%), $SAR_{max}^{10g} = 46,4 \text{ mW/kg}$ (2,32%) im Rumpf und $SAR_{max}^{10g} = 640 \text{ mW/kg}$ (16%) links oben im linken Oberschenkel.

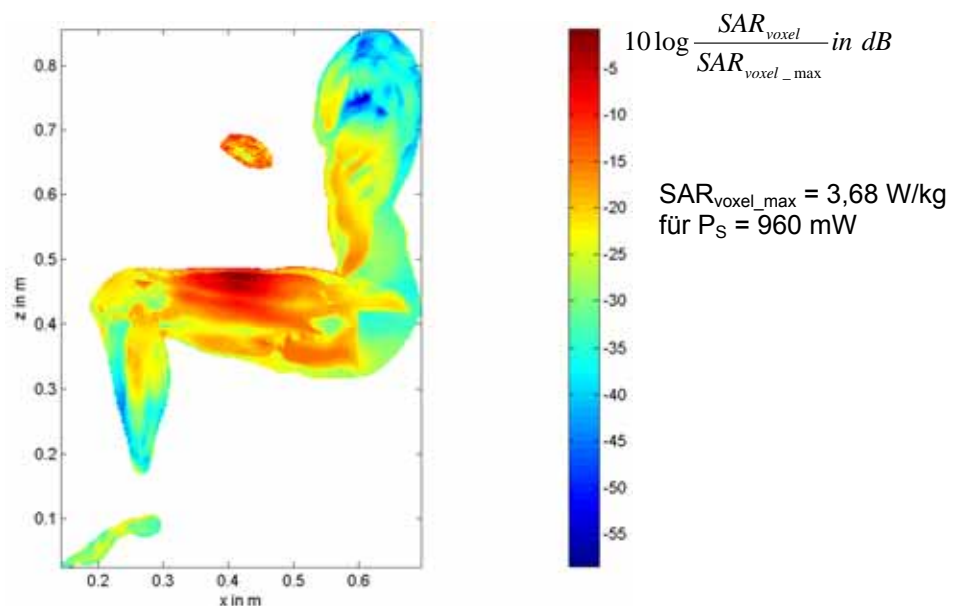


Bild 45: Lokale SAR-Verteilung für den Jugendlichen mit Notebook auf den Oberschenkeln und PCMCIA-Karte im GPRS-Modus (900 MHz) als Feldquelle in einem Längsschnitt bei $y = 0,24 \text{ m}$

Die folgenden drei Fälle betreffen die Expositionsszenarien mit dem W-LAN-Router.

Bild 48 zeigt die dem Feld des wandmontierten W-LAN-Routers aus Bild 39a zuzuordnende SAR-Verteilung. Aufgrund der Positionierung des Körpers zum Router wird erwartungsgemäß hauptsächlich die rechte Kopfseite der Person exponiert. Dementsprechend ergibt die Auswertung der vollständigen Berechnung ein Maximum des Teilkörper-SAR-Wertes in unmittelbarer Nähe des rechten Ohres in Höhe von $SAR^{10g}_{max} = 1,76 \text{ mW/kg}$ (bei einer angenommenen mittleren Sendeleistung von 100 mW) und (bei gleicher Leistung) einen Ganzkörper-Wert von $SAR_{GK} = 86,6 \text{ }\mu\text{W/kg}$.

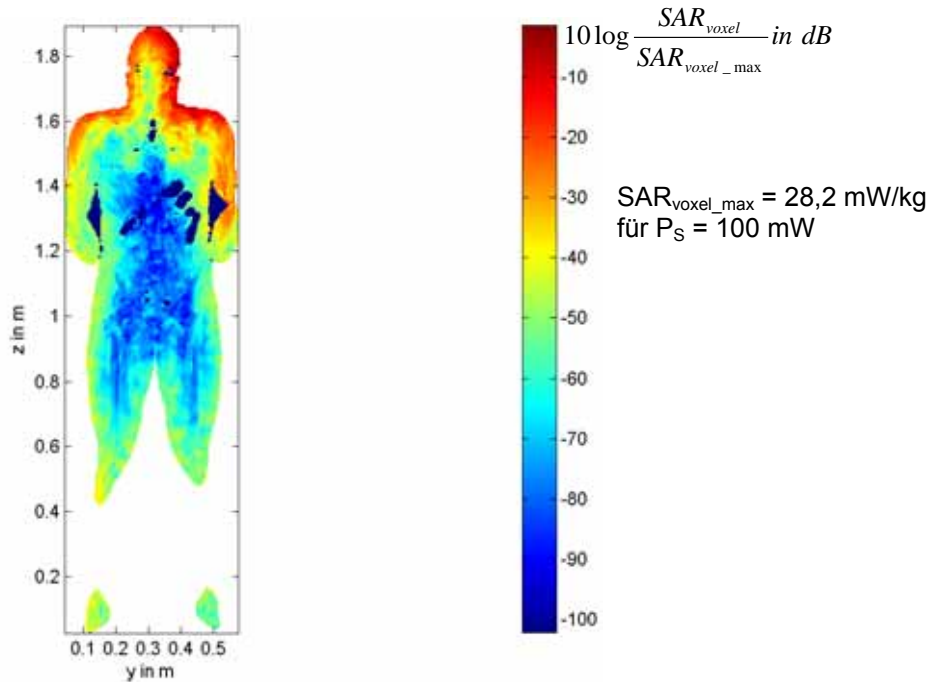


Bild 48: Lokale SAR-Verteilung für das Szenario mit wandmontiertem W-LAN-Router als Feldquelle in einem Längsschnitt des stehenden Erwachsenen bei $x = 0,22 \text{ m}$ (Ansicht von hinten)

Für die Exposition des am Schreibtisch vor einem Notebook und dem aktiven W-LAN-Router sitzenden Jugendlichen in Anlehnung an Bild 7a ist in Bild 49 die SAR-Verteilung als y-Schnitt dargestellt. Die – gemessen an den Grenzwerten - insgesamt recht schwache Exposition erfolgt im Wesentlichen frontal mit einem lokalen Maximum im Bereich der Nase. Im Einzelnen ergeben sich bei angenommener Leistung von 100 mW*) die Werte: $SAR_{GK} = 94 \text{ }\mu\text{W/kg}$ (0,12%), $SAR^{10g}_{max} = 1,6 \text{ mW/kg}$ im Rumpf (0,08%) und $SAR^{10g}_{max} = 2,4 \text{ mW/kg}$ in den Gliedmaßen (0,06%). *) Beim zulässigen EIRP-Grenzwert von 100 mW und Verwendung einer Dipolantenne dürfte die Sendeleistung maximal 61 mW betragen.

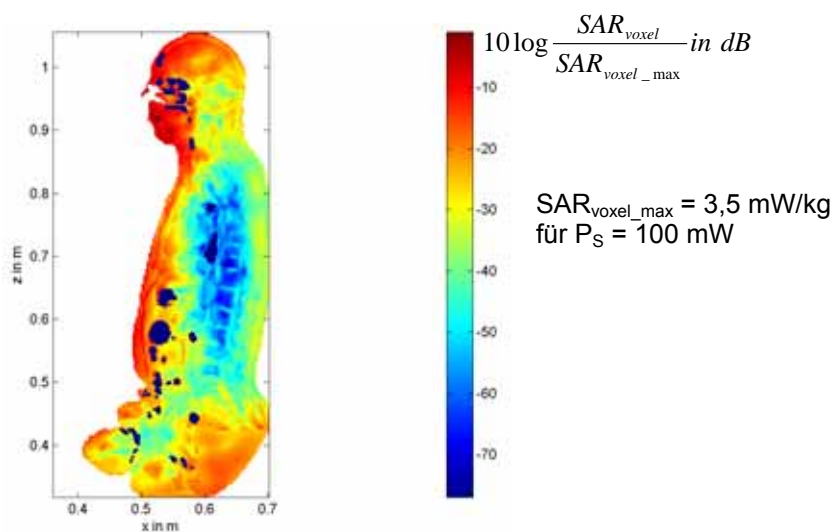


Bild 49: Lokale SAR-Verteilung für das Szenario mit W-LAN-Router auf dem Schreibtisch als Feldquelle in einem Längsschnitt des sitzenden Jugendlichen bei $y = 0,34 \text{ m}$

Für dasselbe Grundscenario, allerdings mit dem W-LAN-Router unter dem Schreibtisch stehend, zeigt Bild 50 die SAR-Verteilung in dem gewohnten Schnitt bei $x = 0,6$ m (a) sowie in einem Längsschnitt durch das rechte Bein (b), in dem ungefähr das Teilkörper-SAR-Maximum auftritt.

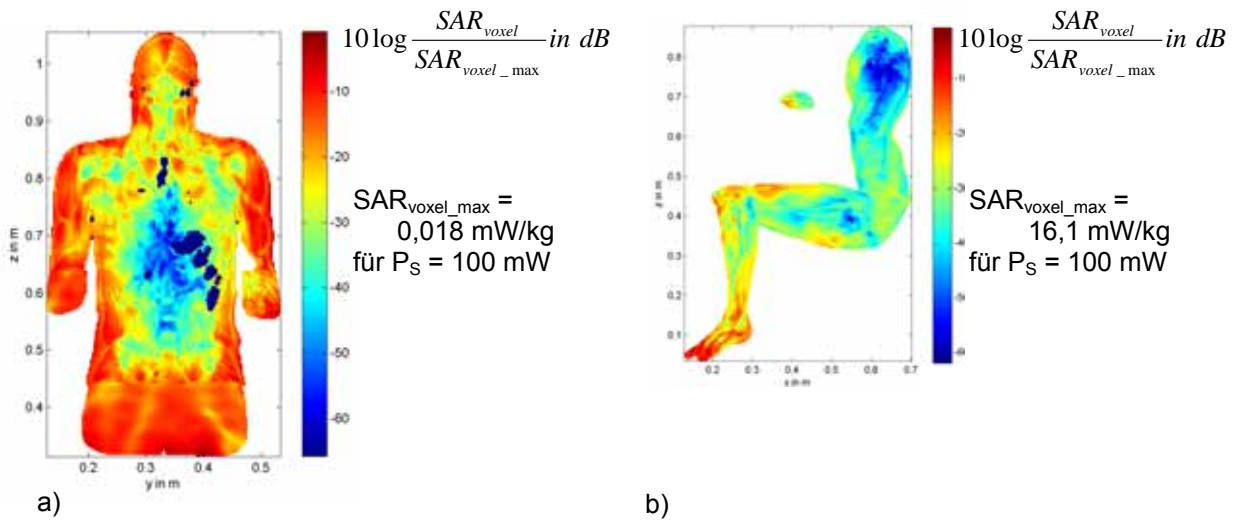


Bild 50: Lokale SAR-Verteilung für das Szenario mit W-LAN-Router auf dem Fußboden als Feldquelle in zwei Längsschnitten durch den sitzenden Jugendlichen; a) bei $x = 0,6$ m und b) bei $y = 0,44$ m

Die vollständige Auswertung der dreidimensionalen Daten für $P_S = 100 \text{ mW}$ ergibt: $SAR_{GK} = 43,7 \text{ } \mu\text{W/kg}$ (0,055%), $SAR_{max}^{10g} = 129,9 \text{ } \mu\text{W/kg}$ im Rumpf (0,006%) und $SAR_{max}^{10g} = 5,9 \text{ mW/kg}$ im rechten Fuß (0,15%). Es liegt somit eine sehr lokale Exposition der unteren Extremitäten vor.

4.3 Katalog von SAR-Verteilungen für alle Szenarien aus Tabelle II

Eine verbale Diskussion aller berechneten Szenarien aus Tabelle IIa und IIb, wie sie für 9 ausgewählte Szenarien in den Abschnitten 3.4 und 4.2 durchgeführt wurde, soll hier nicht stattfinden, weil dies eine Wiederholung bereits angeführter Argumente bedeuten würde und es effektiver ist, die wesentlichen Ergebnisse in einer übersichtlichen formalisierten Darstellung zu vermitteln. Im Folgenden werden daher selbst erklärende Katalogblätter für die 46 aufgelisteten SAR-Untersuchungen bereitgestellt, die – nach Endgeräten sortiert – jeweils die SAR-Verteilungen durch zwei Längsschnitte des Körpermodells in logarithmischem Maßstab wiedergeben und eine für eine einheitliche Sendeleistung von $P_S = 100$ mW durchgeführte Auswertung der relevanten SAR-Werte und ihrer Grenzwertausschöpfung sowie die Ortsangabe der maximalen Teilkörper-SAR enthalten. Die Ermittlung von SAR-Werten und von Grenzwertausschöpfungen für eine von 100 mW abweichende Sendeleistung kann durch lineare Umrechnung vorgenommen werden.

Wenn gleiche Szenarien sowohl mit dem Körpermodell des Erwachsenen als auch des Jugendlichen berechnet wurden, sind beide Ergebnisse untereinander auf einem Blatt dargestellt.

Die Kurzbezeichnung der Szenarien, die zu Beginn den Namen des Endgeräts und eine Nummer enthält, ergibt sich in Analogie zu Tabelle IIa und IIb.

Die Abkürzungen bedeuten:

Auf Wand	Router wandmontiert
Auf Boden	Router steht auf Fußboden
BT	Bluetooth-Betrieb des Notebooks (2.450 MHz)
Close	geschlossenes Notebook
Dect	DECT-Basisstation (Endgerät 2)(1.900 MHz)
Er	Erwachsener
Fenster	Schreibtisch mit Endgerät steht vor Fenster
Frei	Notebook frei von Wandeinflüssen
GPRS	GPRS-Betrieb des Notebooks (900 MHz)
Ju	Jugendlicher
Knie	Notebook liegt auf Oberschenkeln
Mobile	DECT-Basisstation mit aufgelegtem Mobilteil
NB	Notebook (Endgerät 1)
Notebook	DECT mit zusätzlichem passiven Notebook
Offen	aufgeklapptes Notebook
Router	W-LAN Router (Endgerät 3)(2.450 MHz)
Sitz	Sitzende Person
Steh	Stehende Person
Tisch	Endgerät steht auf Schreibtisch
UMTS	UMTS-Betrieb des Notebooks (1.950 MHz)
Wand	Endgerät steht vor Wand (auf Tisch oder Boden)
WLAN	W-LAN-Betrieb des Notebooks (2.450 MHz)

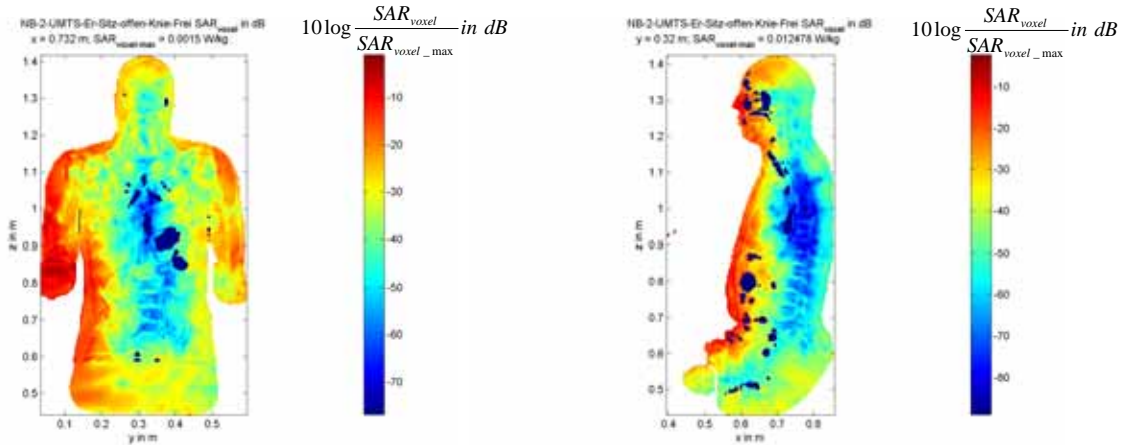
Beispiel: Die Bezeichnung Dect-2-Er-Sitz-Fenster weist auf das Szenario **2** zum Endgerät **DECT**-Basisstation mit dem **Erwachsenen** hin, der an einem Schreibtisch **sitzt**, welcher vor einer Wand mit einem **Fenster** steht.

4.3.1 Endgerät 1: Notebook-Funkschnittstelle

Der erste Teil des Katalogs bezieht sich auf die Szenarien mit Notebook-Funkschnittstellen, denen Konfigurationen in Anlehnung an Bild 7 zugrundeliegen.

a) UMTS (1.950 MHz)

NB-2-UMTS-Er-Sitz-offen-Knie-Frei



$P_s = 100 \text{ mW}$

$SAR_{GK} = 430,2 \text{ } \mu\text{W/kg}$ (0,54% vom Grenzwert)

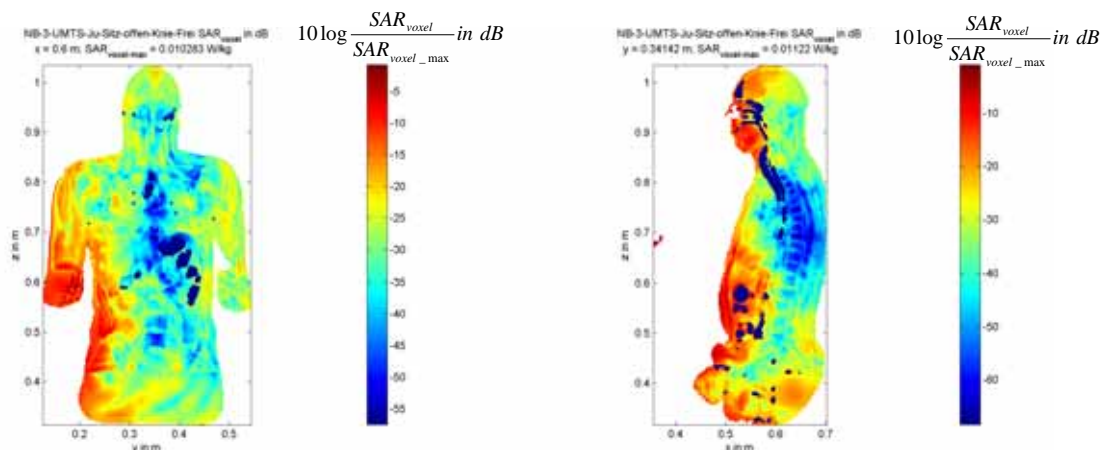
$SAR_{10g_{max}}^{\text{Rumpf}} = 3,54 \text{ mW/kg}$ (0,18% vom Grenzwert)

$SAR_{10g_{max}}^{\text{Gliedermaßen}} = 276,60 \text{ mW/kg}$ (6,92% vom Grenzwert)

Position des SAR_{10g}^{Rumpf} -Maximums : $x = 0,588 \text{ m}$; $y = 0,224 \text{ m}$; $z = 0,792 \text{ m}$

Position des $SAR_{10g}^{\text{Gliedermaßen}}$ -Maximums: $x = 0,437 \text{ m}$; $y = 0,152 \text{ m}$; $z = 0,654 \text{ m}$

NB-3-UMTS-Ju-Sitz-offen-Knie-Frei



$P_s = 100 \text{ mW}$

$SAR_{GK} = 557,8 \text{ } \mu\text{W/kg}$ (0,70 % vom Grenzwert)

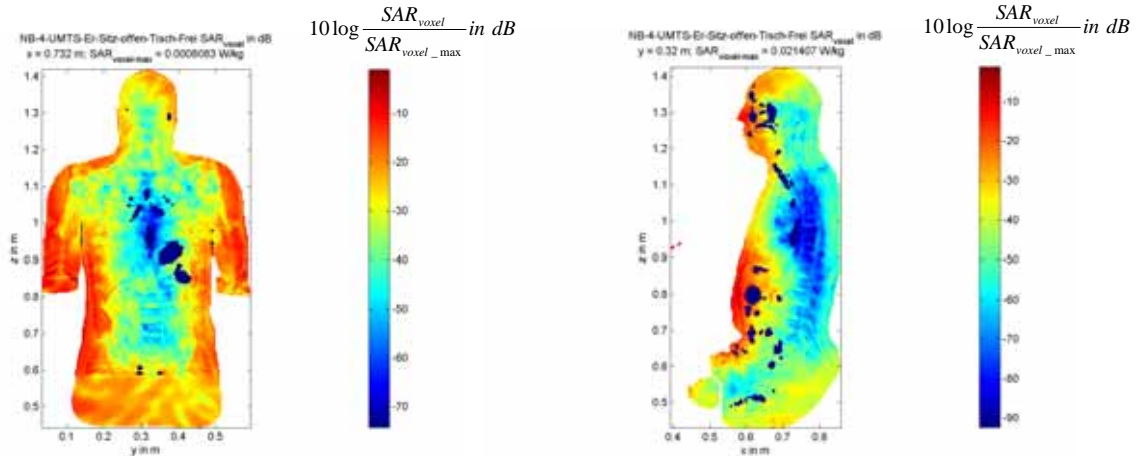
$SAR_{10g_{max}}^{\text{Rumpf}} = 5,65 \text{ mW/kg}$ (0,28% vom Grenzwert)

$SAR_{10g_{max}}^{\text{Gliedermaßen}} = 59,87 \text{ mW/kg}$ (1,50% vom Grenzwert)

Position des SAR_{10g}^{Rumpf} -Maximums : $x = 0,537 \text{ m}$; $y = 0,277 \text{ m}$; $z = 0,545 \text{ m}$

Position des $SAR_{10g}^{\text{Gliedermaßen}}$ -Maximums: $x = 0,432 \text{ m}$; $y = 0,243 \text{ m}$; $z = 0,485 \text{ m}$

NB-4-UMTS-Er-Sitz-offen-Tisch-Frei



$P_s = 100 \text{ mW}$

$SAR_{GK} = 121,2 \text{ } \mu\text{W/kg}$ (0,15% vom Grenzwert)

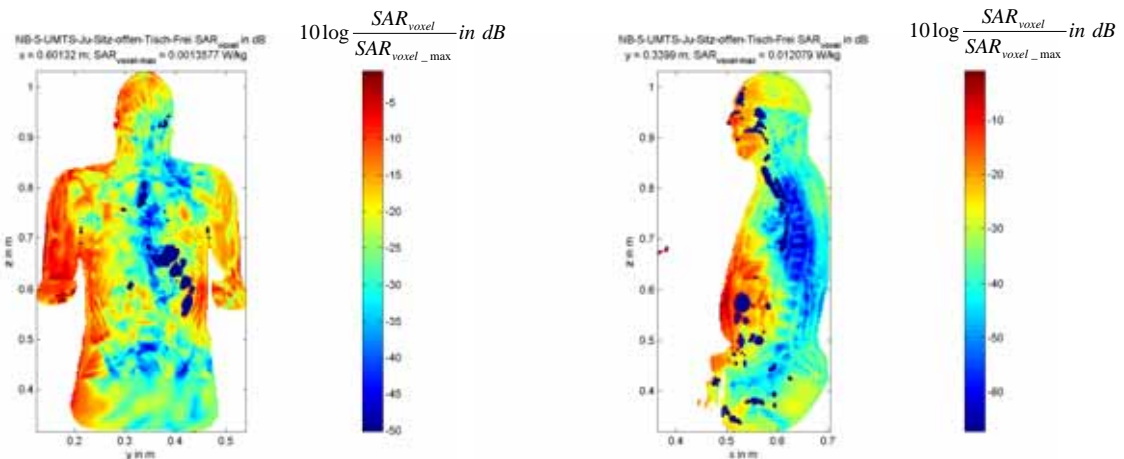
$SAR_{10g_{max}}^{\text{Rumpf}} = 4,92 \text{ mW/kg}$ (0,25% vom Grenzwert)

$SAR_{10g_{max}}^{\text{Gliedermaßen}} = 17,30 \text{ mW/kg}$ (0,43 % vom Grenzwert)

Position des SAR_{10g} -Maximums (Rumpf) : $x = 0,556 \text{ m}$; $y = 0,312 \text{ m}$; $z = 0,780 \text{ m}$

Position des SAR_{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,374 \text{ m}$; $y = 0,268 \text{ m}$; $z = 0,912 \text{ m}$

NB-5-UMTS-Ju-Sitz-offen-Tisch-Frei



$P_s = 100 \text{ mW}$

$SAR_{GK} = 238 \text{ } \mu\text{W/kg}$ (0,30% vom Grenzwert)

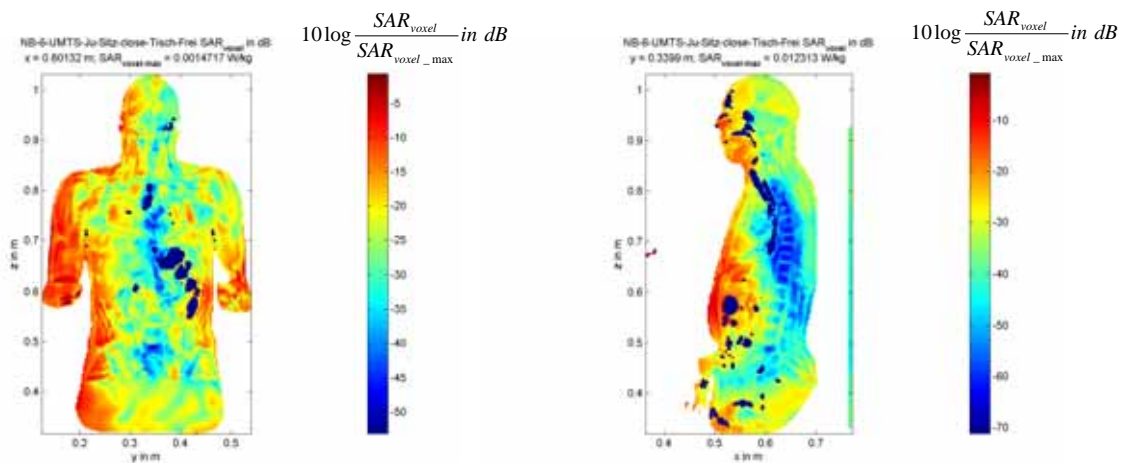
$SAR_{10g_{max}}^{\text{Rumpf}} = 6,18 \text{ mW/kg}$ (0,31% vom Grenzwert)

$SAR_{10g_{max}}^{\text{Gliedermaßen}} = 10,34 \text{ mW/kg}$ (0,26% vom Grenzwert)

Position des SAR_{10g} -Maximums (Rumpf) : $x = 0,499 \text{ m}$; $y = 0,308 \text{ m}$; $z = 0,588 \text{ m}$

Position des SAR_{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,351 \text{ m}$; $y = 0,314 \text{ m}$; $z = 0,663 \text{ m}$

NB-6-UMTS-Ju-Sitz-close-Tisch-Frei



$P_s = 100 \text{ mW}$

$SAR_{GK} = 229,7 \text{ } \mu\text{W/kg}$ (0,29% vom Grenzwert)

$SAR_{\text{max}}^{10g} \text{ (Rumpf)} = 4,74 \text{ mW/kg}$ (0,24% vom Grenzwert)

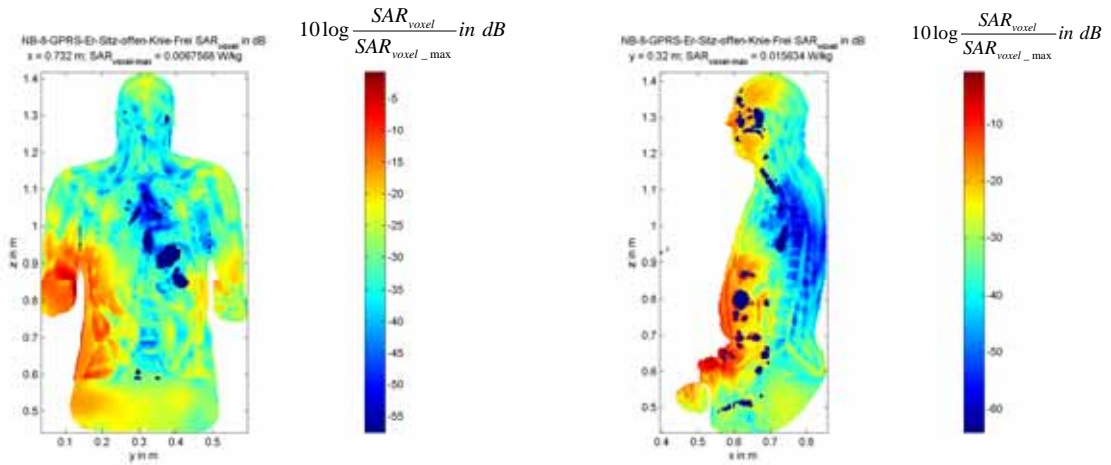
$SAR_{\text{max}}^{10g} \text{ (Gliederma\ss en)} = 10,37 \text{ mW/kg}$ (0,26% vom Grenzwert)

Position des SAR^{10g} -Maximums (Rumpf) : x = 0,514 m ; y = 0,387 m ; z = 0,596 m

Position des SAR^{10g} -Maximums (Gliederma\ss en): x = 0,356 m ; y = 0,317 m ; z = 0,669 m

b) GPRS (900 MHz)

NB-8-GPRS-Er-Sitz-offen-Knie-Frei



$P_s = 100 \text{ mW}$

$SAR_{GK} = 596,7 \text{ } \mu\text{W/kg}$ (0,75% vom Grenzwert)

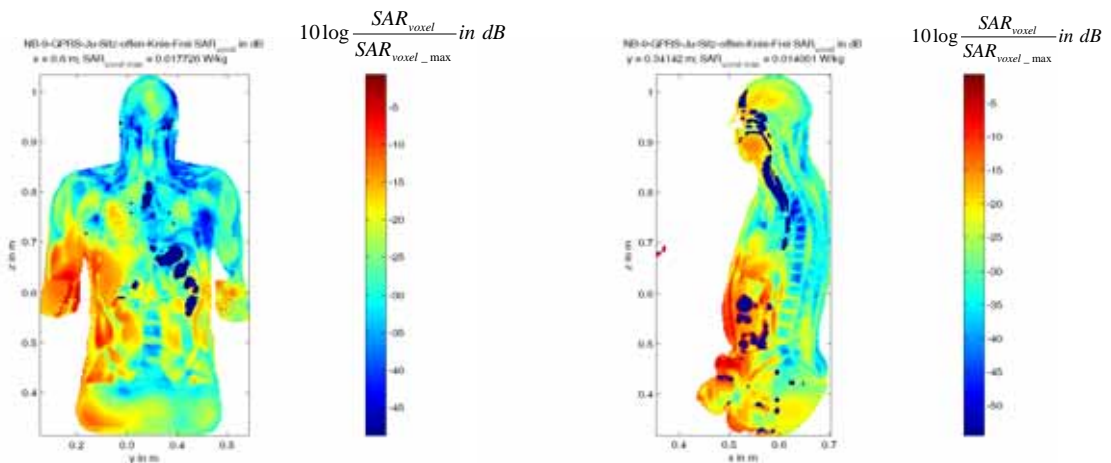
$SAR_{max}^{10g} \text{ (Rumpf)} = 3,76 \text{ mW/kg}$ (0,19 % vom Grenzwert)

$SAR_{max}^{10g} \text{ (Gliedermaßen)} = 154,60 \text{ mW/kg}$ (3,87 % vom Grenzwert)

Position des SAR^{10g} -Maximums (Rumpf) : $x = 0,644 \text{ m}$; $y = 0,228 \text{ m}$; $z = 0,684 \text{ m}$

Position des SAR^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,444 \text{ m}$; $y = 0,162 \text{ m}$; $z = 0,658 \text{ m}$

NB-9-GPRS-Ju-Sitz-offen-Knie-Frei



$P_s = 100 \text{ mW}$

$SAR_{GK} = 936 \text{ } \mu\text{W/kg}$ (1,17% vom Grenzwert)

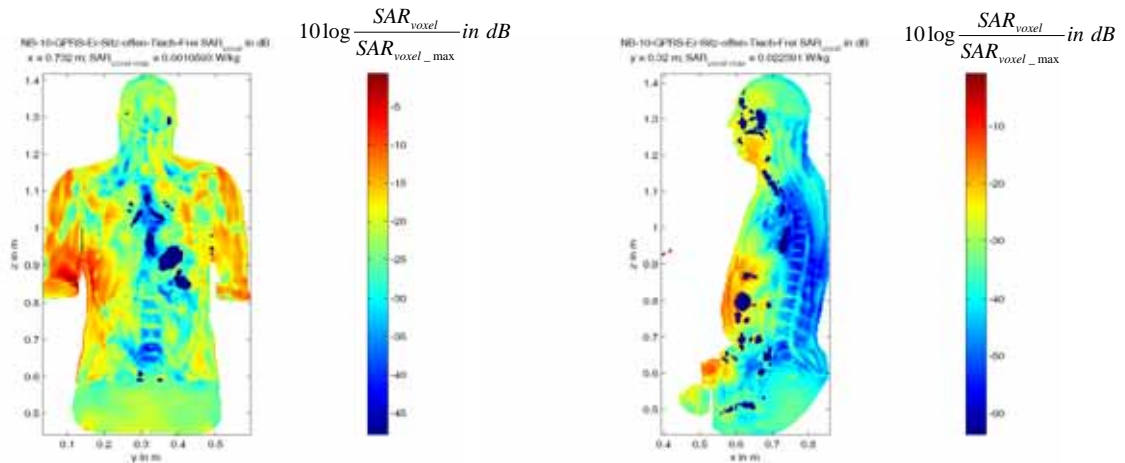
$SAR_{max}^{10g} \text{ (Rumpf)} = 4,85 \text{ mW/kg}$ (0,24 % vom Grenzwert)

$SAR_{max}^{10g} \text{ (Gliedermaßen)} = 66,31 \text{ mW/kg}$ (1,66% vom Grenzwert)

Position des SAR^{10g} -Maximums (Rumpf) : $x = 0,557 \text{ m}$; $y = 0,272 \text{ m}$; $z = 0,542 \text{ m}$

Position des SAR^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,420 \text{ m}$; $y = 0,246 \text{ m}$; $z = 0,468 \text{ m}$

NB-10-GPRS-Er-Sitz-offen-Tisch-Frei



$P_s = 100$ mW

$SAR_{GK} = 222,5$ μ W/kg (0,28% vom Grenzwert)

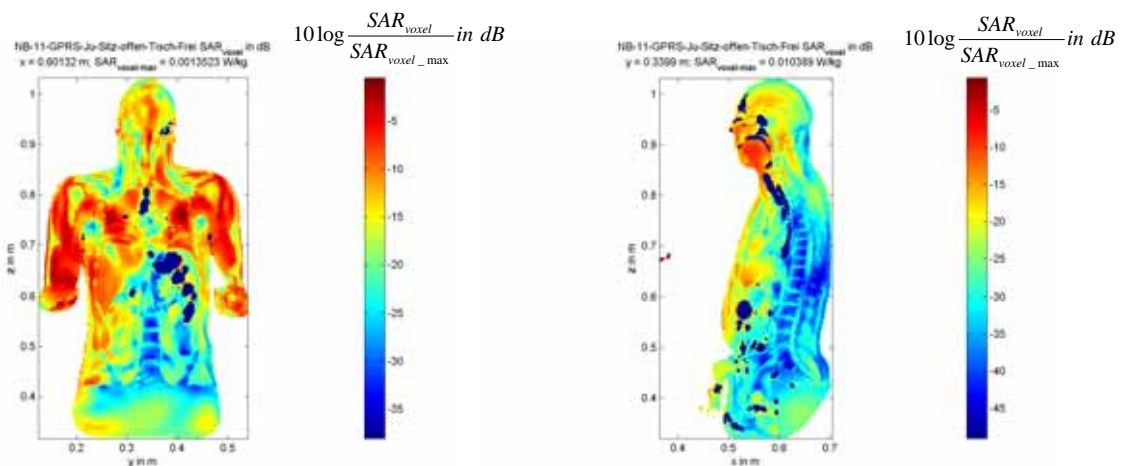
SAR_{max}^{10g} (Rumpf) = 2,17 mW/kg (0,11 % vom Grenzwert)

SAR_{max}^{10g} (Gliedermaßen) = 26,47 mW/kg (0,66% vom Grenzwert)

Position des SAR^{10g} -Maximums (Rumpf) : $x = 0,592$ m ; $y = 0,356$ m ; $z = 0,812$ m

Position des SAR^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,384$ m ; $y = 0,268$ m ; $z = 0,932$ m

NB-11-GPRS-Ju-Sitz-offen-Tisch-Frei



$P_s = 100$ mW

$SAR_{GK} = 443,6$ μ W/kg (0,55% vom Grenzwert)

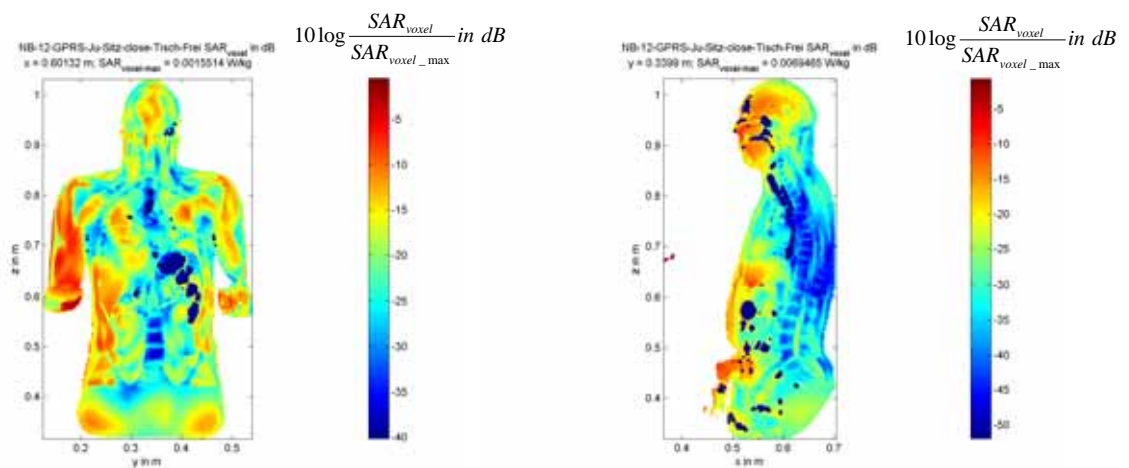
SAR_{max}^{10g} (Rumpf) = 1,76 mW/kg (0,09% vom Grenzwert)

SAR_{max}^{10g} (Gliedermaßen) = 24,49 mW/kg (0,61% vom Grenzwert)

Position des SAR^{10g} -Maximums (Rumpf) : $x = 0,558$ m ; $y = 0,279$ m ; $z = 0,710$ m

Position des SAR^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,394$ m ; $y = 0,273$ m ; $z = 0,681$ m

NB-12-GPRS-Ju-Sitz-close-Tisch-Frei



$P_s = 100 \text{ mW}$

$SAR_{GK} = 249,1 \text{ } \mu\text{W/kg}$ (0,31% vom Grenzwert)

$SAR_{\text{max}}^{10g} \text{ (Rumpf)} = 584 \text{ } \mu\text{W/kg}$ (0,03 % vom Grenzwert)

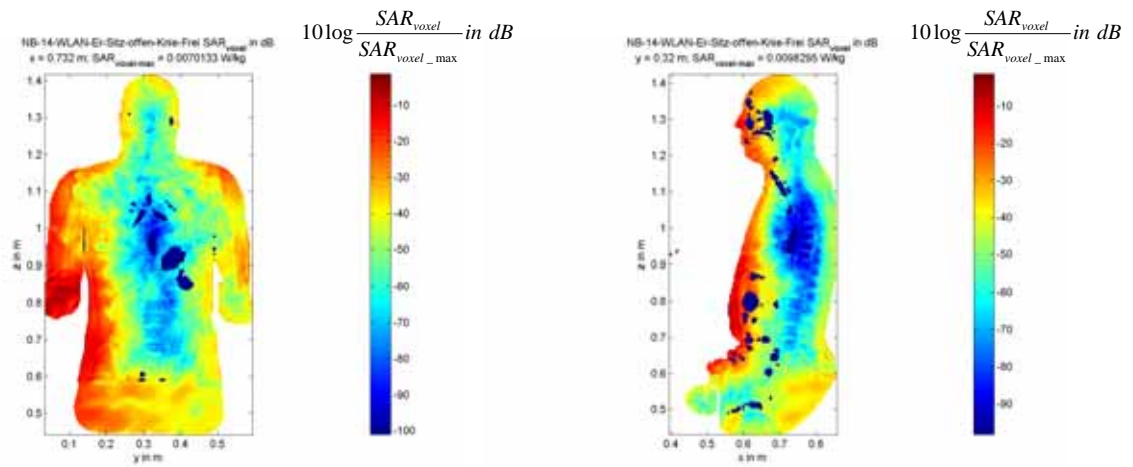
$SAR_{\text{max}}^{10g} \text{ (Gliedermaßen)} = 9,66 \text{ mW/kg}$ (0,24% vom Grenzwert)

Position des SAR^{10g} -Maximums (Rumpf) : x = 0,531 m ; y = 0,270 m ; z = 0,638 m

Position des SAR^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): x = 0,388 m ; y = 0,267 m ; z = 0,695 m

c) W-LAN (2.450 MHz)

NB-14-WLAN-Er-Sitz-offen-Knie-Frei



$P_s = 100 \text{ mW}$

$SAR_{GK} = 353,2 \text{ } \mu\text{W/kg}$ (0,44% vom Grenzwert)

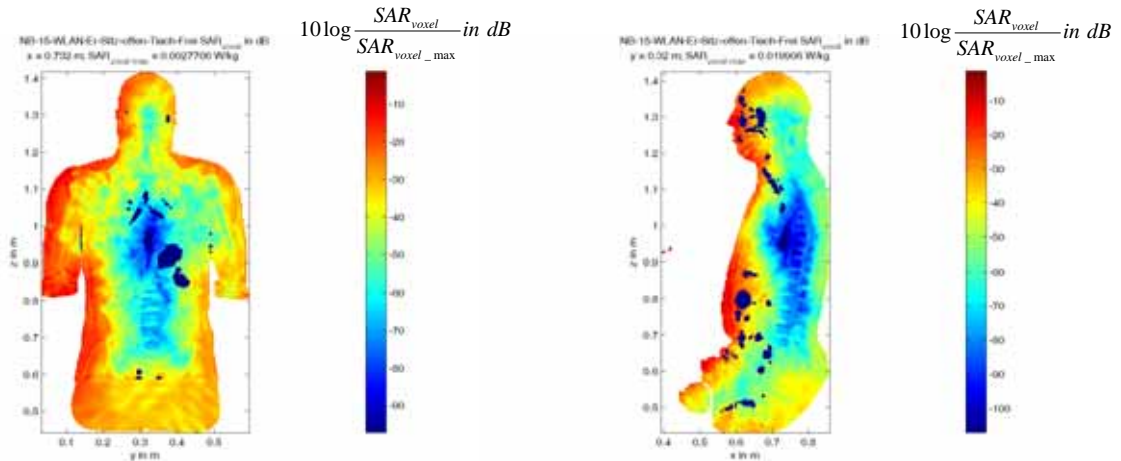
$SAR_{max}^{10g} \text{ (Rumpf)} = 9,93 \text{ mW/kg}$ (0,50% vom Grenzwert)

$SAR_{max}^{10g} \text{ (Gliedmaßen)} = 358,80 \text{ mW/kg}$ (8,97 % vom Grenzwert)

Position des SAR^{10g} -Maximums (Rumpf) : $x = 0,604 \text{ m}$; $y = 0,208 \text{ m}$; $z = 0,800 \text{ m}$

Position des SAR^{10g} -Maximums (Gliedmaßen): $x = 0,455 \text{ m}$; $y = 0,152 \text{ m}$; $z = 0,652 \text{ m}$

NB-15-WLAN-Er-Sitz-offen-Tisch-Frei



$P_s = 100 \text{ mW}$

$SAR_{GK} = 119,8 \text{ } \mu\text{W/kg}$ (0,15% vom Grenzwert)

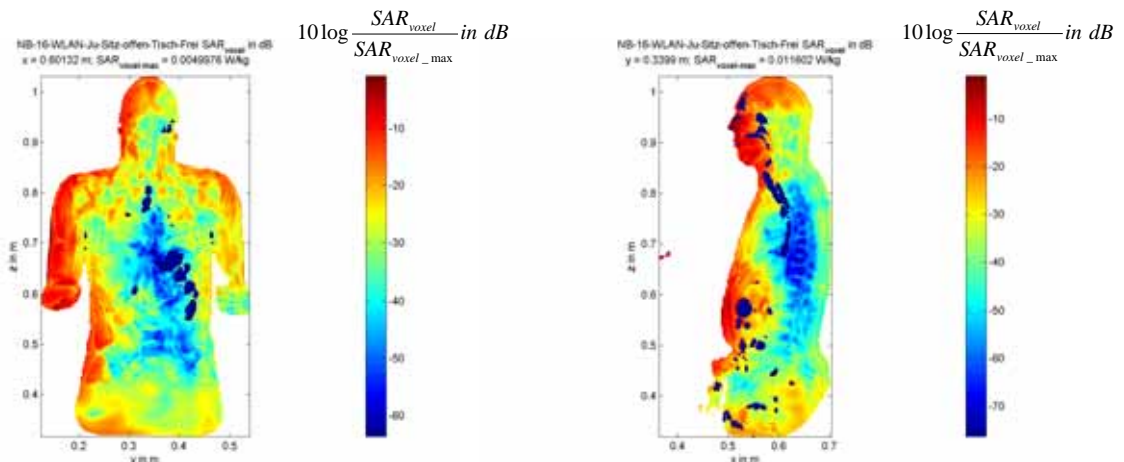
$SAR_{\text{max}}^{10g} \text{ (Rumpf)} = 5,38 \text{ mW/kg}$ (0,27% vom Grenzwert)

$SAR_{\text{max}}^{10g} \text{ (Gliedermaßen)} = 14,56 \text{ mW/kg}$ (0,36% vom Grenzwert)

Position des SAR^{10g} -Maximums (Rumpf) : $x = 0,604 \text{ m}$; $y = 0,208 \text{ m}$; $z = 0,798 \text{ m}$

Position des SAR^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,436 \text{ m}$; $y = 0,188 \text{ m}$; $z = 0,904 \text{ m}$

NB-16-WLAN-Ju-Sitz-offen-Tisch-Frei



$P_s = 100 \text{ mW}$

$SAR_{GK} = 275,9 \text{ } \mu\text{W/kg}$ (0,34% vom Grenzwert)

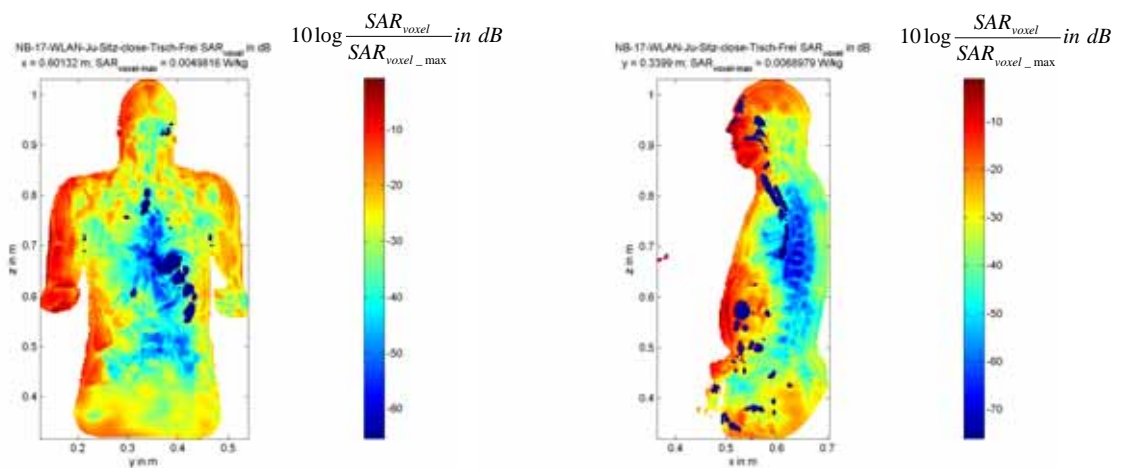
$SAR_{\text{max}}^{10g} \text{ (Rumpf)} = 4,25 \text{ mW/kg}$ (0,21% vom Grenzwert)

$SAR_{\text{max}}^{10g} \text{ (Gliedermaßen)} = 18,51 \text{ mW/kg}$ (0,46 % vom Grenzwert)

Position des SAR^{10g} -Maximums (Rumpf) : $x = 0,505 \text{ m}$; $y = 0,287 \text{ m}$; $z = 0,590 \text{ m}$

Position des SAR^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,473 \text{ m}$; $y = 0,197 \text{ m}$; $z = 0,590 \text{ m}$

NB-17-WLAN-Ju-Sitz-close-Tisch-Frei



$P_s = 100 \text{ mW}$

$SAR_{GK} = 245,9 \text{ } \mu\text{W/kg}$ (0,31% vom Grenzwert)

$SAR_{\text{max}}^{10g} \text{ (Rumpf)} = 3,94 \text{ mW/kg}$ (0,20 % vom Grenzwert)

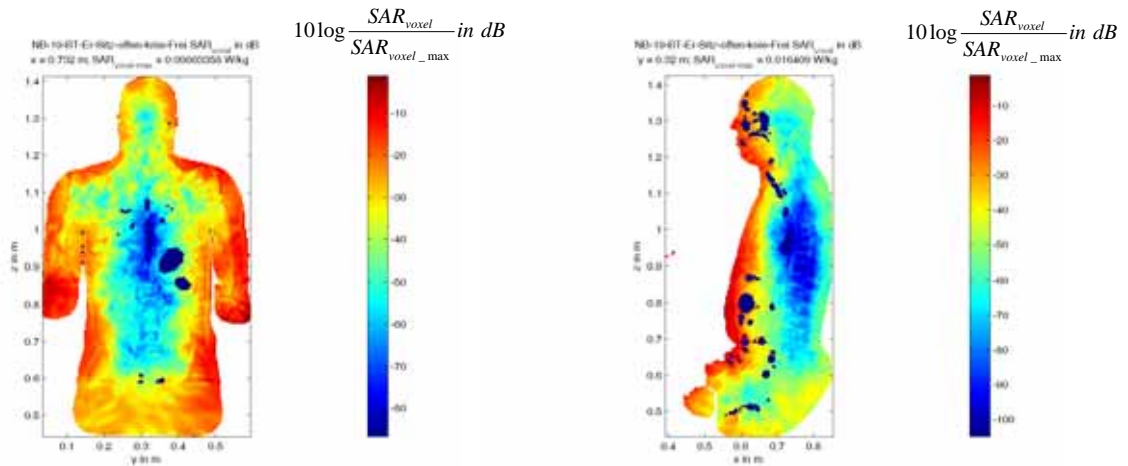
$SAR_{\text{max}}^{10g} \text{ (Gliedermaßen)} = 18,53 \text{ mW/kg}$ (0,46 % vom Grenzwert)

Position des SAR^{10g} -Maximums (Rumpf) : x = 0,505 m ; y = 0,287 m ; z = 0,590 m

Position des SAR^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): x = 0,473 m ; y = 0,197 m ; z = 0,590 m

d) Bluetooth (2.450 MHz)

NB-19-BT-Er-Sitz-offen-knie-Frei



$P_s = 100 \text{ mW}$

$SAR_{GK} = 531,2 \text{ } \mu\text{W/kg}$ (0,66% vom Grenzwert)

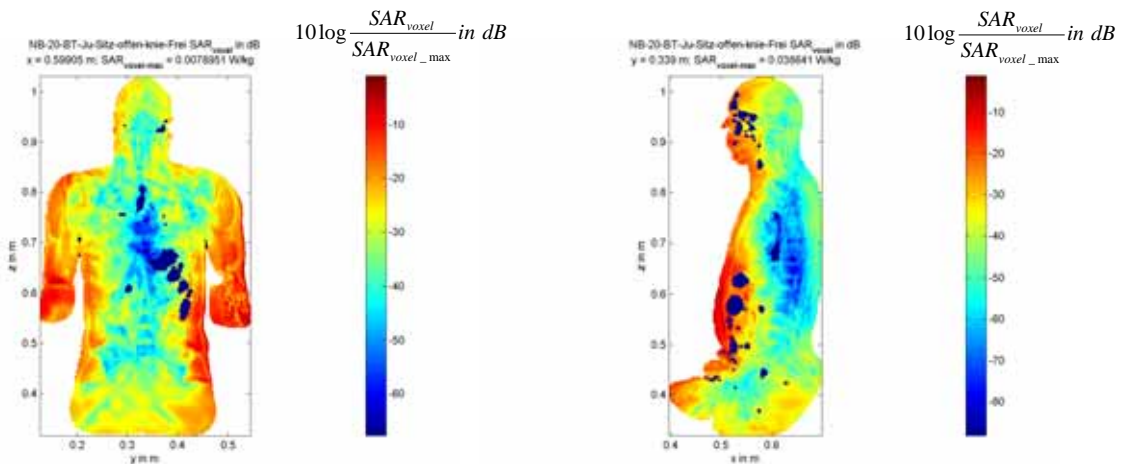
$SAR_{max}^{10g} \text{ (Rumpf)} = 5,14 \text{ mW/kg}$ (0,26% vom Grenzwert)

$SAR_{max}^{10g} \text{ (Gliedermaßen)} = 681,10 \text{ mW/kg}$ (17,03% vom Grenzwert)

Position des SAR^{10g} -Maximums (Rumpf) : $x = 0,552 \text{ m}$; $y = 0,316 \text{ m}$; $z = 0,776 \text{ m}$

Position des SAR^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,267 \text{ m}$; $y = 0,444 \text{ m}$; $z = 0,660 \text{ m}$

NB-20-BT-Ju-Sitz-offen-knie-Frei



$P_s = 100 \text{ mW}$

$SAR_{GK} = 1,05 \text{ mW/kg}$ (1,32% vom Grenzwert)

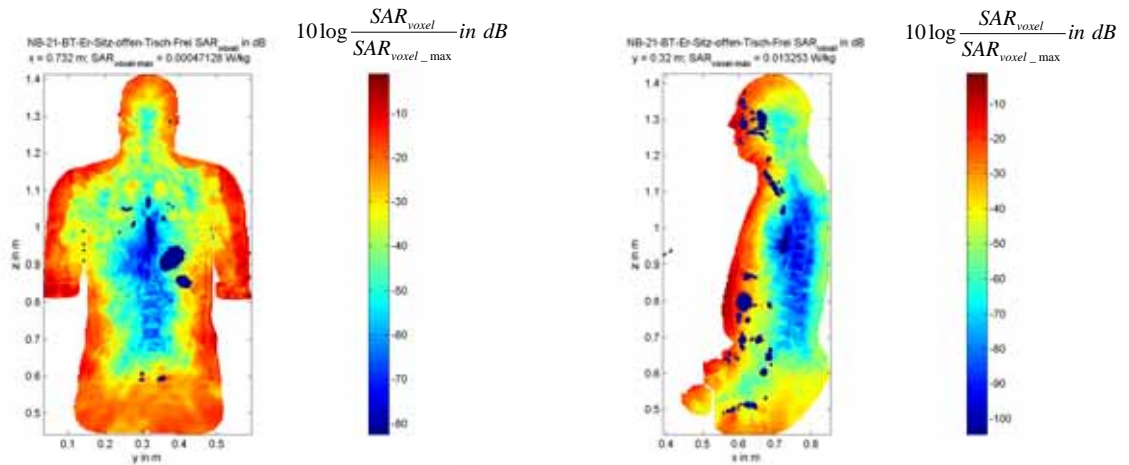
$SAR_{max}^{10g} \text{ (Rumpf)} = 10,01 \text{ mW/kg}$ (0,50% vom Grenzwert)

$SAR_{max}^{10g} \text{ (Gliedermaßen)} = 114,90 \text{ mW/kg}$ (2,87% vom Grenzwert)

Position des SAR^{10g} -Maximums (Rumpf) : $x = 0,497 \text{ m}$; $y = 0,394 \text{ m}$; $z = 0,585 \text{ m}$

Position des SAR^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,271 \text{ m}$; $y = 0,414 \text{ m}$; $z = 0,468 \text{ m}$

NB-21-BT-Er-Sitz-offen-Tisch-Frei



$P_S = 100 \text{ mW}$

$SAR_{GK} = 149 \text{ } \mu\text{W/kg}$ (0,19% vom Grenzwert)

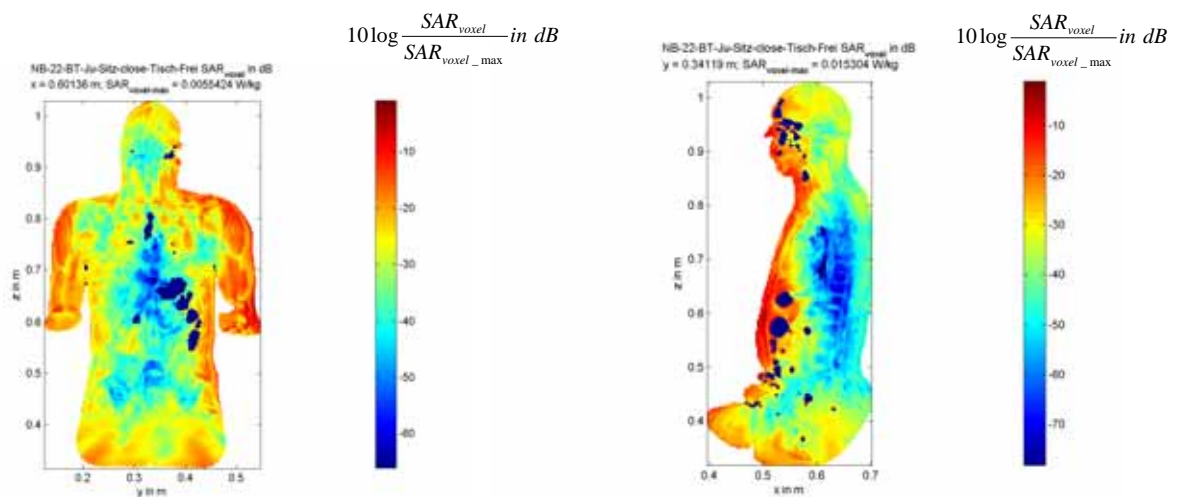
$SAR_{\text{max}}^{10g} \text{ (Rumpf)} = 5,75 \text{ mW/kg}$ (0,29% vom Grenzwert)

$SAR_{\text{max}}^{10g} \text{ (Gliedermaßen)} = 6,68 \text{ mW/kg}$ (0,17% vom Grenzwert)

Position des SAR^{10g} -Maximums (Rumpf) : $x = 0,564 \text{ m}$; $y = 0,300 \text{ m}$; $z = 0,830 \text{ m}$

Position des SAR^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,308 \text{ m}$; $y = 0,428 \text{ m}$; $z = 0,660 \text{ m}$

NB-22-BT-Ju-Sitz-close-Tisch-Frei



$P_s = 100 \text{ mW}$

$SAR_{GK} = 354,5 \text{ } \mu\text{W/kg}$ (0,44% vom Grenzwert)

$SAR_{max}^{10g} \text{ (Rumpf)} = 6,63 \text{ mW/kg}$ (0,33% vom Grenzwert)

$SAR_{max}^{10g} \text{ (Gliedermaßen)} = 18,96 \text{ mW/kg}$ (0,47% vom Grenzwert)

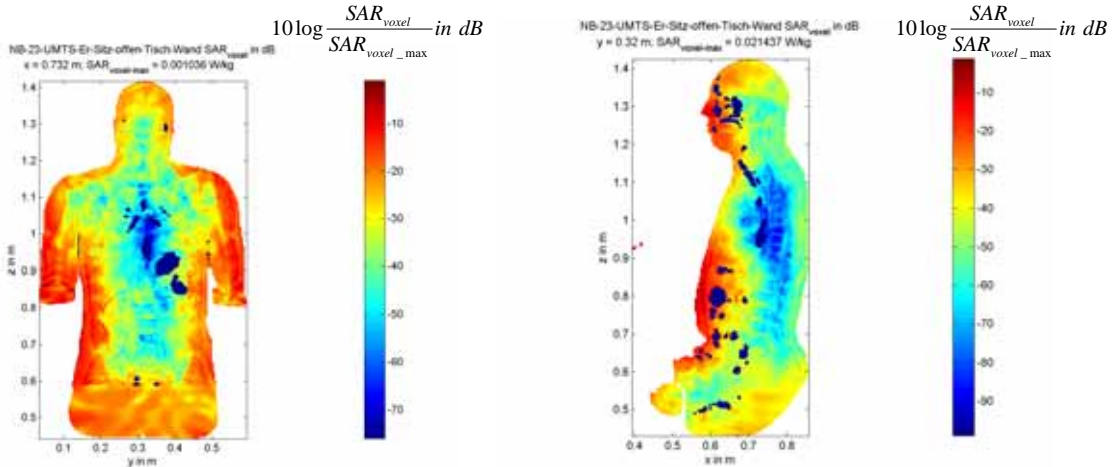
Position des SAR^{10g} -Maximums (Rumpf) : x = 0,493 m ; y = 0,382 m ; z = 0,588 m

Position des SAR^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): x = 0,359 m ; y = 0,315 m ; z = 0,682 m

e) Einfluss von Wänden

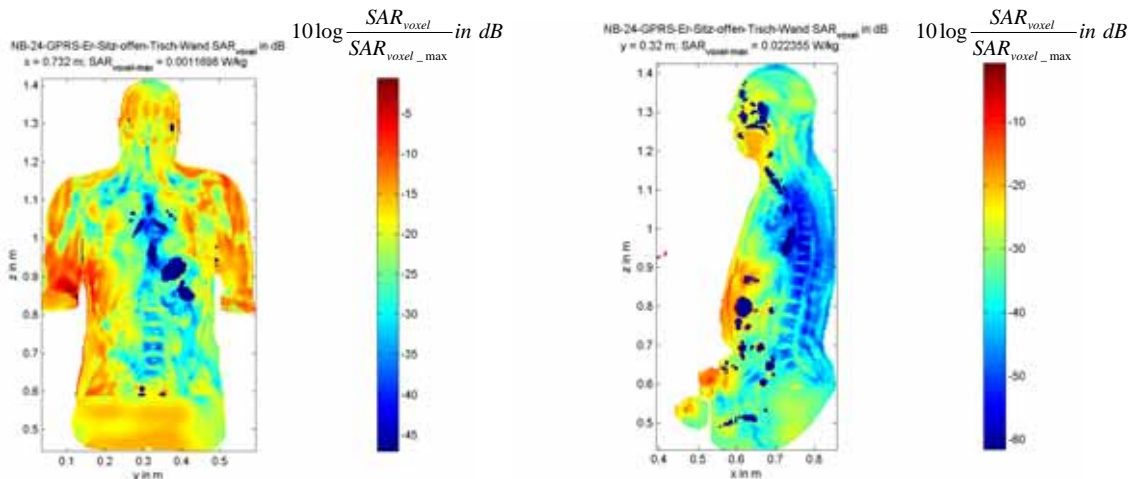
Für bereits bekannte Szenarien wurde untersucht, welchen Einfluss eine metallische Wand, die sich hinter dem Schreibtisch in ca. 1 m Abstand von der Person befindet, auf die Spezifische Absorptionsrate hat. Drei Beispiele für den sitzenden Erwachsenen werden gezeigt. Die Interpretation dieser Ergebnisse erfolgt in Abschnitt 4.4 im Zusammenhang mit den Betrachtungen zum Fehlerbudget.

NB-23-UMTS-Er-Sitz-offen-Tisch-Wand



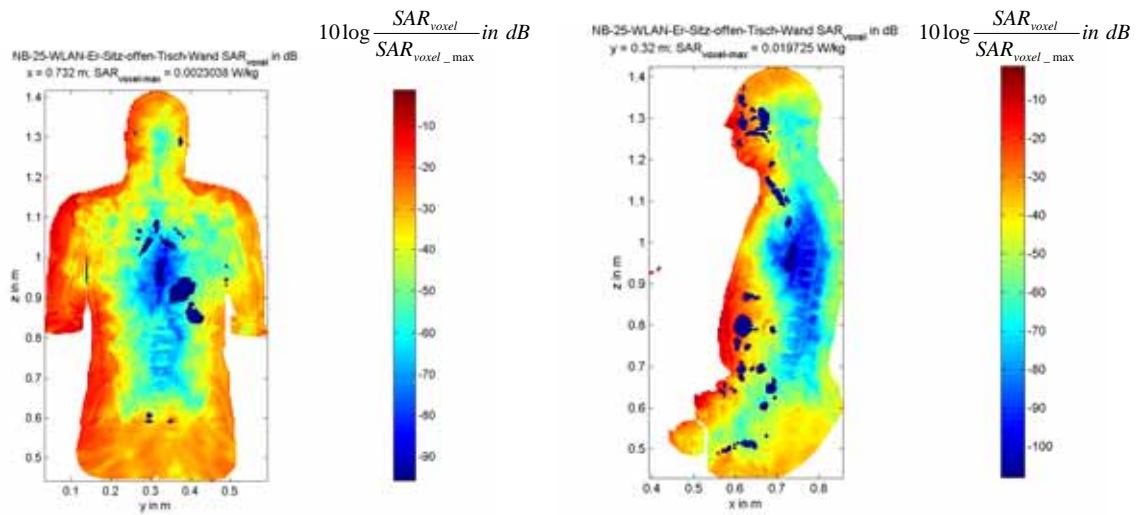
$P_s = 100 \text{ mW}$
 $SAR_{GK} = 132,7 \text{ } \mu\text{W/kg}$ (0,17% vom Grenzwert)
 SAR_{max}^{10g} (Rumpf) = 5,24 mW/kg (0,26% vom Grenzwert)
 SAR_{max}^{10g} (Gliedermaßen) = 18,37 mW/kg (0,46% vom Grenzwert)
 Position des SAR^{10g} -Maximums (Rumpf) : $x = 0,556 \text{ m}$; $y = 0,312 \text{ m}$; $z = 0,780 \text{ m}$
 Position des SAR^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,373 \text{ m}$; $y = 0,268 \text{ m}$; $z = 0,916 \text{ m}$

NB-24-GPRS-Er-Sitz-offen-Tisch-Wand



$P_s = 100 \text{ mW}$
 $SAR_{GK} = 238,6 \text{ } \mu\text{W/kg}$ (0,30% vom Grenzwert)
 SAR_{max}^{10g} (Rumpf) = 2,01 mW/kg (0,10% vom Grenzwert)
 SAR_{max}^{10g} (Gliedermaßen) = 26,32 mW/kg (0,66% vom Grenzwert)
 Position des SAR^{10g} -Maximums (Rumpf) : $x = 0,612 \text{ m}$; $y = 0,248 \text{ m}$; $z = 0,826 \text{ m}$
 Position des SAR^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,382 \text{ m}$; $y = 0,268 \text{ m}$; $z = 0,932 \text{ m}$

NB-25-WLAN-Er-Sitz-offen-Tisch-Wand



$P_S = 100 \text{ mW}$

$SAR_{GK} = 120,8 \mu\text{W/kg}$ (0,15% vom Grenzwert)

$SAR_{\text{max}}^{10g}(\text{Rumpf}) = 5,60 \text{ mW/kg}$ (0,28% vom Grenzwert)

$SAR_{\text{max}}^{10g}(\text{Gliedermaßen}) = 14,39 \text{ mW/kg}$ (0,36% vom Grenzwert)

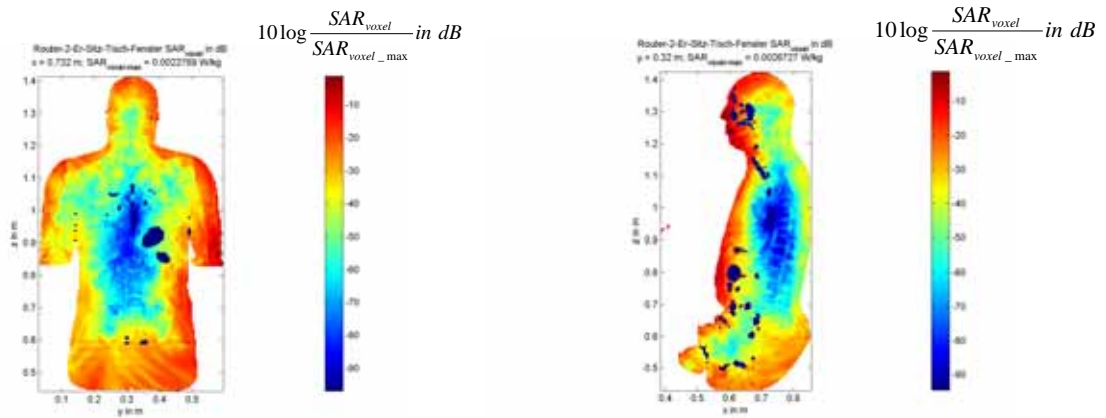
Position des SAR^{10g}-Maximums (Rumpf) : $x = 0,564 \text{ m}$; $y = 0,268 \text{ m}$; $z = 0,800 \text{ m}$

Position des SAR^{10g}-Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,436 \text{ m}$; $y = 0,188 \text{ m}$; $z = 0,904 \text{ m}$

4.3.2 Endgerät 2: W-LAN-Router (2.450 MHz)

Dieser zweite Teil des Katalogs enthält die Ergebnisse für die Szenarien mit einem auf oder unter dem Schreibtisch platzierten oder wandmontierten W-LAN-Router (vgl. Bilder 7a und 8).

Router-2-Er-Sitz-Tisch-Fenster



$P_s = 100 \text{ mW}$

SAR_{GK} = 47,4 $\mu\text{W/kg}$ (0,06% vom Grenzwert)

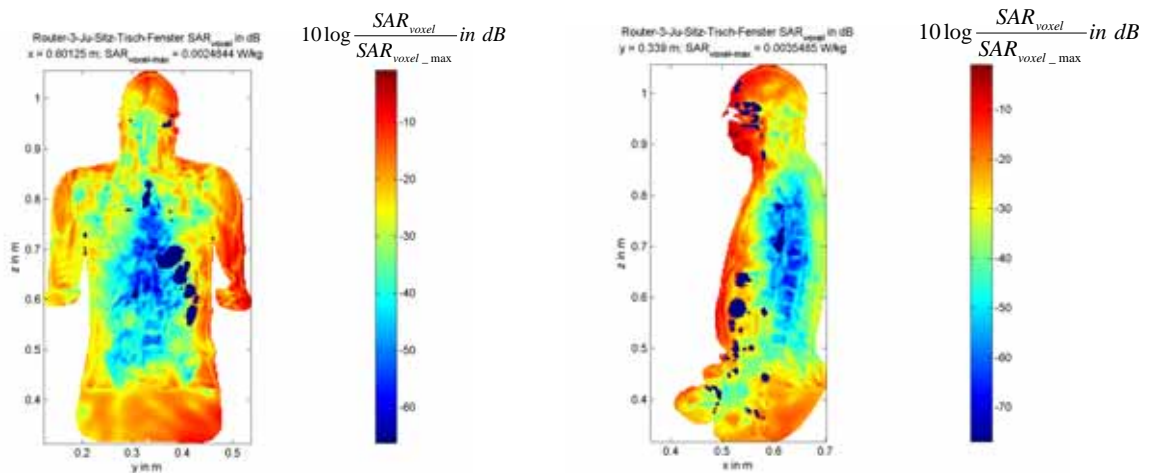
SAR_{max}^{10g} (Rumpf) = 1,17 mW/kg (0,06% vom Grenzwert)

SAR_{max}^{10g} (Gliedermaßen) = 2,66 mW/kg (0,07% vom Grenzwert)

Position des SAR^{10g}-Maximums (Rumpf) : $x = 0,556 \text{ m}$; $y = 0,356 \text{ m}$; $z = 0,784 \text{ m}$

Position des SAR^{10g}-Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,080 \text{ m}$; $y = 0,172 \text{ m}$; $z = 0,048 \text{ m}$

Router-3-Ju-Sitz-Tisch-Fenster



$P_s = 100 \text{ mW}$

SAR_{GK} = 94 $\mu\text{W/kg}$ (0,12 % vom Grenzwert)

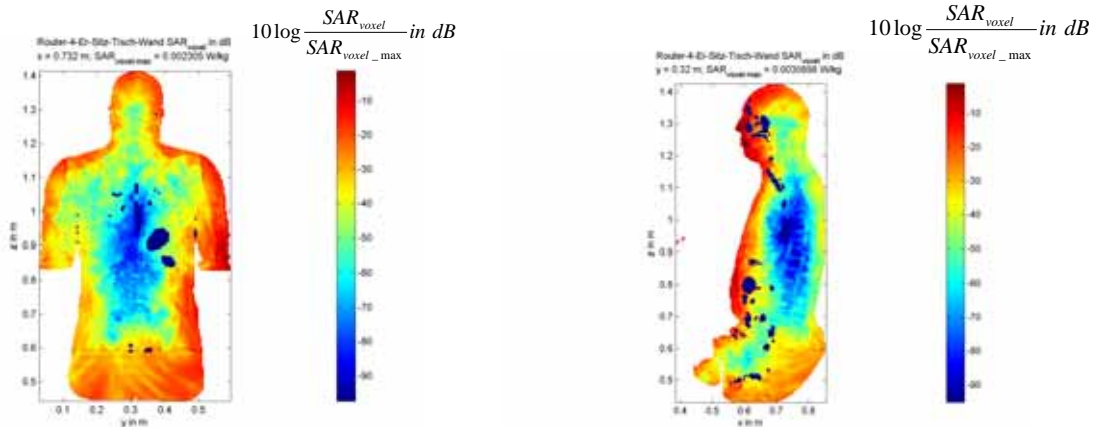
SAR_{max}^{10g} (Rumpf) = 1,62 mW/kg (0,08% vom Grenzwert)

SAR_{max}^{10g} (Gliedermaßen) = 2,35 mW/kg (0,06% vom Grenzwert)

Position des SAR^{10g}-Maximums (Rumpf) : $x = 0,502 \text{ m}$; $y = 0,342 \text{ m}$; $z = 0,949 \text{ m}$

Position des SAR^{10g}-Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,479 \text{ m}$; $y = 0,482 \text{ m}$; $z = 0,594 \text{ m}$

Router-4-Er-Sitz-Tisch-Wand



$P_s = 100 \text{ mW}$

$SAR_{GK} = 47,9 \text{ } \mu\text{W/kg}$ (0,06% vom Grenzwert)

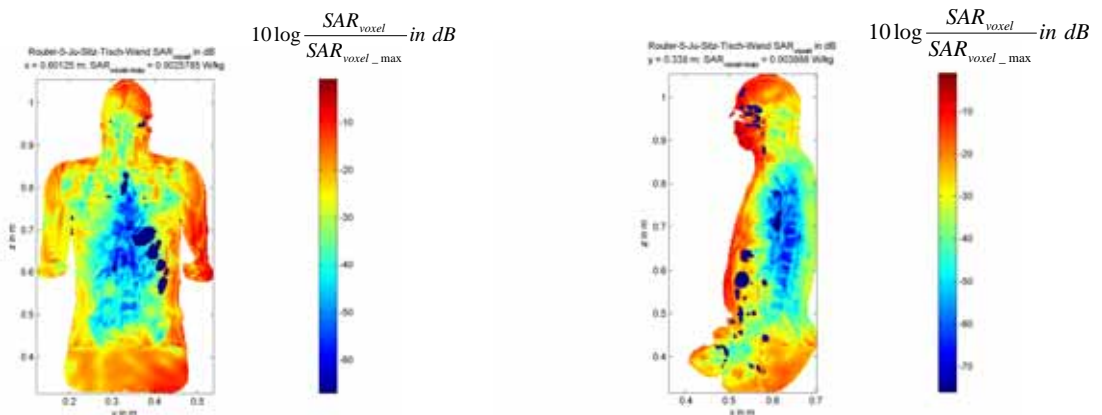
SAR_{max}^{10g} (Rumpf) = 1,19 mW/kg (0,06% vom Grenzwert)

SAR_{max}^{10g} (Gliedermaßen) = 2,56 mW/kg (0,06% vom Grenzwert)

Position des SAR^{10g} -Maximums (Rumpf) : x = 0,556 m ; y = 0,356 m ; z = 0,784 m

Position des SAR^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): x = 0,08 m ; y = 0,172 m ; z = 0,048 m

Router-5-Ju-Sitz-Tisch-Wand



$P_s = 100 \text{ mW}$

$SAR_{GK} = 94,7 \text{ } \mu\text{W/kg}$ (0,12% vom Grenzwert)

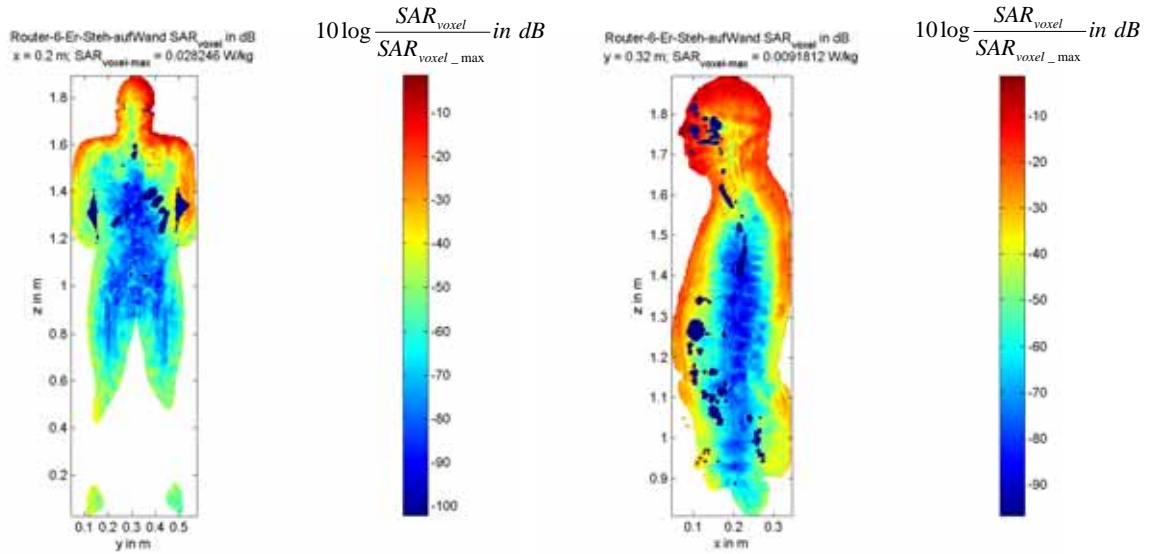
SAR_{max}^{10g} (Rumpf) = 1,79 mW/kg (0,09% vom Grenzwert)

SAR_{max}^{10g} (Gliedermaßen) = 2,30 mW/kg (0,06% vom Grenzwert)

Position des SAR^{10g} -Maximums (Rumpf) : x = 0,502 m ; y = 0,342 m ; z = 0,949 m

Position des SAR^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): x = 0,479 m ; y = 0,482 m ; z = 0,594 m

Router-6-Er-Steh-aufWand



$P_s = 100 \text{ mW}$

$SAR_{GK} = 86,6 \text{ } \mu\text{W/kg}$ (0,11% vom Grenzwert)

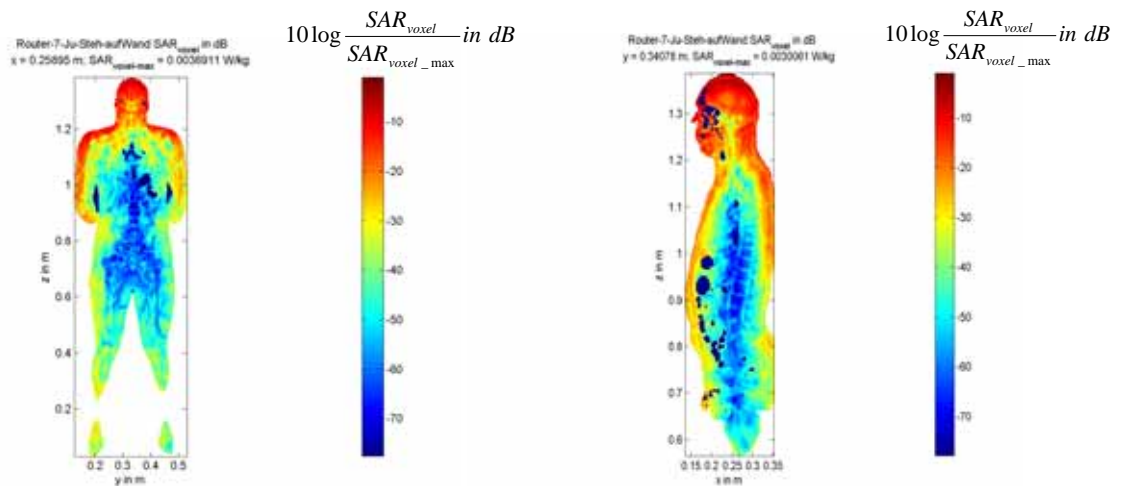
$SAR_{10g_{max}}^{\text{Rumpf}} = 1,76 \text{ mW/kg}$ (0,09% vom Grenzwert)

$SAR_{10g_{max}}^{\text{Gliederma\ss en}} = 224,5 \text{ } \mu\text{W/kg}$ (0,006% vom Grenzwert)

Position des SAR^{10g}-Maximums (Rumpf) : $x = 0,214 \text{ m}$; $y = 0,400 \text{ m}$; $z = 1,744 \text{ m}$

Position des SAR^{10g}-Maximums (Gliederma\ss en): $x = 0,056 \text{ m}$; $y = 0,280 \text{ m}$; $z = 1,080 \text{ m}$

Router-7-Ju-Steh-aufWand



$P_s = 100 \text{ mW}$

$SAR_{GK} = 25,7 \text{ } \mu\text{W/kg}$ (0,03% vom Grenzwert)

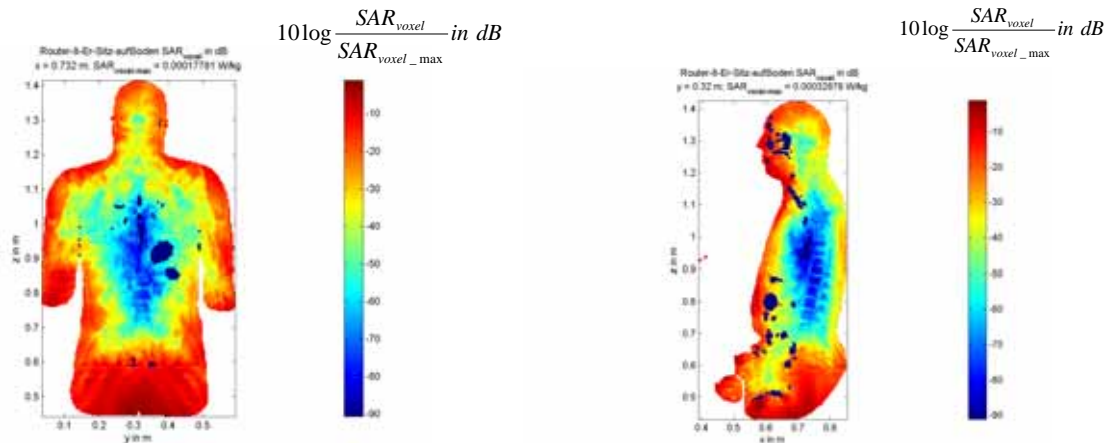
$SAR_{10g_{max}}^{\text{Rumpf}} = 1,14 \text{ mW/kg}$ (0,06% vom Grenzwert)

$SAR_{10g_{max}}^{\text{Gliederma\ss en}} = 175,3 \text{ } \mu\text{W/kg}$ (0,004% vom Grenzwert)

Position des SAR^{10g}-Maximums (Rumpf) : $x = 0,152 \text{ m}$; $y = 0,335 \text{ m}$; $z = 1,294 \text{ m}$

Position des SAR^{10g}-Maximums (Gliederma\ss en): $x = 0,303 \text{ m}$; $y = 0,128 \text{ m}$; $z = 0,958 \text{ m}$

Router-8-Er-Sitz-aufBoden



$P_s = 100 \text{ mW}$

$SAR_{GK} = 40,7 \text{ } \mu\text{W/kg}$ (0,05% vom Grenzwert)

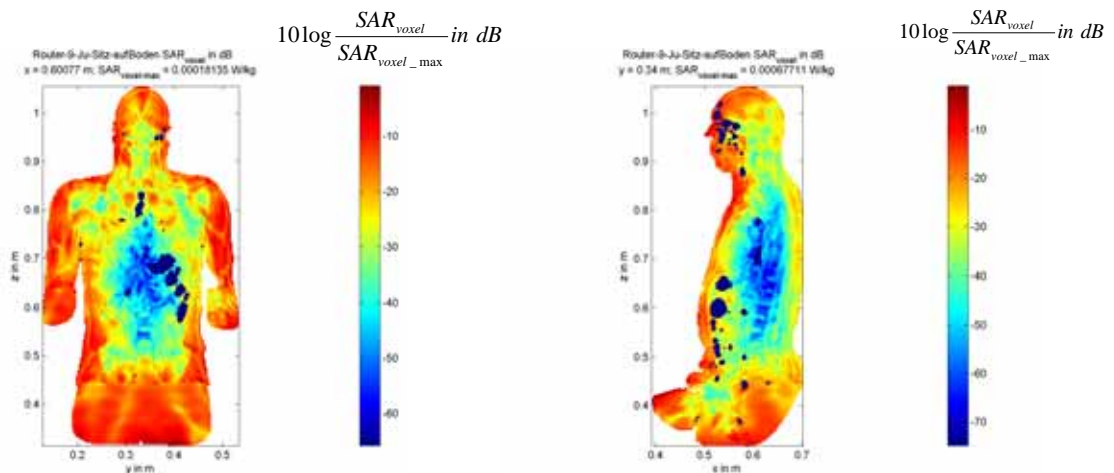
$SAR_{10g_max}^{\text{Rumpf}} = 101,3 \text{ } \mu\text{W/kg}$ (0,01% vom Grenzwert)

$SAR_{10g_max}^{\text{Gliedermaßen}} = 22,10 \text{ mW/kg}$ (0,55% vom Grenzwert)

Position des SAR_{10g} -Maximums (Rumpf) : x = 0,596 m ; y = 0,212 m ; z = 0,792 m

Position des SAR_{10g} -Maximums (Gliedermaßen): x = 0,080 m ; y = 0,492 m ; z = 0,036 m

Router-9-Ju-Sitz-aufBoden



$P_s = 100 \text{ mW}$

$SAR_{GK} = 43,7 \text{ } \mu\text{W/kg}$ (0,05% vom Grenzwert)

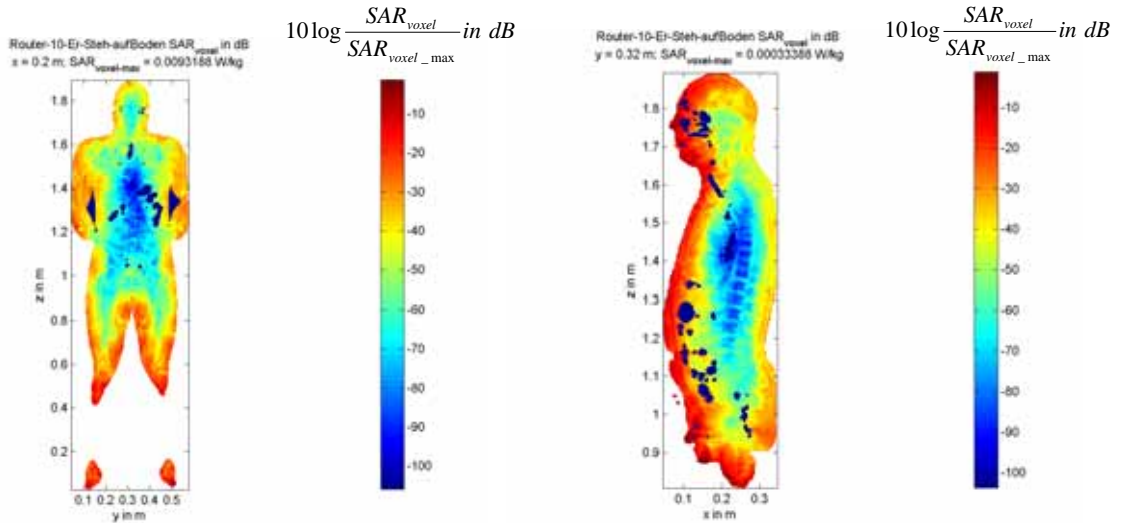
$SAR_{10g_max}^{\text{Rumpf}} = 129,9 \text{ } \mu\text{W/kg}$ (0,01% vom Grenzwert)

$SAR_{10g_max}^{\text{Gliedermaßen}} = 5,88 \text{ mW/kg}$ (0,15% vom Grenzwert)

Position des SAR_{10g} -Maximums (Rumpf) : x = 0,504 m ; y = 0,340 m ; z = 0,964 m

Position des SAR_{10g} -Maximums (Gliedermaßen): x = 0,189 m ; y = 0,460 m ; z = 0,039 m

Router-10-Er-Steh-aufBoden



$P_s = 100$ mW

$SAR_{GK} = 17,6$ μ W/kg (0,02% vom Grenzwert)

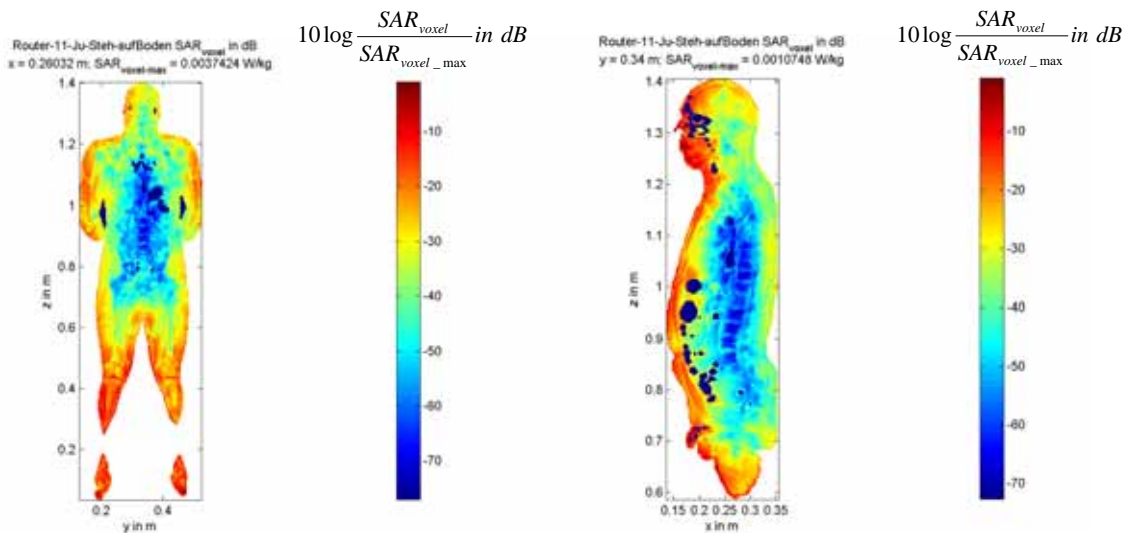
SAR_{10g_max} (Rumpf) = 171,2 μ W/kg (0,01% vom Grenzwert)

SAR_{10g_max} (Gliedermaßen) = 5,14 mW/kg (0,13% vom Grenzwert)

Position des SAR_{10g} -Maximums (Rumpf) : $x = 0,164$ m ; $y = 0,088$ m ; $z = 1,440$ m

Position des SAR_{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,108$ m ; $y = 0,500$ m ; $z = 0,037$ m

Router-11-Ju-Steh-aufBoden



$P_s = 100$ mW

$SAR_{GK} = 32,8$ μ W/kg (0,04% vom Grenzwert)

SAR_{10g_max} (Rumpf) = 419,7 μ W/kg (0,02% vom Grenzwert)

SAR_{10g_max} (Gliedermaßen) = 3,96 mW/kg (0,10% vom Grenzwert)

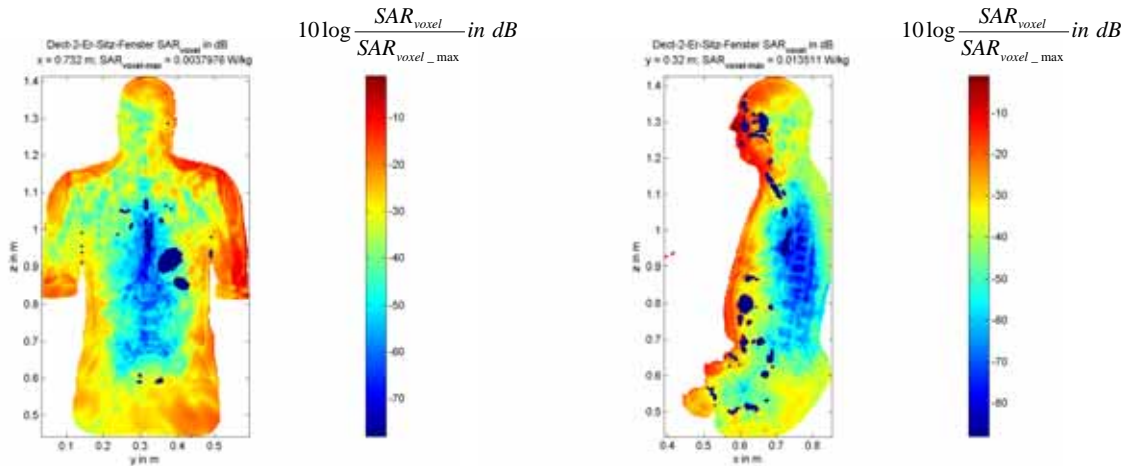
Position des SAR_{10g} -Maximums (Rumpf) : $x = 0,152$ m ; $y = 0,342$ m ; $z = 1,300$ m

Position des SAR_{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,179$ m ; $y = 0,457$ m ; $z = 0,041$ m

4.3.3 Endgerät 3: DECT-Basisstation (1.900 MHz)

Der dritte Teil des Katalogs gibt die Resultate der SAR-Berechnungen für die Szenarien mit einer in Griffweite auf dem Schreibtisch platzierten DECT-Basisstation wieder (vgl. Bild 7a).

Dect-2-Er-Sitz-Fenster



$P_S = 100 \text{ mW}$

$SAR_{GK} = 144 \text{ } \mu\text{W/kg}$ (0,18% vom Grenzwert)

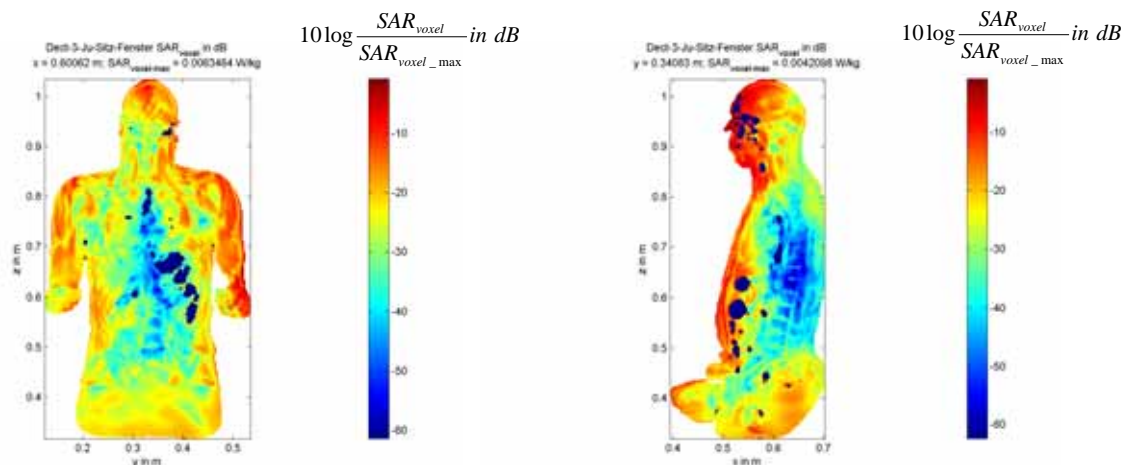
$SAR_{max}^{10g} \text{ (Rumpf)} = 3,29 \text{ mW/kg}$ (0,16% vom Grenzwert)

$SAR_{max}^{10g} \text{ (Gliedermaßen)} = 12,36 \text{ mW/kg}$ (0,31% vom Grenzwert)

Position des SAR^{10g} -Maximums (Rumpf) : $x = 0,576 \text{ m}$; $y = 0,328 \text{ m}$; $z = 1,280 \text{ m}$

Position des SAR^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,276 \text{ m}$; $y = 0,452 \text{ m}$; $z = 0,656 \text{ m}$

Dect-3-Ju-Sitz-Fenster



$P_S = 100 \text{ mW}$

$SAR_{GK} = 271,3 \text{ } \mu\text{W/kg}$ (0,34% vom Grenzwert)

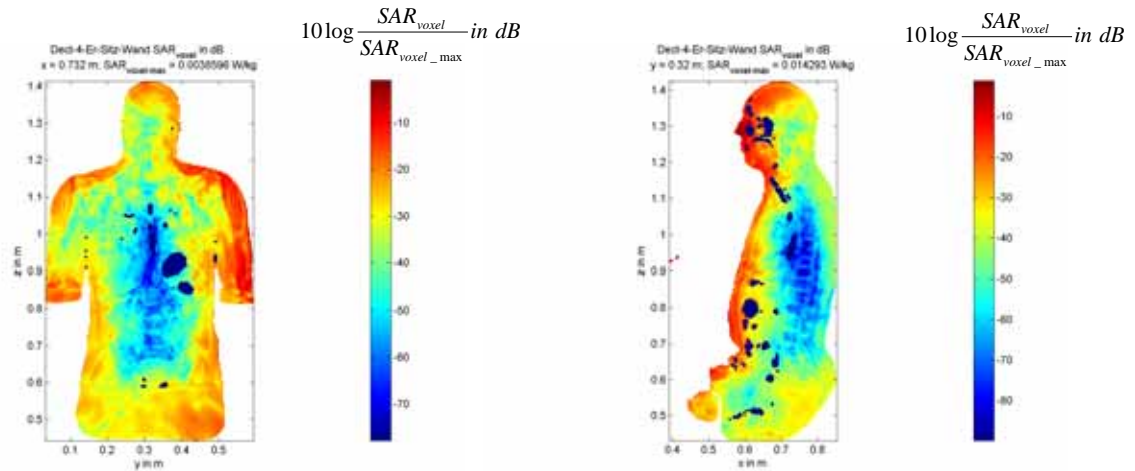
$SAR_{max}^{10g} \text{ (Rumpf)} = 3,67 \text{ mW/kg}$ (0,18% vom Grenzwert)

$SAR_{max}^{10g} \text{ (Gliedermaßen)} = 9,93 \text{ mW/kg}$ (0,25% vom Grenzwert)

Position des SAR^{10g} -Maximums (Rumpf) : $x = 0,504 \text{ m}$; $y = 0,341 \text{ m}$; $z = 0,940 \text{ m}$

Position des SAR^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,226 \text{ m}$; $y = 0,422 \text{ m}$; $z = 0,416 \text{ m}$

Dect-4-Er-Sitz-Wand



$P_S = 100 \text{ mW}$

$SAR_{GK} = 143,1 \text{ } \mu\text{W/kg}$ (0,18% vom Grenzwert)

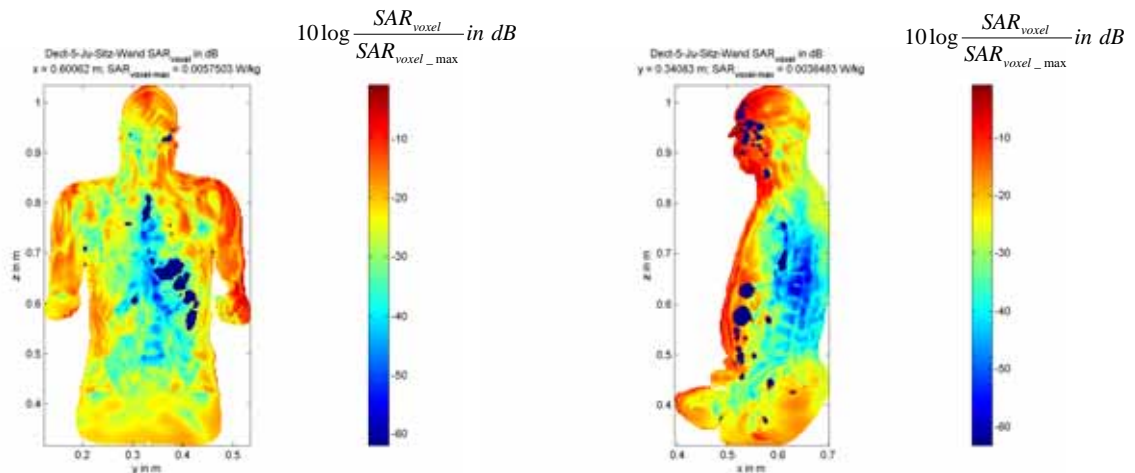
$SAR_{10g_max}^{10g}$ (Rumpf) = 3,63 mW/kg (0,18% vom Grenzwert)

$SAR_{10g_max}^{10g}$ (Gliedermaßen) = 12,89 mW/kg (0,32% vom Grenzwert)

Position des $SAR_{10g_max}^{10g}$ -Maximums (Rumpf) : x = 0,576 m ; y = 0,328 m ; z = 1,280 m

Position des $SAR_{10g_max}^{10g}$ -Maximums (Gliedermaßen): x = 0,276 m ; y = 0,452 m ; z = 0,656 m

Dect-5-Ju-Sitz-Wand



$P_S = 100 \text{ mW}$

$SAR_{GK} = 271,6 \text{ } \mu\text{W/kg}$ (0,34% vom Grenzwert)

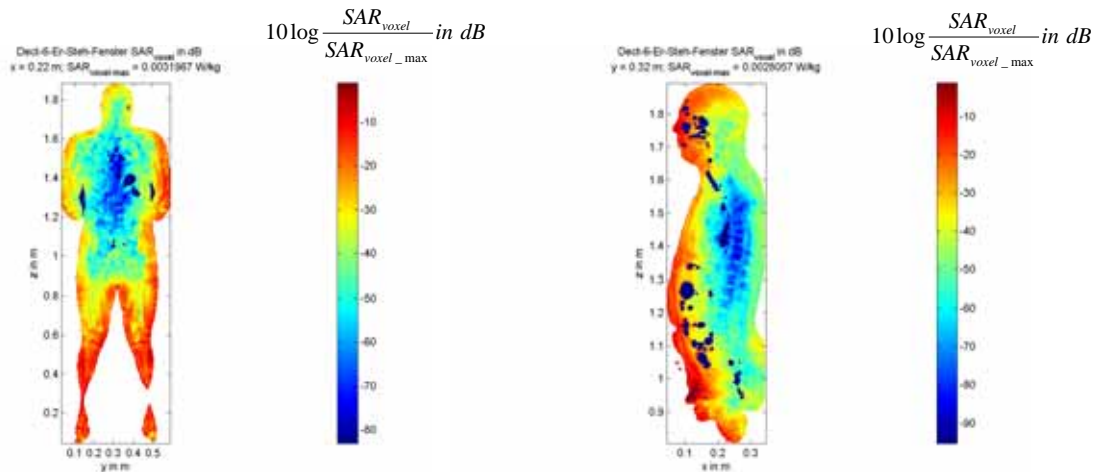
$SAR_{10g_max}^{10g}$ (Rumpf) = 2,95 mW/kg (0,15% vom Grenzwert)

$SAR_{10g_max}^{10g}$ (Gliedermaßen) = 10,58 mW/kg (0,26% vom Grenzwert)

Position des $SAR_{10g_max}^{10g}$ -Maximums (Rumpf) : x = 0,504 m ; y = 0,341 m ; z = 0,940 m

Position des $SAR_{10g_max}^{10g}$ -Maximums (Gliedermaßen): x = 0,226 m ; y = 0,422 m ; z = 0,416 m

Dect-6-Er-Steh-Fenster



$P_s = 100 \text{ mW}$

$SAR_{GK} = 55,2 \text{ } \mu\text{W/kg}$ (0,07% vom Grenzwert)

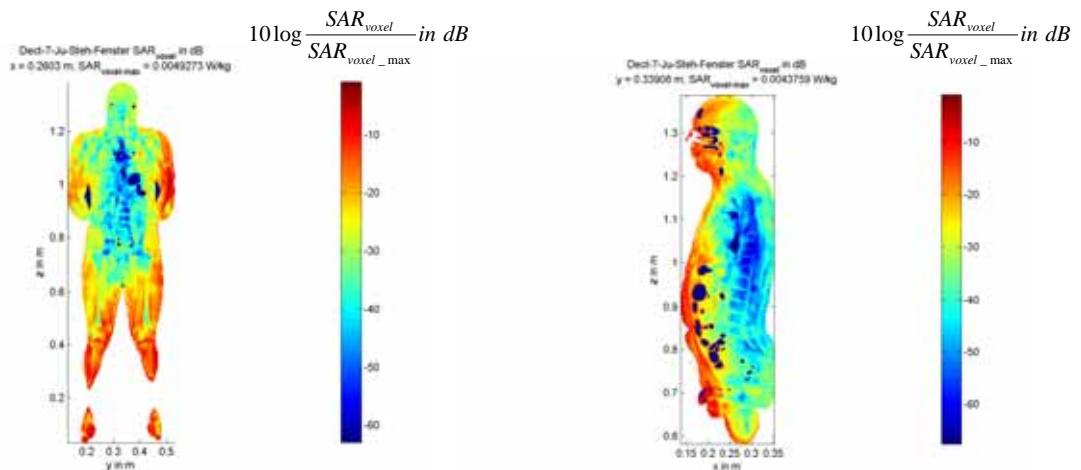
$SAR_{10g_max}^{10g}$ (Rumpf) = 580,4 $\mu\text{W/kg}$ (0,03% vom Grenzwert)

$SAR_{10g_max}^{10g}$ (Gliedermaßen) = 2,55 mW/kg (0,06% vom Grenzwert)

Position des $SAR_{10g_max}^{10g}$ -Maximums (Rumpf) : x = 0,100 m ; y = 0,284 m ; z = 1,032 m

Position des $SAR_{10g_max}^{10g}$ -Maximums (Gliedermaßen): x = 0,048 m ; y = 0,376 m ; z = 1,040 m

Dect-7-Ju-Steh-Fenster



$P_s = 100 \text{ mW}$

$SAR_{GK} = 131,2 \text{ } \mu\text{W/kg}$ (0,16% vom Grenzwert)

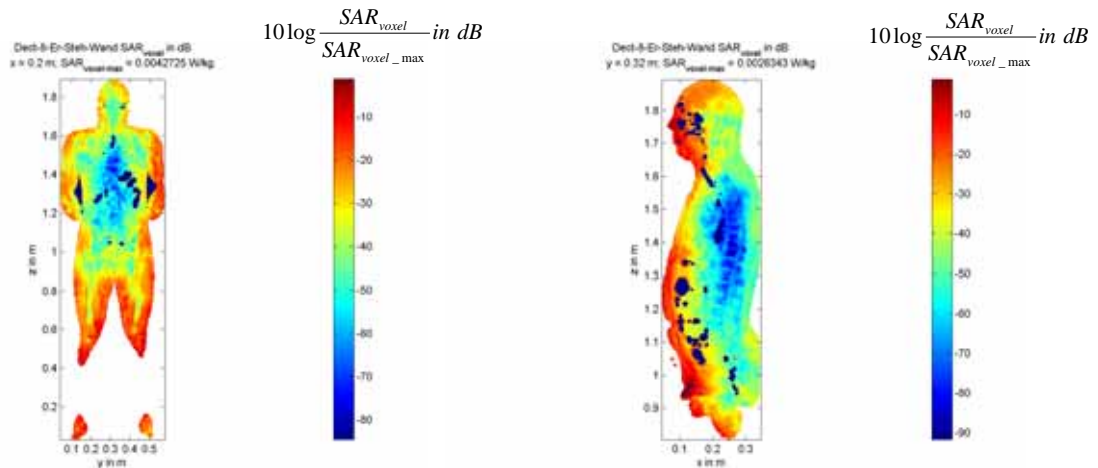
$SAR_{10g_max}^{10g}$ (Rumpf) = 1,55 mW/kg (0,08% vom Grenzwert)

$SAR_{10g_max}^{10g}$ (Gliedermaßen) = 2,47 mW/kg (0,06% vom Grenzwert)

Position des $SAR_{10g_max}^{10g}$ -Maximums (Rumpf) : x = 0,254 m ; y = 0,523 m ; z = 1,005 m

Position des $SAR_{10g_max}^{10g}$ -Maximums (Gliedermaßen): x = 0,190 m ; y = 0,453 m ; z = 0,614 m

Dect-8-Er-Steh-Wand



$P_s = 100$ mW

$SAR_{GK} = 56,3$ μ W/kg (0,07% vom Grenzwert)

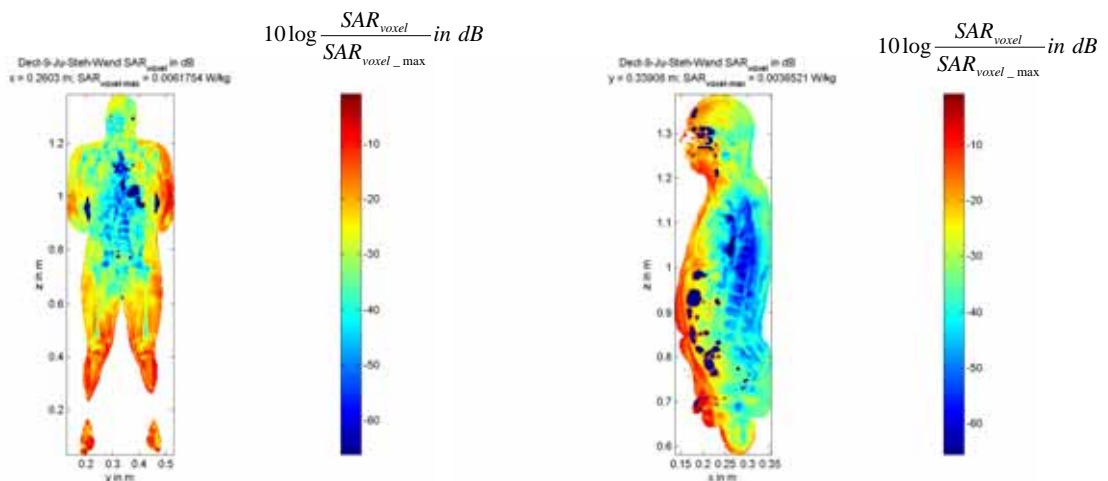
$SAR_{10g_max}^{10g}$ (Rumpf) = 611,6 μ W/kg (0,03% vom Grenzwert)

$SAR_{10g_max}^{10g}$ (Gliedermaßen) = 2,99 mW/kg (0,08% vom Grenzwert)

Position des $SAR_{10g_max}^{10g}$ -Maximums (Rumpf) : x = 0,080 m ; y = 0,428 m ; z = 1,352 m

Position des $SAR_{10g_max}^{10g}$ -Maximums (Gliedermaßen): x = 0,048 m ; y = 0,376 m ; z = 1,040 m

Dect-9-Ju-Steh-Wand



$P_s = 100$ mW

$SAR_{GK} = 132,5$ μ W/kg (0,17% vom Grenzwert)

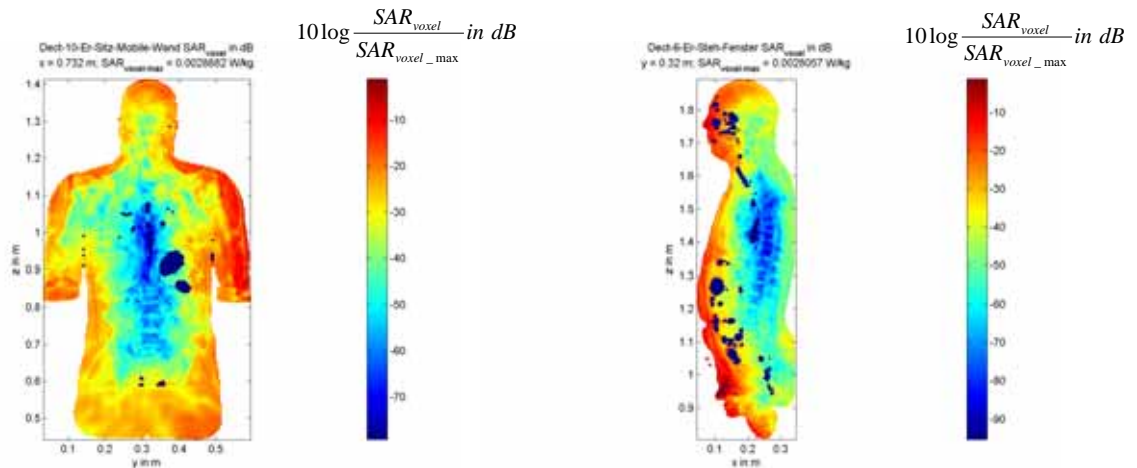
$SAR_{10g_max}^{10g}$ (Rumpf) = 1,37 mW/kg (0,07% vom Grenzwert)

$SAR_{10g_max}^{10g}$ (Gliedermaßen) = 2,59 mW/kg (0,07% vom Grenzwert)

Position des $SAR_{10g_max}^{10g}$ -Maximums (Rumpf) : x = 0,252 m ; y = 0,520 m ; z = 0,996 m

Position des $SAR_{10g_max}^{10g}$ -Maximums (Gliedermaßen): x = 0,144 m ; y = 0,383 m ; z = 0,762 m

Dect-10-Er-Sitz-Mobile-Wand



$P_s = 100 \text{ mW}$

$SAR_{GK} = 124,5 \text{ } \mu\text{W/kg}$ (0,16% vom Grenzwert)

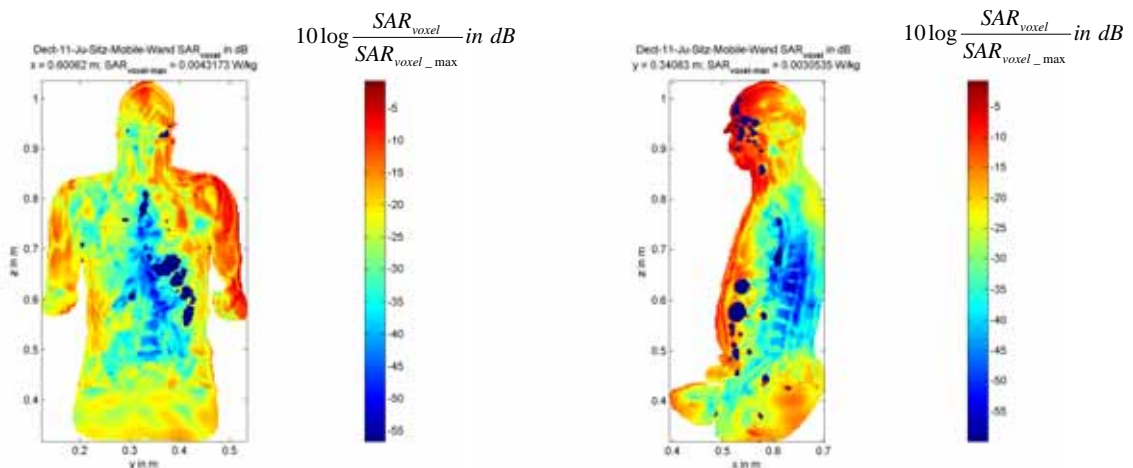
$SAR_{10g_{max}}^{\text{Rumpf}} = 3,43 \text{ mW/kg}$ (0,17% vom Grenzwert)

$SAR_{10g_{max}}^{\text{Gliederma\ss en}} = 15,60 \text{ mW/kg}$ (0,39% vom Grenzwert)

Position des SAR_{10g} -Maximums (Rumpf) : $x = 0,576 \text{ m}$; $y = 0,328 \text{ m}$; $z = 1,280 \text{ m}$

Position des SAR_{10g} -Maximums (Gliederma\ss en): $x = 0,260 \text{ m}$; $y = 0,452 \text{ m}$; $z = 0,656 \text{ m}$

Dect-11-Ju-Sitz-Mobile-Wand



$P_s = 100 \text{ mW}$

$SAR_{GK} = 201,4 \text{ } \mu\text{W/kg}$ (0,25% vom Grenzwert)

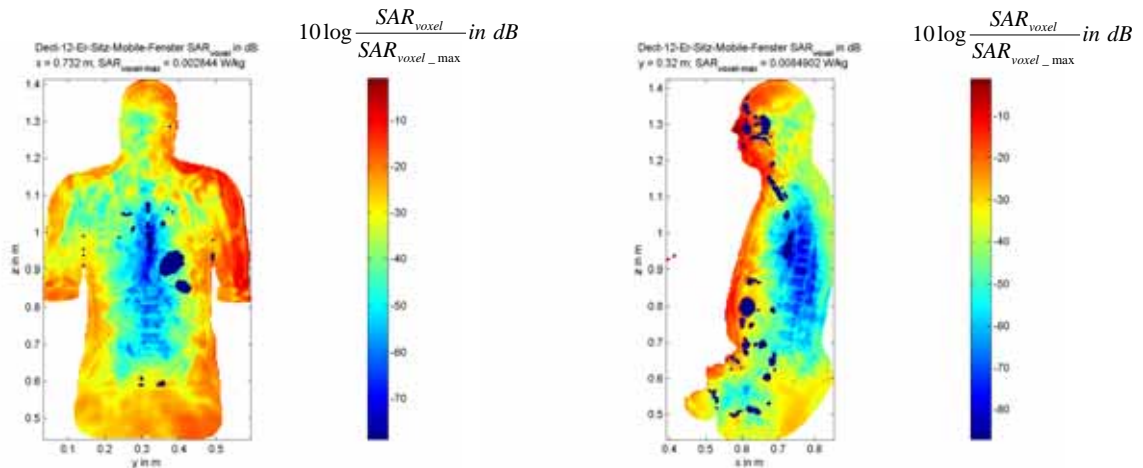
$SAR_{10g_{max}}^{\text{Rumpf}} = 2,60 \text{ mW/kg}$ (0,13% vom Grenzwert)

$SAR_{10g_{max}}^{\text{Gliederma\ss en}} = 7,09 \text{ mW/kg}$ (0,18% vom Grenzwert)

Position des SAR_{10g} -Maximums (Rumpf) : $x = 0,504 \text{ m}$; $y = 0,341 \text{ m}$; $z = 0,940 \text{ m}$

Position des SAR_{10g} -Maximums (Gliederma\ss en): $x = 0,226 \text{ m}$; $y = 0,422 \text{ m}$; $z = 0,416 \text{ m}$

Dect-12-Er-Sitz-Mobile-Fenster



$P_S = 100$ mW

$SAR_{GK} = 122,1$ μ W/kg (0,15% vom Grenzwert)

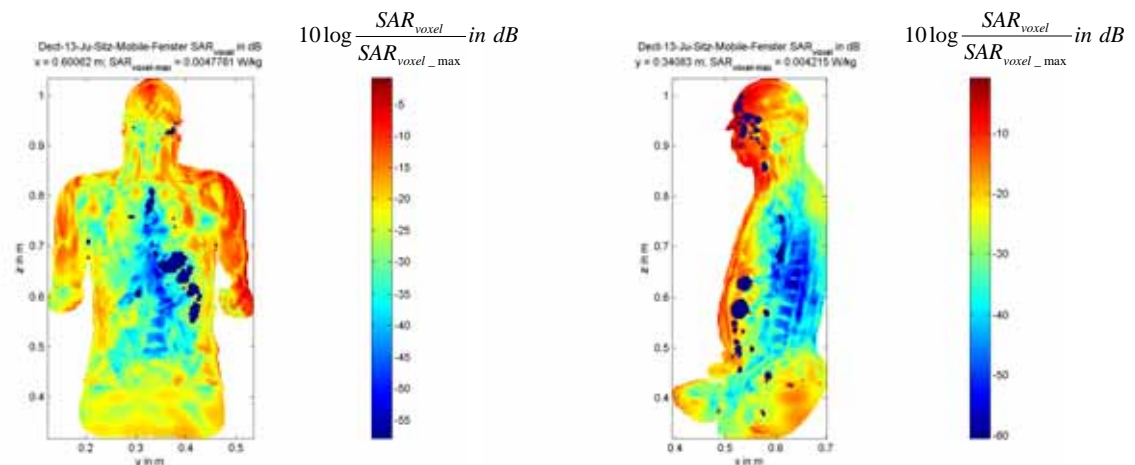
$SAR_{10g_max}^{10g}$ (Rumpf) = 2,42 mW/kg (0,12% vom Grenzwert)

$SAR_{10g_max}^{10g}$ (Gliedermaßen) = 13,74 mW/kg (0,34% vom Grenzwert)

Position des $SAR_{10g_max}^{10g}$ -Maximums (Rumpf) : x = 0,572 m ; y = 0,404 m ; z = 0,825 m

Position des $SAR_{10g_max}^{10g}$ -Maximums (Gliedermaßen): x = 0,264 m ; y = 0,448 m ; z = 0,656 m

Dect-13-Ju-Sitz-Mobile-Fenster



$P_S = 100$ mW

$SAR_{GK} = 201,9$ μ W/kg (0,25% vom Grenzwert)

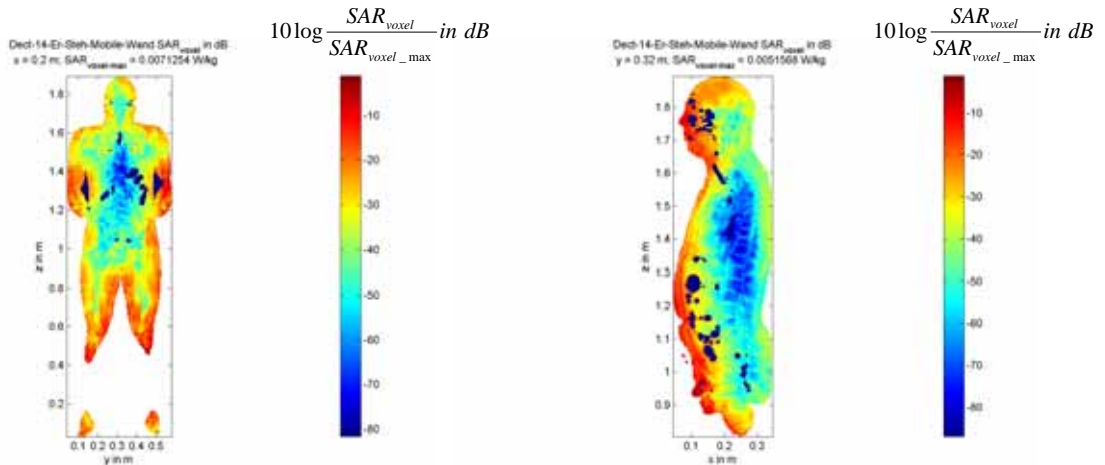
$SAR_{10g_max}^{10g}$ (Rumpf) = 3,53 mW/kg (0,18% vom Grenzwert)

$SAR_{10g_max}^{10g}$ (Gliedermaßen) = 6,51 mW/kg (0,16% vom Grenzwert)

Position des $SAR_{10g_max}^{10g}$ -Maximums (Rumpf) : x = 0,504 m ; y = 0,341 m ; z = 0,940 m

Position des $SAR_{10g_max}^{10g}$ -Maximums (Gliedermaßen): x = 0,217 m ; y = 0,434 m ; z = 0,419 m

Dect-14-Er-Steh-Mobile-Wand



$P_s = 100$ mW

$SAR_{GK} = 69,5$ μ W/kg (0,09% vom Grenzwert)

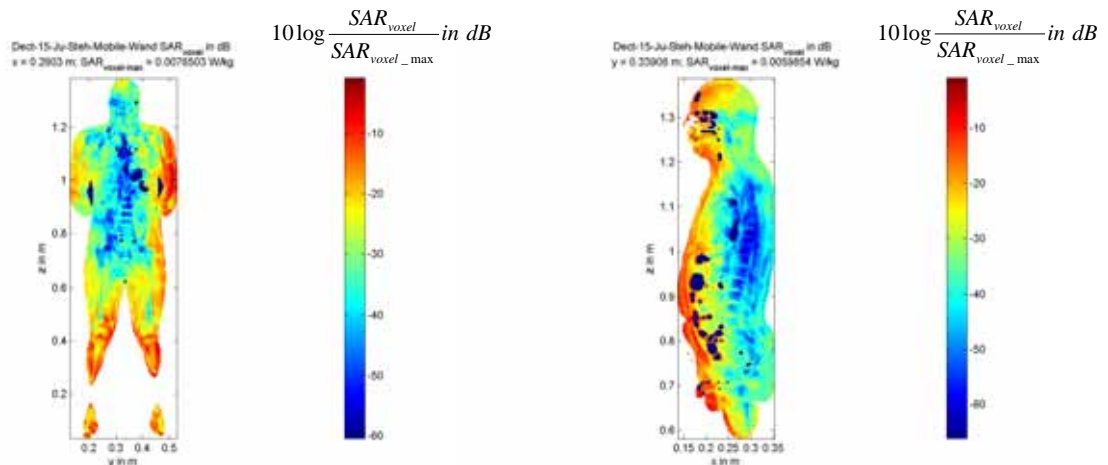
SAR_{10g_max} (Rumpf) = 1,26 mW/kg (0,06% vom Grenzwert)

SAR_{10g_max} (Gliedermaßen) = 9,79 mW/kg (0,25% vom Grenzwert)

Position des SAR_{10g} -Maximums (Rumpf) : x = 0,200 m ; y = 0,570 m ; z = 1,348 m

Position des SAR_{10g} -Maximums (Gliedermaßen): x = 0,072 m ; y = 0,392 m ; z = 1,008 m

Dect-15-Ju-Steh-Mobile-Wand



$P_s = 100$ mW

$SAR_{GK} = 154$ μ W/kg (0,19% vom Grenzwert)

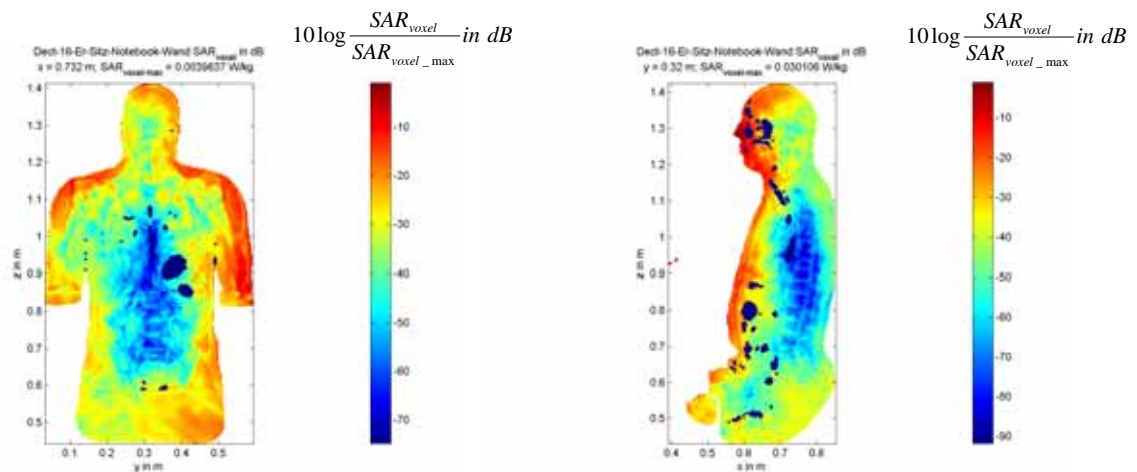
SAR_{10g_max} (Rumpf) = 2,25 mW/kg (0,11% vom Grenzwert)

SAR_{10g_max} (Gliedermaßen) = 4,78 mW/kg (0,12% vom Grenzwert)

Position des SAR_{10g} -Maximums (Rumpf) : x = 0,252 m ; y = 0,520 m ; z = 1,007 m

Position des SAR_{10g} -Maximums (Gliedermaßen): x = 0,135 m ; y = 0,374 m ; z = 0,756 m

Dect-16-Er-Sitz-Notebook-Wand



$P_S = 100 \text{ mW}$

$SAR_{GK} = 195,9 \mu\text{W/kg}$ (0,24% vom Grenzwert)

SAR_{max}^{10g} (Rumpf) = 7,28 mW/kg (0,36% vom Grenzwert)

SAR_{max}^{10g} (Gliedermaßen) = 22,11 mW/kg (0,55% vom Grenzwert)

Position des SAR^{10g} -Maximums (Rumpf) : x = 0,576 m ; y = 0,328 m ; z = 1,280 m

Position des SAR^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): x = 0,260 m ; y = 0,452 m ; z = 0,656 m

4.4 Anmerkungen zu den SAR-Berechnungen

4.4.1 *Diskussion einiger Ergebnisse*

Bei gleicher Sendeleistung der betrachteten Endgeräte ergibt sich für die maximal auftretenden SAR-Werte die nachstehende Rangfolge (von hohen zu niedrigen Werten):

Ganzkörper-SAR: Bluetooth, GPRS, UMTS, W-LAN, DECT, W-LAN-Router

Teilkörper-SAR (Rumpf/Kopf): Bluetooth, W-LAN, DECT, UMTS, GPRS, W-LAN-Router

Teilkörper-SAR (Gliedermaßen): Bluetooth, W-LAN, UMTS, GPRS, DECT, W-LAN-Router.

Daran ist qualitativ ablesbar, wie sich die Positionierung und Topologie eines Gerätes sowie seine Sendefrequenz auf die Spezifische Absorptionsrate in der exponierten Person auswirken. Im praktischen Betrieb beeinflusst aber insbesondere die unterschiedliche Sendeleistung eine Veränderung dieser Rangfolge. Beim absoluten Vergleich unter Annahme der jeweils höchstzulässigen Sendeleistung (vgl. Tab. I) treten die höchsten Grenzwertausschöpfungen für den GPRS-Betrieb des Notebooks auf ($P_s = 960 \text{ mW}$), und zwar beim Jugendlichen mit 11,2% für die Ganzkörper-SAR und 2,3% für die Teilkörper-SAR im Rumpf und beim Erwachsenen mit 37,2% für die Teilkörper-SAR in den Gliedmaßen. Es ist somit festzustellen, dass in keinem der untersuchten Fälle Überschreitungen der Grenzwerte identifiziert wurden und dass auch die oben genannten Annäherungen an die Grenzwerte vermutlich nicht als kritisch einzustufen sind.

Ein Vergleich von Ganz- und Teilkörper-SAR-Werten ist wenig aufschlussreich, da diese teilweise ganz unterschiedlichen Einflussursachen unterliegen. Bei vielen der untersuchten Szenarien ist der maximale Teilkörper-SAR-Wert für die Gliedmaßen dominant. Dies liegt an der insbesondere bei den Szenarien mit sitzenden Personenmodellen exponierten Haltung der Hände. Da diese in der Regel in Bewegung sind, sodass die über 6-Minuten-Intervalle gemittelte maximale Teilkörper-SAR in den Gliedmaßen in der Praxis voraussichtlich geringer ausfällt, sollte bei der Interpretation der Rechenergebnisse die Ganzkörper-SAR als wichtiger angesehen werden, wenn nicht das Teilkörper-SAR-Maximum einen außergewöhnlich hohen Prozentsatz des Grenzwertes ausschöpft. Gegenüber dem Wert in den Gliedmaßen fällt die Teilkörper-SAR in Kopf und Rumpf bei fast allen hier untersuchten Szenarien deutlich geringer aus.

Der Vergleich der SAR-Werte für den Erwachsenen und den Jugendlichen bei ansonsten gleichen Szenarien zeigt, dass es keinen regelmäßigen Zusammenhang für die Teilkörper-Werte gibt (diese können sowohl kleiner als auch größer werden), während die Ganzkörper-Werte im Jugendlichen immer größer als im Erwachsenen sind. Für die verschiedenen Endgeräte reicht die Spanne der SAR_{GK} -Unterschiede von ca. 45% bis ca. 127%.

Die Szenarien für den W-LAN-Router und die DECT-Basisstation wurden jeweils mit einer geschlossenen Wand oder mit einem Fenster hinter dem Schreibtisch berechnet. Die Ergebnisse zeigen nur vernachlässigbare Unterschiede zwischen den jeweiligen SAR-Werten.

Die Unterschiede in den SAR-Werten für das Notebook mit auf- oder zugeklapptem Display liegen für die untersuchten Fälle mit GPRS-, UMTS- und W-LAN-Schnittstellen zwischen – 5% und – 67% für SAR_{max}^{10g} im Rumpf und zwischen – 3% und – 45% für SAR_{GK} , d.h. die SAR-Werte werden durch das Schließen kleiner, vermutlich weil die Reflexion des Strahlungsfeldes am Display entfällt.

4.4.2 *Fehlerbudget*

Bei keiner der in der Literatur und auch im Rahmen des "Deutschen Mobilfunk Forschungsprogramms" mit numerischen Verfahren durchgeführten dosimetrischen Untersuchungen, die die Spezifische Absorptionsrate im menschlichen Körper als Zielgröße haben, werden quantitative Angaben zum Gesamtfehler der Ergebnisse in Bezug auf entsprechende reale Expositionsfälle gemacht. Dies liegt daran, dass ein absoluter Referenzstandard, an dem man Rechenergebnisse "kalibrieren" könnte, nicht existiert, weil eine vollständige SAR-Verteilung in einem lebenden Menschen, der sich in einer (HF-)Expositionssituation befindet, streng genommen nicht bekannt ist. Diese zunächst entmutigende Feststellung ist jedoch zu relativieren, weil wir heute über Methodiken verfügen, die – gespeist aus Erkenntnissen der Biologie, Medizin, Physik, Materialwissenschaften und Elektrotechnik – es offensichtlich erlauben, die SAR so gut abzuschätzen, dass die Ergebnisse unterschiedlicher Arbeitsgruppen für vergleichbare Szenarien auch bei der Anwendung abweichender Verfahren relativ gut übereinstimmen.

Zur im Wesentlichen qualitativen Annäherung an ein Fehlerbudget werden im Folgenden verschiedene Einflussgrößen auf die Spezifische Absorptionsrate (SAR) diskutiert.

1. Rechenverfahren

Wie bereits in Abschnitt 3.1 erläutert, ist die eingesetzte FDTD-Methode unmittelbar durch Diskretisierung der exakten Maxwell'schen Gleichungen in Differenzialform herleitbar. Der Beitrag des Rechenver-

fahrens zum Fehlerbudget ist somit durch die Beschränkung des Diskretisierungsfehlers und die davon unabhängig zu gewährleistende Verfahrensstabilität (Stichwort: Courant-Kriterium) kontrollierbar.

2. Körpermodell

a) Modellauswahl

Die natürliche biologische Variabilität der äußeren Körperform, aber auch der organischen Detailstruktur unterschiedlicher Individuen hat unmittelbare Auswirkungen auf die Varianz der beim Einwirken eines elektromagnetischen Feldes im Körper entstehenden Spezifischen Absorptionsraten, auch wenn die betrachteten Personen identischen Feldquellen ausgesetzt sind.

Die Einkopplung externer elektromagnetischer Felder in den Körper hängt zunächst von der Reflexion der Felder ab, die durch die räumliche Verteilung und Polarisation des Einfallsfeldes, durch das Verhältnis von Körpergröße zu Wellenlänge, durch die Formgebung der Körperoberfläche und durch die frequenz- und ortsabhängigen elektrischen Eigenschaften des Körpergewebematerials bestimmt wird. In das Gewebe eingedrungene Feldenergie wird aufgrund der gewebespezifischen elektrischen Leitfähigkeit partiell in Wärme umgewandelt, woraus eine Verlustleistungsverteilung im Körper resultiert. Das in kleinen Bereichen der Masse m gebildete Verhältnis von lokaler Verlustleistung zu Masse führt schließlich durch Mittelung über den gesamten Körper oder über Teilbereiche auf die Ganzkörper- bzw. Teilkörper-SAR.

Die beschriebenen physikalischen Zusammenhänge können heute mit gängigen Rechenverfahren bei Vorgabe von räumlich hoch aufgelösten Modellen des menschlichen Körpers sehr zuverlässig simuliert werden, wobei sich auch die Problematik der Variabilitäten auf die numerische Dosimetrie überträgt und den Wunsch nach immer neuen Berechnungen mit immer wieder veränderten Menschmodellen begründet.

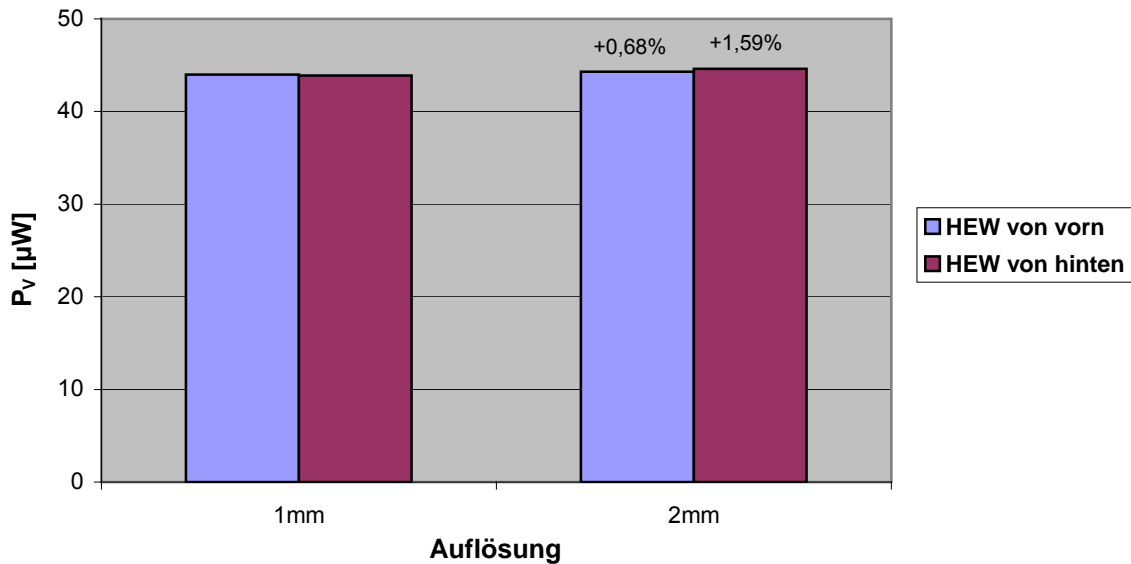
In zeitlich begrenzten Projekten ist eine Beschränkung auf wenige Menschmodelle (hier: 4) notwendig. Für Personen, deren Körperbau durch diese Modelle gut repräsentiert wird, entsteht durch die Wahl des Körpermodells kein nennenswerter Beitrag zum Fehlerbudget (Ungenauigkeiten durch die Modellierung werden in b) und c) diskutiert). Die Anwendbarkeit der Rechenergebnisse auf Personen, deren Körperbau mehr oder weniger stark von den verwendeten Modellen abweicht, kann – zumindest bei Nahfeldproblemen - grundsätzlich nicht pauschal beurteilt werden, weil zu viele Einflussparameter das exakte Ergebnis mitbestimmen.

b) Auflösung

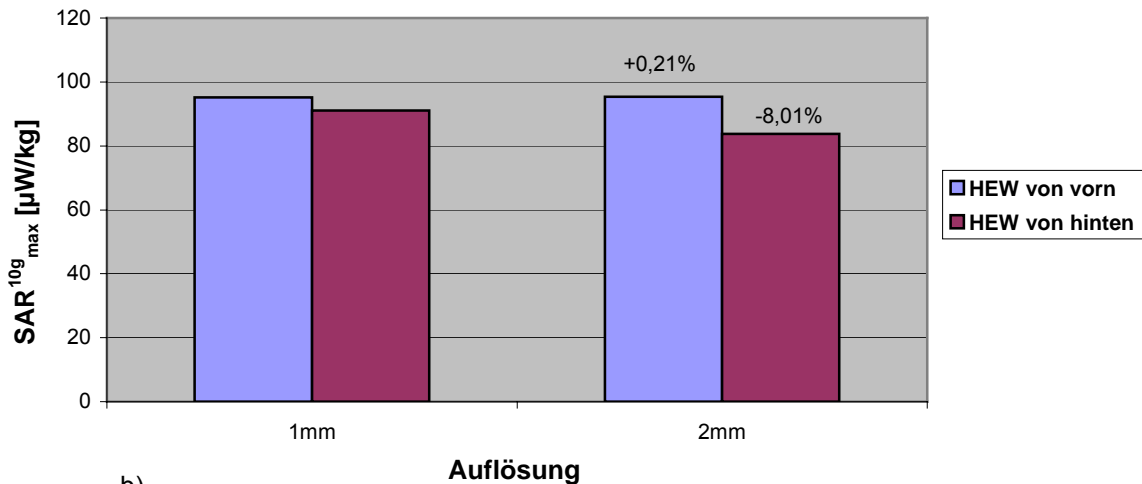
Es leuchtet unmittelbar ein, dass die Genauigkeit der Ergebnisse auch von der Diskretisierungsweite des Rechengitters und von der räumlichen Auflösung abhängt, mit der das Menschmodell für die Anwendung der FDTD-Berechnungen in diskrete Elementarvolumina (Voxel) zerlegt wird. Dabei sollten zu grobe Auflösungen vermieden werden, um wesentliche anatomische Detailinformationen zu bewahren, andererseits ist eine Auflösung, die diejenige der Originaldaten übersteigt, im Hinblick auf die meist erforderliche Reduzierung des Rechenaufwands kontraproduktiv, es sei denn, dass bei höheren Frequenzen die Anzahl von Stützstellen pro Materialwellenlänge erhöht werden muss, um eine gewünschte Genauigkeit der Ergebnisse nicht zu unterschreiten.

Der Einfluss der Auflösung auf die Spezifische Absorptionsrate wird hier unter der häufig verwendeten Voraussetzung untersucht, dass die Modellauflösung und die Schrittweite des Rechengitters übereinstimmen. Zunächst wurde aus Rechenzeitgründen nur der Kopf des von Brooks auf der Basis der 'Visible Human Project'-Daten erstellten Menschmodells bei Auflösungen von 1 und 2 mm in allen drei Raumrichtungen verwendet. Bild 51 zeigt bei der höchsten hier vorkommenden Sendefrequenz von 2.450 MHz die im ganzen Kopf umgesetzten Verlustleistungen (a) und die maximalen Teilkörper-SAR-Werte (b) beim Einfall einer homogenen ebenen Welle der Feldstärke 1 V/m von vorn und von hinten. Die Abweichungen der 2 mm-Rechnungen von dem als Referenz betrachteten 1 mm-Fall betragen maximal +1,6% für die Gesamt-Verlustleistung und -8% für SAR^{10g}_{max} . In Bild 52 sind die Berechnungen mit dem vollständigen Menschmodell bei Auflösungen von 2 bis 6 mm ausgewertet. Dabei werden die mit 2 mm erzielten Ergebnisse als Bezugswerte herangezogen. Während bei 900 MHz die Abweichungen der (der Ganzkörper-SAR proportionalen) Verlustleistung P_V im gesamten Körper bis zu 4 mm Auflösung mit unter 2% marginal sind (Bild 52a), erkennt man bei 2.450 MHz einen nahezu linearen Fehlerzuwachs bei gröber werdender Auflösung. Wegen der erheblichen Reduzierung des Rechenaufwands bei Auflösungen von 4 mm wurde für den Ganzkörper-SAR-Wert ein Fehler von maximal -25% akzeptiert. Dies bedeutet, dass unter alleiniger Berücksichtigung des Fehlers aufgrund reduzierter Modellauflösung der tatsächliche SAR-Wert um einen Faktor 1,33 über dem Rechenwert liegen könnte. Allerdings muss dieser Fehler nur bei den mit 2.450 MHz arbeitenden Systemen in Ansatz gebracht werden, die zudem in der Regel vergleichsweise niedrige Sendeleistungen aufweisen und mit entsprechend geringen absoluten SAR-Werten verbunden sind. Für die Teilkörper-SAR sind die Ergebnisse der Fehlerabschätzung diffuser (Bild 52b). Bei 2.450 MHz nimmt die negative Abweichung gegenüber dem

SAR^{10g}_{max}-Wert bei 2 mm wieder fast linear mit der Auflösung zu[#]. Für 4 mm Auflösung wird der Referenzwert um 31% unterschätzt. Bei 900 MHz wird dagegen für 4 mm Auflösung eine Überschätzung der Teilkörper-SAR von 6% bzw. 20% errechnet. Die Lage des Maximums wird jeweils richtig identifiziert, beim Einfall von vorne z.B. in allen Fällen im Bereich der Nase des Menschmodells. Da die angegebenen Abweichungen für SAR^{10g}_{max} gemessen an dem bereits erwähnten Bewegungseinfluss innerhalb des 6-minütigen Mittelungsintervalls insgesamt moderat sind, wurden die Berechnungen mit max. 4 mm Auflösung durchgeführt.



a)

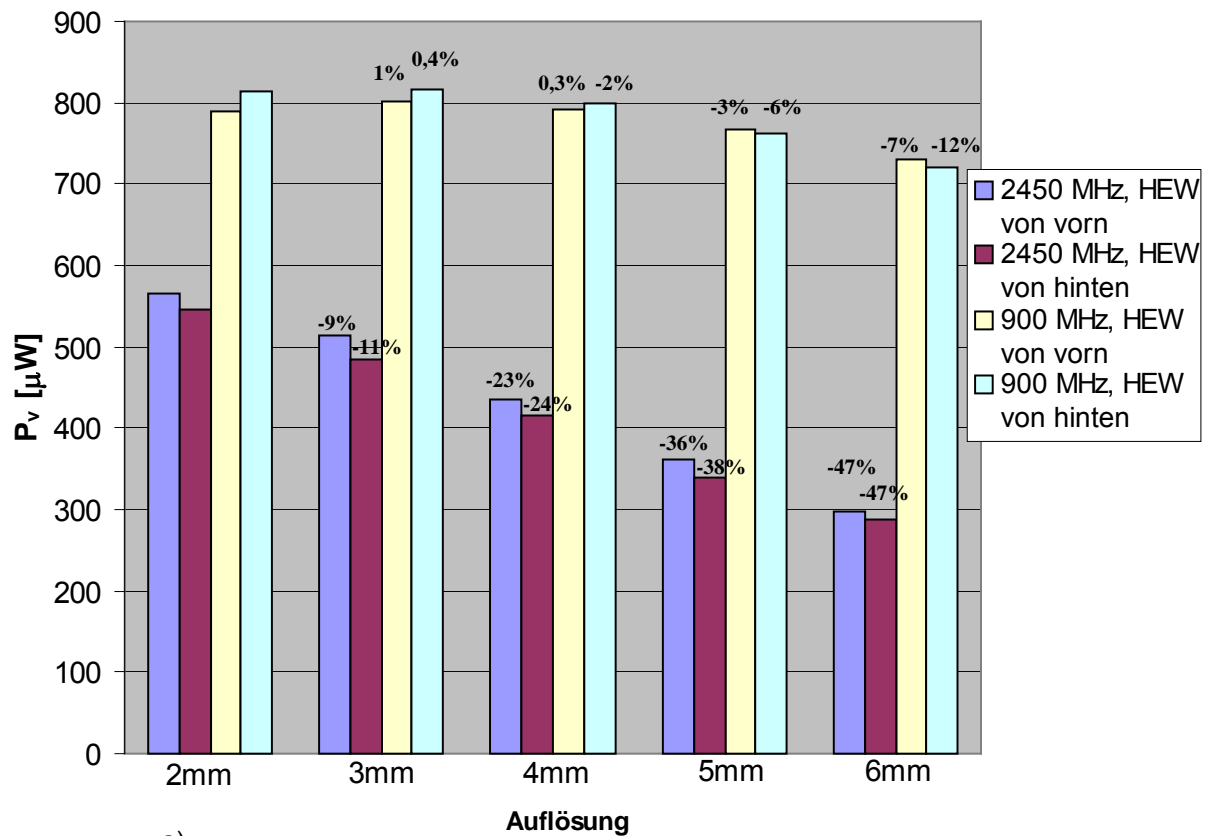


b)

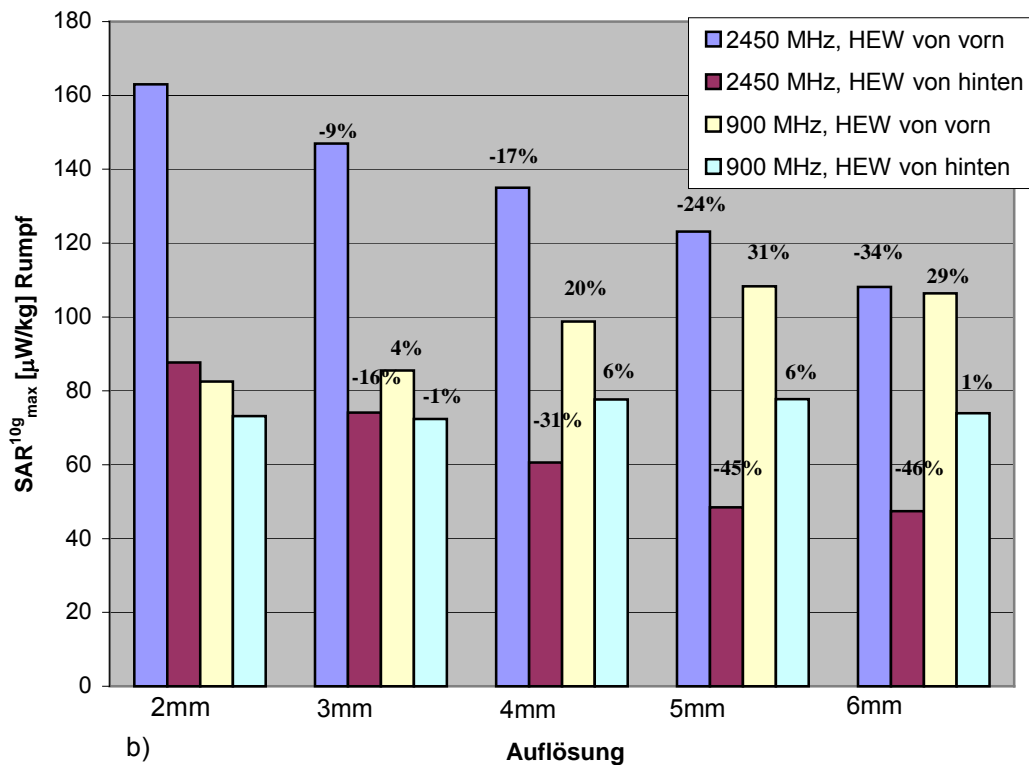
Bild 51: Numerisch berechnete Absorption im Kopf des Menschmodells gemäß Bild 9 bei Exposition mit einer homogenen ebenen Welle (HEW) von vorn und von hinten für 1mm und 2mm Ortsauflösung; E = 1 V/m; f = 2.450 MHz

a) Verlustleistung im gesamten Kopf; b) maximale Teilkörper-SAR

[#] Die deutlich höhere Teilkörper-SAR beim Ganzkörper-Menschmodell gegenüber dem Kopfmodell bei frontal einfallender Welle erklärt sich aus dem Einfluss der an Rumpf und Gliedmaßen gestreuten Feldanteile auf die SAR im Kopf. In beiden Fällen tritt das SAR-Maximum in der Nase des jeweiligen Modells auf, beim Kopfmodell ohne den restlichen Körper entfallen jedoch die entsprechenden Streufelder.



a)



b)

Bild 52: Numerisch berechnete Absorption im Körper des Menschmodells gemäß Bild 9 bei Exposition mit einer homogenen ebenen Welle (HEW) von vorn und von hinten für 2 mm bis 6 mm Ortsauflösung; $E = 1$ V/m
 a) Gesamt-Verlustleistung bei 900 MHz und 2.450 MHz;
 b) maximale Teilkörper-SAR im Rumpf bei 900 MHz und 2.450 MHz

c) Materialdaten

Eine kurze Übersicht der Literatur zur Ermittlung elektrischer Materialdaten verschiedener Körpergewebe wird beispielsweise in [Christ et al. 2004] gegeben. Bedingt durch die Unsicherheiten der Materialparameter ist es zum Standard geworden, bei dosimetrischen Untersuchungen die Auswirkungen prozentualer Abweichungen der Materialparameter von den Literaturwerten zu ermitteln. Hier wurden für den Fall einer auf den Körper frontal einfallenden homogenen ebenen Welle Berechnungen an dem mit 4 mm aufgelösten „Brooks“-Menschmodell bei 10%-igen Änderungen der Gewebepermittivitäten und/oder –leitfähigkeiten durchgeführt. Tabelle IV stellt die Ergebnisse für 2.450 MHz dar. Die SAR-Variationen liegen im Rahmen von $\pm 10\%$.

Körpermodell		SAR _{GK} [W/kg]	SAR ^{10g} _{max} [W/kg]
Originalparameter ϵ, κ		4,13E-06	1,80E-04
Variation			
1. Parameter	2. Parameter		
$\epsilon +10\%$		3,82E-06	1,81E-04
$\epsilon -10\%$		4,49E-06	1,75E-04
$\kappa +10\%$		4,17E-06	1,82E-04
$\kappa -10\%$		4,09E-06	1,77E-04
$\epsilon +10\%$	$\kappa +10\%$	3,85E-06	1,82E-04
$\epsilon +10\%$	$\kappa -10\%$	3,77E-06	1,78E-04
$\epsilon -10\%$	$\kappa +10\%$	4,52E-06	1,77E-04
$\epsilon -10\%$	$\kappa -10\%$	4,45E-06	1,74E-04
max. Abweichung		-8,72% / +9,44%	-3,33% / +1,11%

Tabelle IV: Einfluss von Variationen der Materialparameter des mit 4 mm homogen aufgelösten „Brooks“-Menschmodells auf die SAR-Werte bei frontalem Einfall einer HEW mit $f = 2.450$ MHz, $E = 1$ V/m und vertikaler Polarisation.

3. Gerätemodell

a) Antenne

Die bei der Modellierung der Endgeräte verwendete räumliche Auflösung beträgt einheitlich 1 mm. Dabei ist der Sendeantenne als primärer Strahlungsquelle besondere Aufmerksamkeit zu widmen. Bei den in Abschnitt 2.4 behandelten Modellen mit Stab-, 'inverted F'- oder Faltdipol-Antennen war die Modellbildung unkritisch; lediglich für die 900/1.950 MHz-Multibandantenne der PCMCIA-Karte wurde für die Routinerechnungen mit 1 mm Auflösung zur Vermeidung von 'stair case'-Effekten ein vereinfachtes Modell verwendet (s. Bilder 12b und 16a im Vergleich).

b) Materialdaten

Die dielektrischen Parameter von Gehäusen und Platinen der Endgeräte stützen sich auf Literaturangaben gängiger Materialien. Im Gegensatz zu vielen anderen Untersuchungen wurden bei den Kunststoffen auch leichte Verluste angesetzt (κ), um die Absorptionswirkung zu simulieren. Aufgrund der unterschiedlichen Einfärbungen der Stoffe ist die Leitfähigkeit mit einer relativ großen Unsicherheit behaftet. Abgesehen vom Handy wird ihr Einfluss auf die Genauigkeit der SAR-Ergebnisse für den menschlichen Körper aber als eher gering eingeschätzt.

Insgesamt lassen die Ergebnisse der in Abschnitt 3.3 vorgestellten gegenseitigen Validierung von rechnerischer und messtechnischer Ermittlung der Abstrahlcharakteristika auf eine genügend genaue Modellierung der Endgeräte schließen.

c) Sendeleistung

Annahmen über die tatsächliche Sendeleistung eines in Betrieb befindlichen drahtlosen Kommunikationsendgerätes sind in der Praxis schwierig, da die momentane Leistung von vielen Einflussgrößen abhängen kann, wie z.B. der Empfangssituation der Gegenstation, der Verkehrsdichte im Gesamtsystem und dem Zustand einer eventuellen Leistungsregelung. Bei der konservativen Auswertung von Simulationsergebnissen sollte ein erster Ansatz daher immer von der maximal zulässigen mittleren Leistung des Endgerätetyps ausgehen, die in realen Systemen allerdings nie oder nur äußerst selten ausgenutzt werden dürfte.

Das verwendete Rechenverfahren und die Einfügung einer Ersatzspannungsquelle für das elektronische Speisetzwerk der Antenne bei der Modellbildung gestatten auch die Berücksichtigung einer eventuellen Veränderung der Antenneneingangsimpedanz und damit der Sendeleistung infolge von Rückwirkungen der Umgebung oder von Gerätemodifikationen. Da die exakten Impedanzverhältnisse bei der Antennenspeisung in den realen Endgeräten nicht bekannt sind, werden die Simulationsergebnisse für ein Endgerät in der vom Hersteller vorgesehenen Originalposition jeweils als Anpassungsfall interpretiert, der auch die Aussendung maximaler Leistung ermöglicht. Bei schwachen Änderungen der Eingangsimpedanz (die Leistungsänderungen um max. ± 3 dB zur Folge haben) wird der Fall postuliert, dass entweder eine Regelung (bei Umgebungseinflüssen) oder ein Nachtrimmen der Anpassungsschaltung durch den Gerätehersteller (bei neuen Topologien) den Anpassungszustand wieder herstellen können. Bei größeren Abweichungen von der Original-Eingangsimpedanz werden die Berechnungen zwar auch auf Basis der Maximalleistung ausgewertet, es wird dann aber darauf hingewiesen, dass es sich wegen der starken Fehlanpassung um einen fiktiven Sendefall handelt. Im Rahmen der Untersuchungen traten derartige Fälle nur bei Topologieänderungen des Notebooks mit PCMCIA-Karte in der W-LAN-Betriebsart auf.

4. Umgebungseinfluss

Um quantitative Aussagen über das Störpotenzial der Umgebung zu gewinnen, werden in den Szenarien NB-23 bis NB-25 metallische Wände hinter dem Schreibtisch, auf dem das Notebook mit der PCMCIA-Karte platziert ist, in ca. 85 cm Entfernung von dem sitzenden Erwachsenen angeordnet. Der Vergleich mit den SAR-Werten der entsprechenden Szenarien ohne Wände (NB-4, NB-10 und NB-15) zeigt für die drei Sendefrequenzen (900, 1.950 und 2.450 MHz) Abweichungen von deutlich unter 10%, sodass der Einfluss von Objekten in einer Entfernung von mehr als einem Meter als vernachlässigbar angesehen werden kann. Somit ist es bei den hier interessierenden Szenarien gerechtfertigt, auf die Modellierung einer detaillierten Möblierung zu verzichten.

Gesamtunsicherheit

Die tatsächlichen SAR-Werte können von den für die spezifizierten Standardfälle erzielten Rechenergebnissen abweichen. Dabei ist eine Unterschätzung im Hinblick auf Personenschutzerwägungen selbstverständlich der kritischere Fall. Eine pauschale Fehlerangabe ist in Anbetracht des Untersuchungsspektrums nicht angemessen, da – getrennt nach Ganzkörper- und Teilkörper-SAR - eigentlich frequenz-, geräte- und sogar szenarienspezifische Fehlerrechnungen vorgenommen werden müssten. Um dennoch einen groben Anhaltspunkt zu geben, folgt unter konservativer Berücksichtigung aller Einflussgrößen (korrekte Sendeleistung, angemessenes Körpermodell und eines der spezifizierten Szenarien mit Endgeräteposition gemäß Bild 53 vorausgesetzt) die vorsorgliche Empfehlung, bei Auftreten einer mit den Daten aus Abschnitt 4.2 bzw. 4.3 abgeschätzten Grenzwertausschöpfung von 50% und mehr weitere sorgfältige Einzelfallprüfungen vornehmen zu lassen.

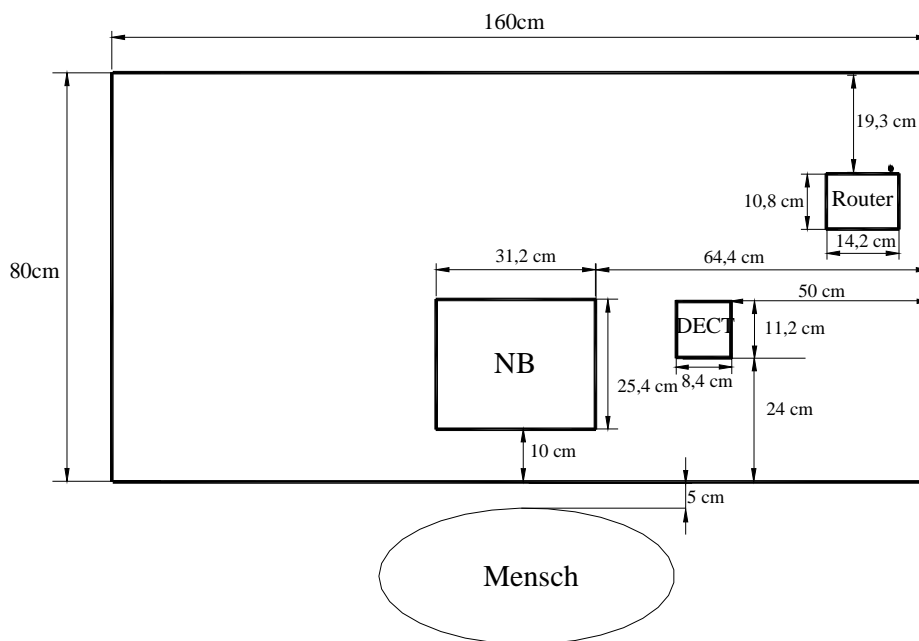


Bild 53: Originalpositionen der Endgeräte auf dem Schreibtisch

4.4.3 Repräsentativität der Ergebnisse

Da in diesem Projekt körpernahe Endgeräte behandelt werden, sind vor der Berechnung die meisten Variablen des jeweiligen Szenarios, in das ein Gerät eingebettet wird, festzulegen. Alle externen Parameter, die unmittelbaren Einfluss auf die in Richtung des Körpers abgestrahlte Leistung haben, müssen bei der Modellbildung so exakt wie möglich spezifiziert werden. Im Nachhinein existiert - anders als bei Fernfeldszenarien - ohne erneute Rechnung kein Spielraum, die Auswirkung von Veränderungen abzuschätzen.

Wenn beispielsweise der Abstand Quelle – Körper vergrößert wird, ist damit unter Fernfeldbedingungen regelmäßig eine Reduzierung der Leistungsdichte $S \sim 1/r^2$ verbunden, im Nahfeld einer Quelle ist eine solche Aussage aber nicht mehr zuverlässig. Bild 54 zeigt dazu beispielhaft den Einfluss einer Positionsveränderung des Notebooks mit Funkschnittstelle (Referenzposition s. Bild 53) auf die SAR-Werte. Trotz einer relativ geringen Lageveränderung des Endgeräts um 5 cm ergeben sich teilweise erhebliche prozentuale Veränderungen der spezifischen Absorptionsraten. Während die Relevanz des Teilkörper-Maximums bei UMTS (Bild 54b), das in der linken Hand auftritt, mit Hinweis auf die Bewegung und die daraus abzuleitende Reduzierung des über 6 Minuten gemittelten SAR-Wertes relativiert werden kann, ist dem Anstieg der Ganzkörper-SAR (Bild 54a) größere Aufmerksamkeit zu widmen. Im vorliegenden Beispielfall liegt die Grenzwertausschöpfung bei theoretischer Maximal-Sendeleistung allerdings immer noch unter 3% (GPRS) bzw. unter 1% (UMTS, W-LAN). Noch unkritischer fallen die Ergebnisse für entsprechende Positionsänderungen des W-LAN-Routers und der DECT-Basisstation aus.

Ergebnisse zur Verschiebung des Laptops aus mittlerer Lage auf den Oberschenkeln in eine Position, bei der sich die Funkschnittstelle (PCMCIA-Karte oder Bluetooth-USB-Adapter) unmittelbar über einem Oberschenkel befindet, sind in Bild 55 dargestellt. Zusätzlich zu den prozentualen Veränderungen der SAR-Werte sind die absoluten SAR-Werte bei angenommener theoretischer Maximalleistung der jeweiligen Dienste angegeben. Tendenziell, wenn auch nicht in dergleichen Größenordnung mit den Aussagen von [Christ et al. 2006] übereinstimmend, ist die prozentuale Zunahme des Teilkörper-SAR-Maximums bei W-LAN-Frequenzen. Am kritischsten zeigt sich der GPRS-Betrieb, wobei die Grenzwertüberschreitung bei den meisten praktischen Anwendungen wegen der deutlich unter dem hier angenommenen Maximalwert liegenden Sendeleistung vermeidbar sein dürfte.

Bei einigen Szenarien mit Router und DECT-Telefon wird eine als metallische Fläche modellierte Wand hinter dem Schreibtisch angenommen. Verschiebungen dieser Wand (hier um 25 und 50 cm) bzw. die zusätzliche Einfügung einer Seitenwand zur Simulation einer Raumecke können die resultierenden SAR-Werte beeinflussen. Die größte Veränderung ergab sich für den Fall des Routers mit einer Erhöhung der maximalen Teilkörper-SAR in den Gliedmaßen um 210%. Dennoch lag die Grenzwertausschöpfung lediglich bei 0,13%.

Da mit jeder Positionsänderung ein neues Szenario und damit eine komplette Feld- und SAR-Berechnung verbunden ist, konnten im Rahmen dieses Vorhabens nicht noch weitere Fälle zur Verschiebung der Endgeräte oder der Wände untersucht werden.

Die einzige externe Größe, deren unmittelbare Auswirkung auf die SAR im Körper auch nachträglich beurteilt werden kann, ist die mittlere Sendeleistung des Endgerätes, die deshalb im Falle einer Verwendung der hier erarbeiteten Ergebnisse möglichst genau ermittelt werden sollte.

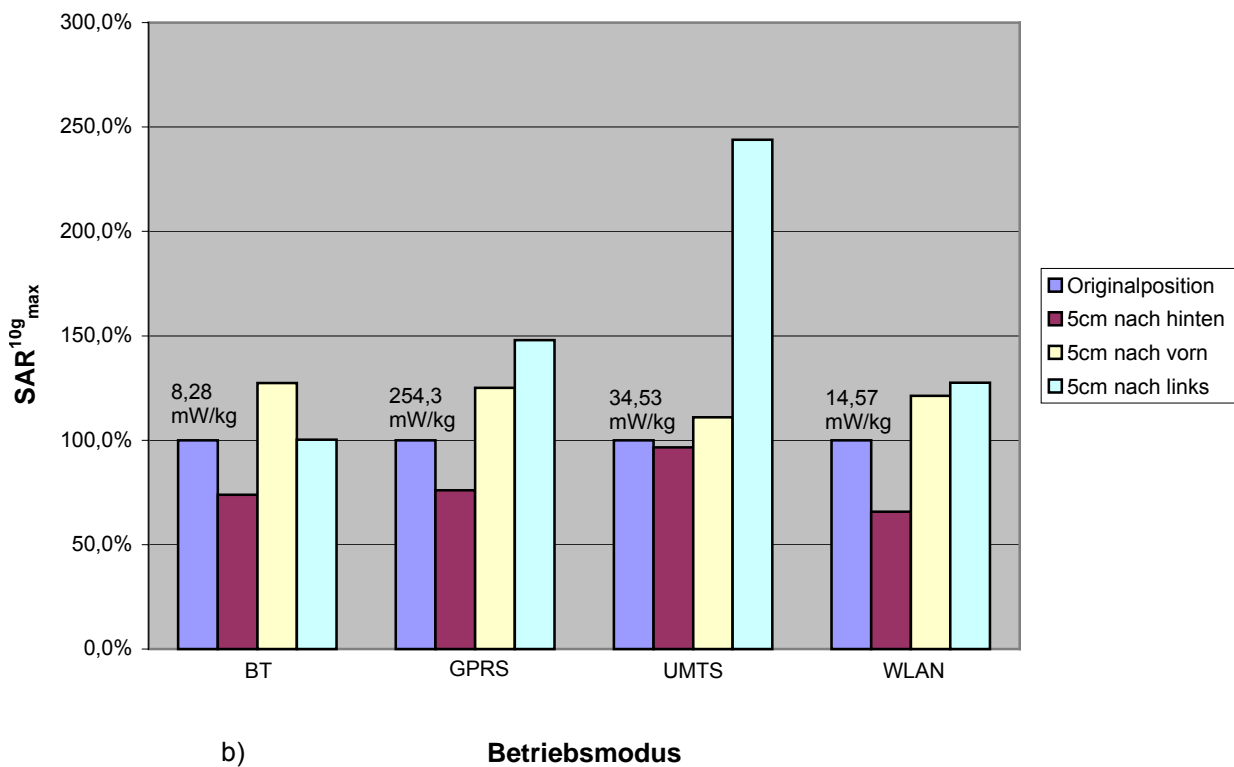
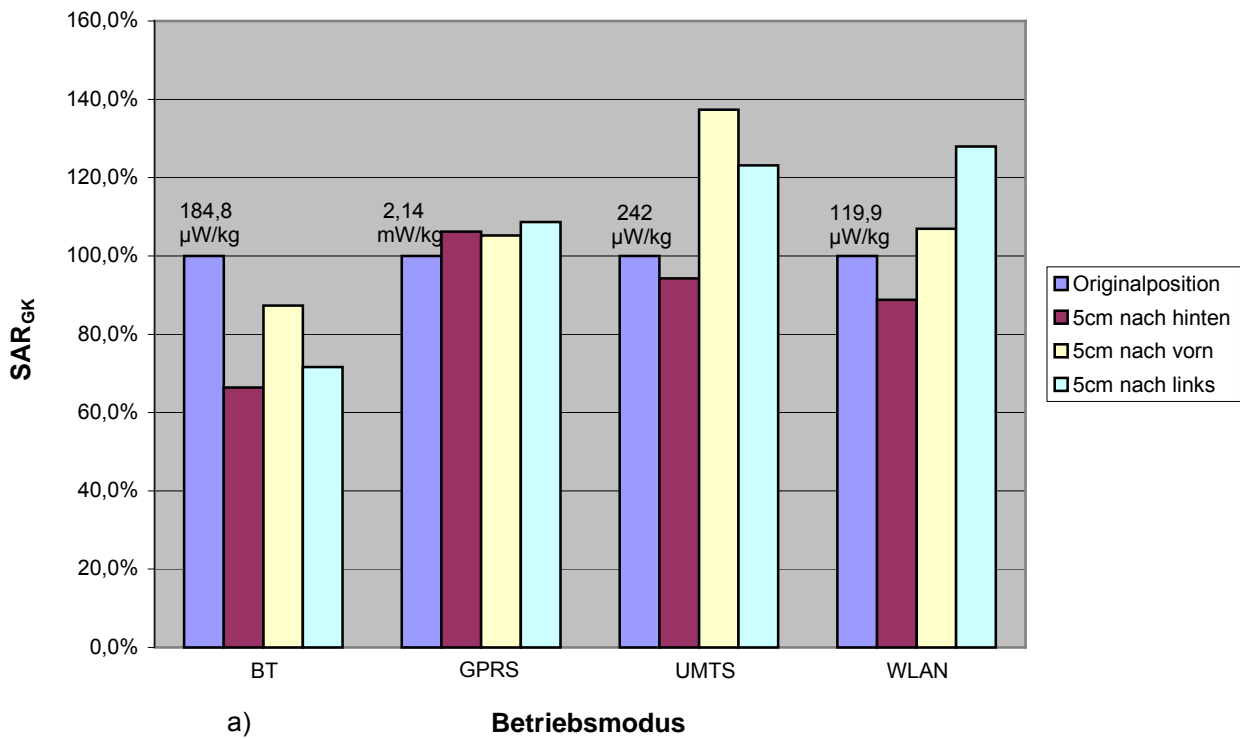


Bild 54: Prozentuale Änderung von Ganzkörper- (a) und Teilkörper-SAR (b) im Personenmodell des Erwachsenen gemäß Bild 31 infolge Positionsveränderungen des Notebooks auf dem Schreibtisch bei verschiedenen Betriebsarten

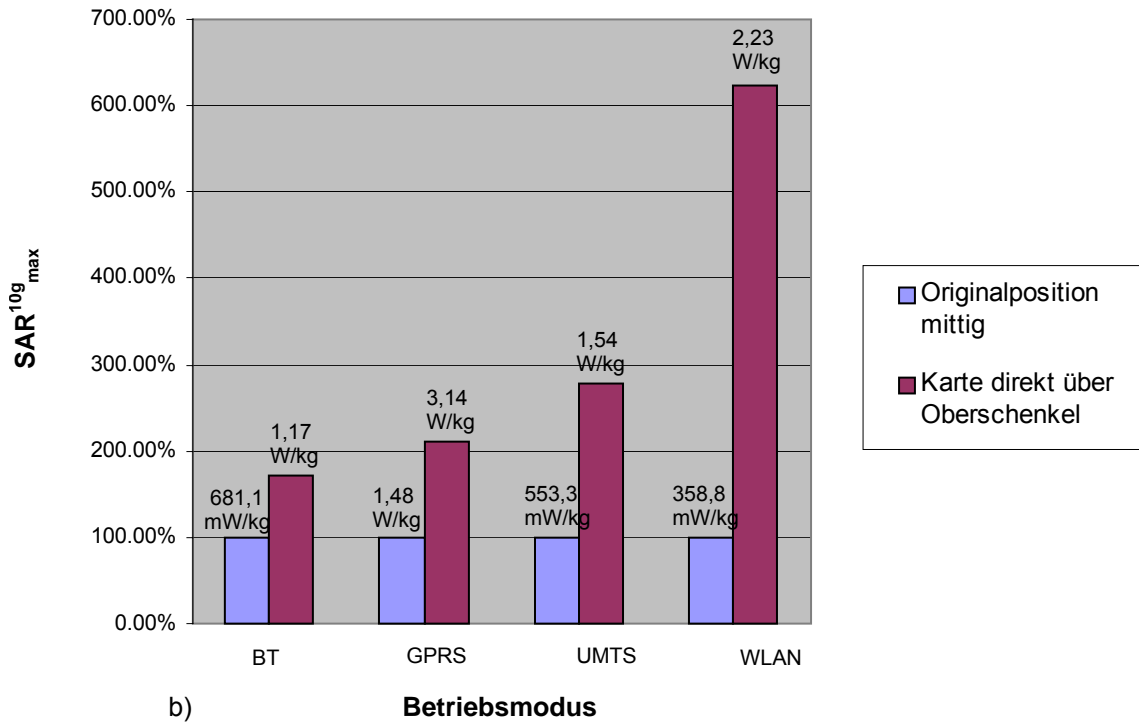
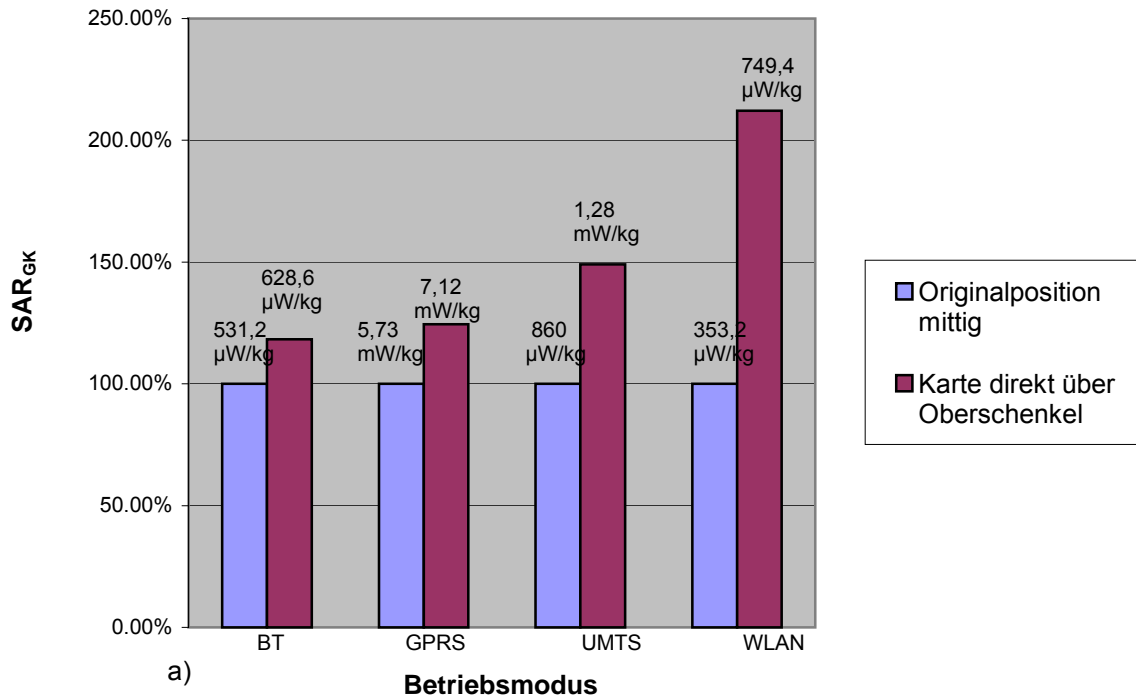


Bild 55: Prozentuale Änderung von Ganzkörper- (a) und maximaler Teilkörper-SAR (b) im Personenmodell des Erwachsenen analog zu Bild 34 infolge einer seitlichen Verschiebung des Notebooks auf den Oberschenkeln bei verschiedenen Betriebsarten

AP 5 Modifikation der Endgeräte, Bewertung hinsichtlich des Minimierungspotenzials

5.1 Vorgehensweise zur SAR-Minimierung und zur Bewertung der Übertragungsqualität

a) SAR-Minimierung

Die Ergebnisse aus AP 4, die durchweg SAR-Werte unterhalb der in [ICNIRP 1998] empfohlenen Grenzwerte ausweisen, könnten als Argument dienen, auf die Untersuchung von Maßnahmen zur weiteren Minimierung der Spezifischen Absorptionsraten zu verzichten. Andererseits ist aber zu bedenken, dass die notwendigerweise durch aufwändige Einzelfallberechnungen erzielten Resultate nur für die hier beispielhaft aus einer unübersehbaren Vielfalt typischer Endgeräte-Szenarien ausgewählten Fälle gelten und das Auftreten höherer SAR-Werte bei anderen Quelle-Mensch-Konfigurationen nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden kann. Außerdem gewinnt die SAR-Minimierung im Zusammenhang mit der Diskussion über die Einzelbeiträge multipler Quellen zunehmend an Bedeutung, und schließlich zeigen Beispiele in verschiedenen Ländern, dass die praktische Umsetzung des Vorsorgeprinzips im Hinblick auf die Immissions-Grenzwerte durchaus sehr unterschiedliche Auffassungen widerspiegelt und somit möglicherweise auch die hier als Basis verwendeten SAR-Grenzwerte nicht als auf Dauer zementiert angesehen werden dürfen.

Insofern erscheint es – zunächst unabhängig von dem absoluten Niveau der SAR-Werte – sinnvoll, dem Projektziel folgend eine Untersuchung denkbarer Prinzipien zur Reduzierung der SAR körpernaher Endgeräte durchzuführen.

Für alle Endgeräte wurden von den in Abschnitt 2.2 festgelegten Konfigurationen mehrere arbeitsplatztypische ausgewählt und in insgesamt 54 Simulationen mit geänderten Antennenformen und -positionen, Mehrfachantennen und modifizierten Gerätetopologien daraufhin untersucht, ob die im menschlichen Körper verursachten Spezifischen Absorptionsraten noch verkleinert werden können. Da hinsichtlich dieser Zielsetzung keine Vorarbeiten aus der Literatur verfügbar sind, mussten zunächst relativ willkürliche Modifikationen, die einerseits plausibel, andererseits in der Praxis durchführbar erschienen, getestet werden, ehe erste prinzipielle Erkenntnisse zur systematischen SAR-Minimierung gewonnen werden konnten. Die behandelten Szenarien sind in der nachstehenden Tabelle V (a und b) und in Tabelle VI (auf S. 106) aufgelistet.

Endgerät	Szenario	System (f [MHz])	Sitzendes Personenmodell		Position der Karte am Notebook			
			Erwachsener	Jugendlicher	Original, Monitorwinkel 90°	hinter Bildschirm		
1: Funkschnittstellen-Karte						unten	Mitte	oben
	1	UMTS (1.950)	x		x			
	2	UMTS (1.950)	x			x		
	3	UMTS (1.950)	x				x	
	4	UMTS (1.950)	x					x
	5	UMTS (1.950)		x	x			
	6	UMTS (1.950)		x		x		
	7	UMTS (1.950)		x			x	
	8	GPRS (900)	x		x			
	9	GPRS (900)	x			x		
	10	GPRS (900)	x				x	
	11	GPRS (900)	x					x
	12	GPRS (900)		x	x			
	13	GPRS (900)		x		x		
	14	GPRS (900)					x	
	15	W-LAN (2.450)	x		x			
	16	W-LAN (2.450)	x			x		
	17	W-LAN (2.450)	x				x	
	18	W-LAN (2.450)	x					x
	19	W-LAN (2.450)		x	x			
	20	W-LAN (2.450)		x		x		
	21	W-LAN (2.450)						x
	22	Bluetooth (2.450)	x		x			
	23	Bluetooth (2.450)	x			x		
	24	Bluetooth (2.450)	x				x	
	25	Bluetooth (2.450)		x	x			
	26	Bluetooth (2.450)		x		x		
	27	Bluetooth (2.450)						x

Tabelle Va: Szenarien für Endgerät 1

Endgerät	Szenario	System (f [MHz])	Sitzendes Personenmodell		Maßnahmen
			Erwachsener	Jugendlicher	
2: W-LAN-Router					
	1	W-LAN (2.450)	x		Original, ohne Wand
	2	W-LAN (2.450)	x		'inverted F'-Antenne
	3	W-LAN (2.450)	x		2 Dipolantennen (Abstand 0,5 λ)
	4	W-LAN (2.450)	x		2 'inverted F'-Antennen (Abstand 0,5 λ)
	5	W-LAN (2.450)	x		2 Dipolantennen (Abstand λ)
	6	W-LAN (2.450)	x		2 'inverted F'-Antennen (Abstand λ)
	7	W-LAN (2.450)	x		2 Dipolantennen (Abstand 0,5 λ), Position 2
	8	W-LAN (2.450)	x		2 Dipolantennen (Abstand 0,5 λ), Position 3
	9	W-LAN (2.450)	x		Original mit Abschirmung 1
	10	W-LAN (2.450)	x		Original mit Abschirmung 2
	11	W-LAN (2.450)	x		Original mit Abschirmung 3
	12	W-LAN (2.450)		x	Original, ohne Wand
	13	W-LAN (2.450)		x	2 Dipolantennen (Abstand 0,5 λ)
14	W-LAN (2.450)		x	Original mit Abschirmung 3	
3: DECT-Basisstation					
	1	DECT (1.900)	x		Original, ohne Wand
	2	DECT (1.900)	x		Dipolantenne
	3	DECT (1.900)	x		2 Dipolantennen (Abstand 0,5 λ)
	4	DECT (1.900)	x		2 'inverted F'-Antennen (Abstand 0,5 λ)
	5	DECT (1.900)	x		Original mit Abschirmung
	6	DECT (1.900)		x	Original, ohne Wand
	7	DECT (1.900)		x	2 Dipolantennen (Abstand 0,5 λ)
	8	DECT (1.900)		x	Dipolantenne
9	DECT (1.900)		x	Original mit Abschirmung	

Tabelle Vb: Szenarien für Endgeräte 2 und 3

b) Übertragungsqualität

Bei allen Ansätzen zur Absenkung der SAR war die Nebenbedingung zu beachten, dass sich die Übertragungsqualität nicht verschlechterte, weil sonst in praktischen Systemen Gegenmaßnahmen, z.B. Erhöhungen der Sendeleistung, notwendig würden. Es erscheint zunächst nahe liegend, als Kriterium für die Übertragungsqualität die Kanalkapazität zu verwenden (s. z.B. [Paulraj et al. 2003]). Ihre Bestimmung erfordert jedoch die Kenntnis des Aufbaus von Sende- und Empfangsstation; da in den vorliegenden Fällen aber nur die endgeräteseitige Sendeeinrichtung spezifiziert ist, während weder Lage noch technische Daten des Empfängers einer Gegenstelle bekannt sind, wird statt der Kanalkapazität in dieser Studie der so genannte 'mean effective gain (MEG)' herangezogen, der in der mobilen Kommunikationstechnik häufig eingesetzt wird und eine globale Bewertung der Übertragungseigenschaften eines Systems zulässt.

In [Taga 1990] wurde diese Größe verwendet, um das Verhalten unterschiedlicher Empfänger in einer beliebigen Systemumgebung miteinander zu vergleichen. Dazu wird die Gewinnfunktion des Empfänger-Szenarios unter Hinzunahme einer statistisch begründeten funktionalen Beschreibung des Winkelspektrums fiktiv angenommener ferner Sender benötigt. Unter Ausnutzung der Reziprozität wird die Formulierung der MEG hier auf den umgekehrten Fall bekannter Senderszenarios und durch Winkelspektren global beschriebener Empfangseigenschaften der fernerer Umgebung übertragen:

$$MEG = \frac{1}{\underbrace{P_{\vartheta,S} + P_{\varphi,S}}_{P_{SG}}} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} [P_{\vartheta,S} G_{\vartheta,S}(\vartheta, \varphi) \Omega_{\vartheta,E}(\vartheta, \varphi) + P_{\varphi,S} G_{\varphi,S}(\vartheta, \varphi) \Omega_{\varphi,E}(\vartheta, \varphi)] \sin \vartheta d\vartheta d\varphi \quad (5.1)$$

Darin bedeuten

P_{SG} : Gesamt-Sendeleistung des Endgeräte-Szenarios

$P_{\vartheta,S}$: Sendeleistungsanteil für die ϑ -Polarisation

$P_{\varphi,S}$: Sendeleistungsanteil für die φ -Polarisation

$G_{\vartheta,S}$: Gewinnfunktion der Sendeantenne für die ϑ -Polarisation

$G_{\varphi,S}$: Gewinnfunktion der Sendeantenne für die φ -Polarisation

$\Omega_{\vartheta,E}$: Empfangswinkelspektrum der Umgebung für die ϑ -Polarisation

$\Omega_{\varphi,E}$: Empfangswinkelspektrum der Umgebung für die φ -Polarisation

Als Winkelspektrum des fiktiven Empfängers in der fernen Umgebung wird hier für beide Polarisationen eine Gaußfunktion in ϑ -Richtung und eine Konstante in azimuthaler Richtung angenommen:

$$\Omega_{\xi,E}(\vartheta, \varphi) = \frac{A_{\xi}}{2\pi} e^{-\left[\frac{(\vartheta - m_{\xi})^2}{2\sigma_{\xi}^2}\right]} \quad (5.2)$$

Für die $e^{-1/2}$ -Breite σ_{ξ} der Gaußfunktion wird in Anlehnung an [Green und Jensen 2000] bei beiden Polarisationen ein Wert von $\sigma_{\vartheta} = \sigma_{\varphi} = 40^\circ$ verwendet. Das Maximum des Empfangswinkelspektrums soll in der Horizontalebene $\vartheta = \pi/2$ liegen; dann gilt $m_{\vartheta} = m_{\varphi} = \pi/2$. Da der Boden hier immer als geerdet angenommen wird, liegt der Wertebereich für ϑ in den Gln. (5.1) und (5.2) bei $0 \leq \vartheta \leq \pi/2$.

Der Amplitudenfaktor A_{ξ} in Gl. (5.2) ergibt sich aus der Normierung

$$\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \Omega_{\xi,E}(\vartheta, \varphi) \sin \vartheta d\vartheta d\varphi = 1 \quad (5.3)$$

5.2 Ergebnisse für einige ausgewählte modifizierte Szenarien

Zunächst sollen zum Endgerät „Notebook“ zwei Szenarien mit dem am Schreibtisch sitzenden Erwachsenen gemäß Bild 7a, modelliert in Anlehnung an Bild 31, diskutiert werden. Im Gegensatz zu den bisherigen Betrachtungen, bei denen der Bildschirm des Notebooks um 120° aufgeklappt war, wird im Folgenden ein Öffnungswinkel von 90° verwendet (Bild 56). Der Grund dafür liegt in der Absicht, die Funkchnittstelle an andere Bereiche des Notebooks zu verlagern, ohne die Modellierung der Antennen zu verschlechtern. Durch optimale Ausrichtung der Antenne auf das kartesische Rechengitter lässt sich beispielsweise die durch eine 'staircase'-Approximation entstehende Ungenauigkeit vermeiden.

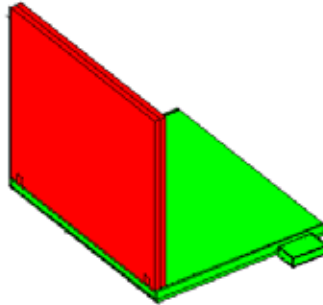


Bild 56: Rechenmodell des Notebooks mit Öffnungswinkel 90° und PCMCIA-Karte in Originalposition

Im GPRS-Betrieb der PCMCIA-Karte erhält man bei einer angenommenen Sendeleistung von $P_S = 960$ mW folgende SAR-Werte: $SAR_{GK} = 2,51$ mW/kg (3,17% vom Grenzwert), $SAR_{max}^{10g} = 28,22$ mW/kg im Rumpf (1,44%) und $SAR_{max}^{10g} = 284,45$ mW/kg in den Gliedmaßen (7,1%). Diese liegen geringfügig höher als im Fall des gleichen Szenarios mit 120° Öffnungswinkel (z.B. SAR_{GK} 2,69% vom Grenzwert), was vermutlich auf die Veränderung des an der Bildschirmoberfläche reflektierten Feldes zurückzuführen ist. Der 'mean effective gain' für das neue Szenario errechnet sich zu $MEG = -8,93$ dB.

Ausgehend von den genannten Daten wird nun der Vergleich mit den Ergebnissen für modifizierte Endgeräte im ansonsten unveränderten Szenario durchgeführt. Dazu wurde die PCMCIA-Karte nacheinander an die in Bild 57 dargestellten Positionen versetzt.

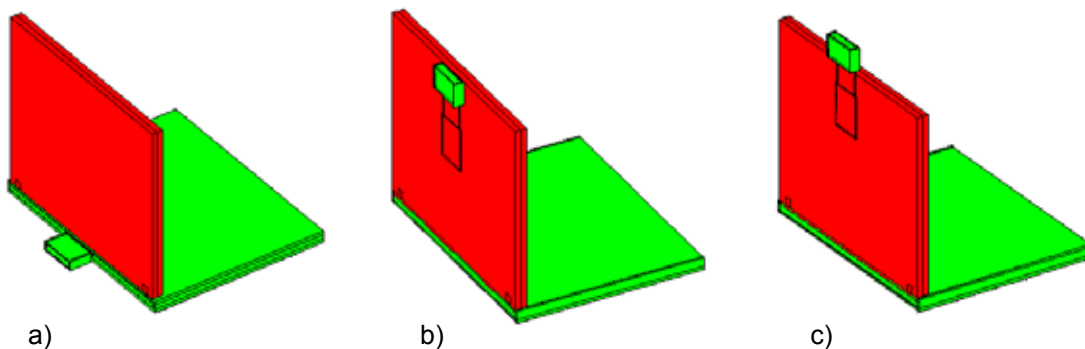


Bild 57: Rechenmodell des Notebooks mit veränderten Positionen der PCMCIA-Karte hinter dem Bildschirm; a) unten horizontal; b) mittig vertikal; c) oben vertikal

Das beste Ergebnis hinsichtlich der SAR-Minimierung liefert hier Fall b) (Tab. Va, Szenario 10), weil eine eindeutige Abschirmwirkung in Richtung des Nutzers erzielt wird. Gegenüber der als Originalkonfiguration angesehenen Positionierung gemäß Bild 56 reduziert sich für die Positionierung gemäß Bild 57b die Ganzkörper-SAR auf 19% des Ausgangswertes (476 μ W/kg) und die maximale Teilkörper-SAR auf 14% (Rumpf) und 17% (Gliedmaßen) der entsprechenden Originalwerte. Dies würde z.B. für die Ganzkörper-SAR bedeuten, dass die Grenzwertausschöpfung statt bei ca. 3% nur noch bei 0,6% läge. Auch beim MEG ist weniger der Absolutwert, als seine Veränderung von Interesse. Diese beträgt $\Delta MEG = +0,184$ dB, womit der MEG geringfügig besser ist als im Originalfall, sodass keine Verschlechterung des Systemverhaltens des modifizierten Endgerätes signalisiert wird.

Eine entsprechende Untersuchung für den W-LAN-Betrieb der PCMCIA-Schnittstellenkarte (Tab. Va, Szenario 17) bei $P_S = 100$ mW zeigt tendenziell dieselben Resultate. Sowohl die Verminderung der SAR für Konfiguration b) aus Bild 57 auf 2,4% vom Originalwert (3,8 μ W/kg) als auch die Zunahme des

'mean effective gain' um $\Delta\text{MEG} = + 4,87$ dB scheinen hier zunächst sogar überragend zu sein: Allerdings muss leider betont werden, dass aufgrund der speziellen W-LAN-Antennenkonfiguration in der untersuchten PCMCIA-Karte (vgl. Bild 16 und 12b) die Antennen-Eingangsimpedanz bei Annäherung an den metallhaltigen Bildschirmteil so stark verändert wird, dass die schlechte Effizienz und das veränderte Richtdiagramm die Antenne praktisch unbrauchbar machen.

Dagegen sind die für UMTS- und GPRS-Betrieb vorgesehenen Antennen der PCMCIA-Karte und auch die Bluetooth-Antenne des USB-Adapters durch ihre Anordnung über einer Masseebene gegenüber Außenwirkungen von der Kartenrückseite her deutlich unempfindlicher, sodass auch die Annahme, bei einer Positionsveränderung der Karte den Fall maximaler zulässiger Sendeleistung durch geringfügiges Nachjustieren der Antennenanpassung wieder erreichen zu können, gerechtfertigt ist.

In dem im folgenden Abschnitt 5.3 angegebenen Katalog sind nur die Ergebnisse für die PCMCIA-Karte im W-LAN-Modus bei einer Positionierung gemäß Position b) aus Bild 57 wie oben zu kommentieren. In allen anderen Fällen können die genannten Zahlenwerte unmittelbar und ohne die Notwendigkeit von Zusatzinformationen über das Impedanzverhalten der Antennen interpretiert werden.

Bei der SAR-Minimierung für den W-LAN-Router und die DECT-Basisstation besteht aufgrund der kompakten Gehäuseabmessungen wenig Spielraum für aufwändige Modifikationen der Gerätetopologien. Die untersuchten Maßnahmen betreffen daher vor allem Änderungen im Antennendesign, wie den Austausch von Dipol- bzw. 'inverted-F'-Antennen und die Verwendung von Mehrfachantennen, sowie elektromagnetische Abschirmungen der nutzerseitigen Gehäusewände.

Das im Katalog des folgenden Abschnitts unter Router-6 skizzierte Szenario mit dem Erwachsenen am Schreibtisch und dem W-LAN-Router mit 2 'inverted-F'-Antennen bei jeweils 50 mW mittlerer Sendeleistung ergibt die stärkste SAR-Absenkung auf beispielsweise 42% ($18,3 \mu\text{W/kg}$) für die Ganzkörper-SAR gegenüber der Original-Konfiguration, die nur mit 1 Dipol-Antenne bei 100 mW sendet. Bei Mehrfach-Antennensystemen ist im Nahbereich aber immer mit starken Variabilitäten durch Positionsveränderungen infolge von Interferenzeffekten zu rechnen. Dies wird am Vergleich der mit Dipol-Antennen modellierten Router-Szenarien Nr. 3, 7 und 8 deutlich, bei denen der SAR_{GK} -Wert allein aufgrund unterschiedlicher Positionierungen des Endgeräts auf dem Schreibtisch zwischen 49% und 217% des Referenzwertes schwankt.

Weniger lageempfindlich erweist sich die Verwendung einer metallischen Teil-Abschirmung des W-LAN-Routers, die allerdings wie unter Router-11 dreiseitig ausgeführt werden sollte und den SAR_{GK} -Wert auf 69% ($30 \mu\text{W/kg}$) gegenüber dem Referenzszenario absenkt, ohne den MEG-Wert zu verändern.

Für die DECT-Basisstation sind die Minimierungsergebnisse tendenziell vergleichbar. Das wirkungsvollste Szenario (DECT-5) weist bei einer dreiseitigen Abschirmung des mit einer 'inverted-F'-Antenne bestückten Endgeräts eine Reduzierung der Ganzkörper-SAR auf 33% des Referenzwertes aus (entsprechend $98,4 \mu\text{W/kg}$ bei $P_s = 215,8$ W).

Ein Vergleich der Ganzkörper-SAR-Werte für die Szenarien mit Notebook bei 90° Öffnungswinkel des Bildschirmteils mit den entsprechenden für 120° berechneten Werten aus Abschnitt 4.3 zeigt, dass sich in den meisten Fällen ein leichter Anstieg der SAR ergibt, der aber maximal bei weniger als 20% liegt. Ausnahmen von dieser Regel treten beim W-LAN- und Bluetooth-Betrieb der PCMCIA-Karte auf, die aber wegen des ohnehin extrem niedrigen Niveaus der SAR-Werte nicht von Bedeutung sind.

Für den Router und die DECT-Basisstation weichen die unter den mit „Original“ bezeichneten Konfigurationen erzielten Ergebnisse deswegen von den vergleichbar erscheinenden Szenarien aus Abschnitt 4.3 ab, weil zur Untersuchung der SAR-Minimierung grundsätzlich die Wand hinter dem Schreibtisch weggelassen wurde.

5.3 Katalog von SAR- und MEG-Ergebnissen für alle Szenarien aus Tabelle V

Im nachstehenden Katalog sind die Rechenergebnisse für 54 verschiedene Szenarien der 3 Endgeräte in Kurzform dargestellt. Alle Konfigurationen beziehen sich auf die Personenmodelle des sitzenden Erwachsenen oder Jugendlichen am Schreibtisch bzw. mit dem Notebook auf den Oberschenkeln. Die mittlere Sendeleistung der Endgeräte ist aus Normierungsgründen zu $P_S = 100 \text{ mW}$ gewählt (abgesehen von kommentierten Ausnahmen im vierten Teil des Katalogs).

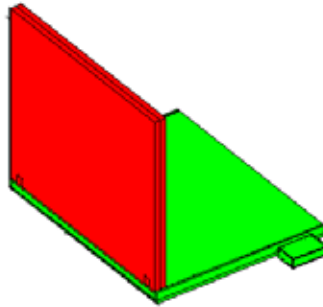
Die Abkürzungen bedeuten:

Abschirmung 1	zweiseitige metallische Abschirmung, Höhe 62 mm
Abschirmung 2	zweiseitige metallische Abschirmung, Höhe 124 mm
Abschirmung 3	dreiseitige metallische Abschirmung
BT	Bluetooth-Betrieb des Notebooks (2.450 MHz)
Dect	DECT-Basisstation (Endgerät 2) (1.900 MHz)
Dipol / 2Dipole	Dipolantenne / 2 Dipolantennen
Er	Erwachsener
GPRS	GPRS-Betrieb des Notebooks (900 MHz)
halblambda	Antennenabstand $\lambda/2$
INF / 2INF	'inverted-F'-Antenne / 2 'inverted-F'-Antennen
Ju	Jugendlicher
Knie	Notebook liegt auf Oberschenkeln
Lambda	Antennenabstand λ
mitte	PCMCIA-Karte hinter dem Bildschirm in mittlerer Position
NB	Notebook (Endgerät 1)
oben	PCMCIA-Karte hinter dem Bildschirm in oberer Position
Original	Originalanordnung als Referenz
Pos2 / Pos3	Position des W-LAN Routers hinten Mitte / vorne rechts
Router	W-LAN Router (Endgerät 3)(2.450 MHz)
unten	PCMCIA-Karte hinter dem Bildschirm in unterer Position
UMTS	UMTS-Betrieb des Notebooks (1.950 MHz)
WLAN	W-LAN-Betrieb des Notebooks (2.450 MHz)

5.3.1 Endgerät 1: Notebook-Funkschnittstelle ($P_S = 100 \text{ mW}$), am Schreibtisch sitzende Person

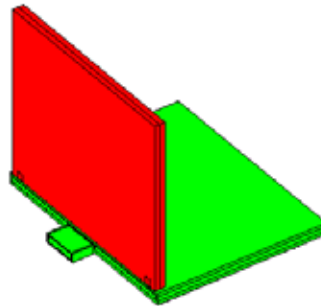
Der erste Teil des Katalogs bezieht sich wieder auf Szenarien mit Notebook-Funkschnittstellen, denen Konfigurationen in Anlehnung an Bild 7a bzw. Tabelle Va zugrunde liegen.

NB-1-UMTS-Er-Original



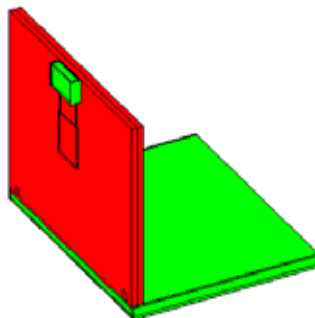
$SAR_{GK} = 163,8 \text{ } \mu\text{W/kg}$ (100% von Original)
 $SAR_{10g_{max}}^{\text{Rumpf}} = 6,66 \text{ mW/kg}$ (100% von Original)
 $SAR_{10g_{max}}^{\text{Gliedermaßen}} = 21,81 \text{ mW/kg}$ (100% von Original)
Position des SAR_{10g} -Maximums (Rumpf): $x = 0,556 \text{ m}$; $y = 0,312 \text{ m}$; $z = 0,780 \text{ m}$
Position des SAR_{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,374 \text{ m}$; $y = 0,272 \text{ m}$; $z = 0,912 \text{ m}$
 $MEG = -12,98 \text{ dB}$

NB-2-UMTS-Er-unten



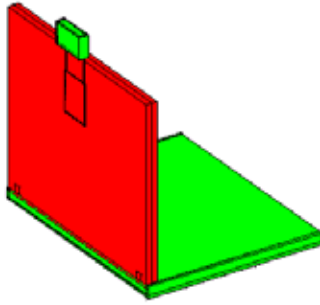
$SAR_{GK} = 113,2 \text{ } \mu\text{W/kg}$ (69% von Original)
 $SAR_{10g_{max}}^{\text{Rumpf}} = 2,71 \text{ mW/kg}$ (41% von Original)
 $SAR_{10g_{max}}^{\text{Gliedermaßen}} = 9,72 \text{ mW/kg}$ (45% von Original)
Position des SAR_{10g} -Maximums (Rumpf): $x = 0,592 \text{ m}$; $y = 0,380 \text{ m}$; $z = 0,830 \text{ m}$
Position des SAR_{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,200 \text{ m}$; $y = 0,188 \text{ m}$; $z = 0,572 \text{ m}$
 $\Delta MEG = 0,70 \text{ dB}$

NB-3-UMTS-Er-mitte



$SAR_{GK} = 31,7 \text{ } \mu\text{W/kg}$ (19% von Original)
 $SAR_{10g_{max}}^{\text{Rumpf}} = 1,30 \text{ mW/kg}$ (20% von Original)
 $SAR_{10g_{max}}^{\text{Gliedermaßen}} = 2,76 \text{ mW/kg}$ (13% von Original)
Position des SAR_{10g} -Maximums (Rumpf): $x = 0,612 \text{ m}$; $y = 0,314 \text{ m}$; $z = 1,220 \text{ m}$
Position des SAR_{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,388 \text{ m}$; $y = 0,360 \text{ m}$; $z = 0,948 \text{ m}$
 $\Delta MEG = 3,35 \text{ dB}$

NB-4-UMTS-Er-oben



$SAR_{GK} = 49,3 \mu W/kg$ (30% von Original)

$SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Rumpf) = 1,84 mW/kg (28% von Original)

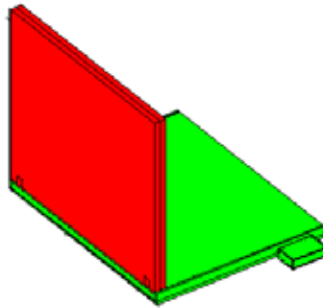
$SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Gliedermaßen) = 4,46 mW/kg (20% von Original)

Position des SAR_{10g}^{10g} -Maximums (Rumpf): $x = 0,580 \text{ m}$; $y = 0,314 \text{ m}$; $z = 1,292 \text{ m}$

Position des SAR_{10g}^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,380 \text{ m}$; $y = 0,360 \text{ m}$; $z = 0,940 \text{ m}$

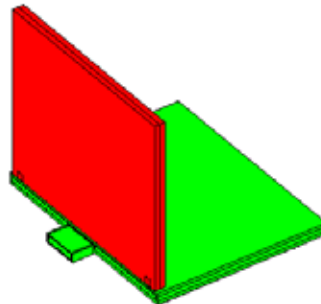
$\Delta MEG = 4,19 \text{ dB}$

NB-5-UMTS-Ju-Original



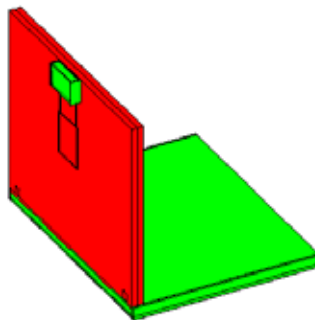
$SAR_{GK} = 250,3 \mu W/kg$ (100% von Original)
 $SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Rumpf) = 5,88 mW/kg (100% von Original)
 $SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Gliedermaßen) = 10,75 mW/kg (100% von Original)
Position des SAR^{10g} -Maximums (Rumpf): $x = 0,499 \text{ m}$; $y = 0,308 \text{ m}$; $z = 0,588 \text{ m}$
Position des SAR^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,368 \text{ m}$; $y = 0,322 \text{ m}$; $z = 0,675 \text{ m}$
MEG = - 13,59 dB

NB-6-UMTS-Ju-unten



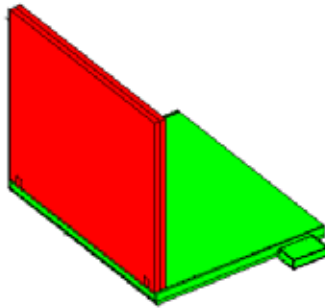
$SAR_{GK} = 203,9 \mu W/kg$ (81% von Original)
 $SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Rumpf) = 4,39 mW/kg (75% von Original)
 $SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Gliedermaßen) = 7,08 mW/kg (66% von Original)
Position des SAR^{10g} -Maximums (Rumpf): $x = 0,518 \text{ m}$; $y = 0,388 \text{ m}$; $z = 0,592 \text{ m}$
Position des SAR^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,219 \text{ m}$; $y = 0,435 \text{ m}$; $z = 0,416 \text{ m}$
 $\Delta MEG = 1,40 \text{ dB}$

NB-7-UMTS-Ju-Mitte



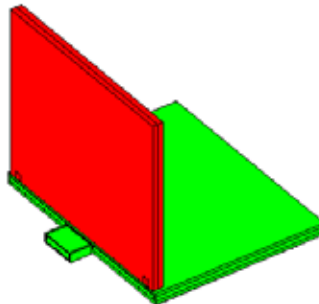
$SAR_{GK} = 50,3 \mu W/kg$ (20% von Original)
 $SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Rumpf) = 2,15 mW/kg (37% von Original)
 $SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Gliedermaßen) = 2,57 mW/kg (24% von Original)
Position des SAR^{10g} -Maximums (Rumpf): $x = 0,505 \text{ m}$; $y = 0,352 \text{ m}$; $z = 0,940 \text{ m}$
Position des SAR^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,341 \text{ m}$; $y = 0,408 \text{ m}$; $z = 0,661 \text{ m}$
 $\Delta MEG = 3,72 \text{ dB}$

NB-8-GPRS-Er-original



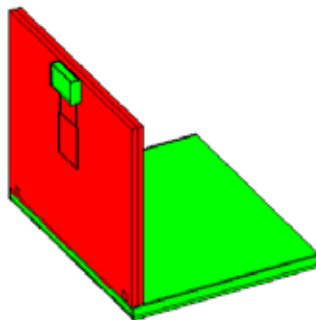
$SAR_{GK} = 261,9 \mu W/kg$ (100% von Original)
 $SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Rumpf) = $2,94 mW/kg$ (100% von Original)
 $SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Gliedermaßen) = $29,63 mW/kg$ (100% von Original)
Position des SAR^{10g} -Maximums (Rumpf): $x = 0,592 m$; $y = 0,356 m$; $z = 0,812 m$
Position des SAR^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,386 m$; $y = 0,264 m$; $z = 0,932 m$
MEG = - 8,93 dB

NB-9-GPRS-Er-unten



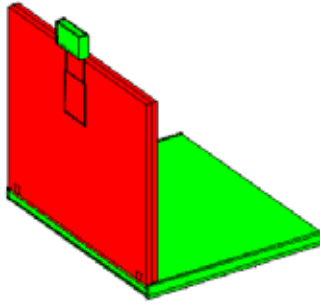
$SAR_{GK} = 196,1 \mu W/kg$ (75% von Original)
 $SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Rumpf) = $767 \mu W/kg$ (6% von Original)
 $SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Gliedermaßen) = $8,80 mW/kg$ (30% von Original)
Position des SAR^{10g} -Maximums (Rumpf): $x = 0,636 m$; $y = 0,311 m$; $z = 1,208 m$
Position des SAR^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,248 m$; $y = 0,224 m$; $z = 0,616 m$
 $\Delta MEG = -0,603 dB$

NB-10-GPRS-Er-mitte



$SAR_{GK} = 49,6 \mu W/kg$ (19% von Original)
 $SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Rumpf) = $405 \mu W/kg$ (14% von Original)
 $SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Gliedermaßen) = $4,92 mW/kg$ (17% von Original)
Position des SAR^{10g} -Maximums (Rumpf): $x = 0,640 m$; $y = 0,306 m$; $z = 1,200 m$
Position des SAR^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,372 m$; $y = 0,392 m$; $z = 0,932 m$
 $\Delta MEG = 0,184 dB$

NB-11-GPRS-Er-oben



$SAR_{GK} = 70,3 \mu W/kg$ (27% von Original)

$SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Rumpf) = $390 \mu W/kg$ (13% von Original)

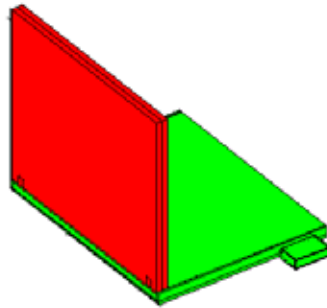
$SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Gliedermaßen) = $6,38 mW/kg$ (22% von Original)

Position des SAR^{10g} -Maximums (Rumpf): $x = 0,604 m$; $y = 0,282 m$; $z = 0,928 m$

Position des SAR^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,372 m$; $y = 0,400 m$; $z = 0,932 m$

$\Delta MEG = 0,935 dB$

NB-12-GPRS-Ju-Original



$SAR_{GK} = 450 \mu W/kg$ (100% von Original)

$SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Rumpf) = 2,19 mW/kg (100% von Original)

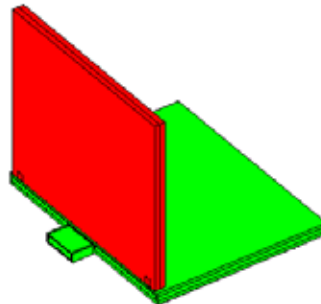
$SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Gliedermaßen) = 25,34 mW/kg (100% von Original)

Position des SAR^{10g} -Maximums (Rumpf): $x = 0,561 \text{ m}$; $y = 0,276 \text{ m}$; $z = 0,710 \text{ m}$

Position des SAR^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,397 \text{ m}$; $y = 0,273 \text{ m}$; $z = 0,681 \text{ m}$

MEG = - 9,762 dB

NB-13-GPRS-Ju-unten



$SAR_G = 310,3 \mu W/kg$ (69% von Original)

$SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Rumpf) = 1,07 mW/kg (49% von Original)

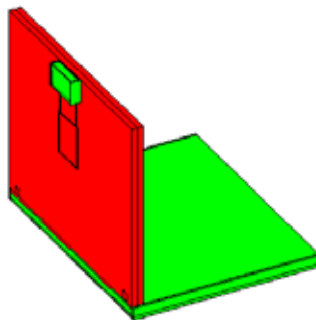
$SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Gliedermaßen) = 6,68 mW/kg (26% von Original)

Position des SAR^{10g} -Maximums (Rumpf): $x = 0,547 \text{ m}$; $y = 0,331 \text{ m}$; $z = 0,885 \text{ m}$

Position des SAR^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,262 \text{ m}$; $y = 0,244 \text{ m}$; $z = 0,396 \text{ m}$

$\Delta MEG = -0,972 \text{ dB}$

NB-14-GPRS-Ju-Mitte



$SAR_{GK} = 402 \mu W/kg$ (9% von Original)

$SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Rumpf) = 823 $\mu W/kg$ (38% von Original)

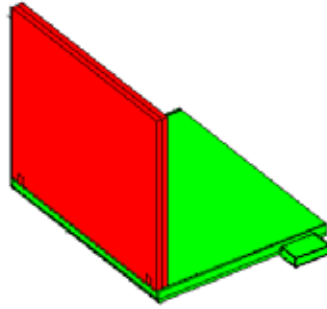
$SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Gliedermaßen) = 1,04 mW/kg (4% von Original)

Position des SAR^{10g} -Maximums (Rumpf): $x = 0,554 \text{ m}$; $y = 0,347 \text{ m}$; $z = 0,860 \text{ m}$

Position des SAR^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,429 \text{ m}$; $y = 0,460 \text{ m}$; $z = 0,638 \text{ m}$

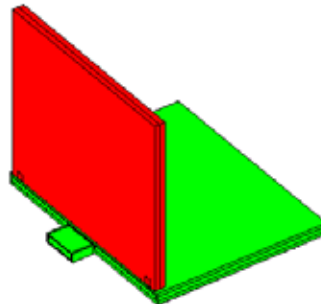
$\Delta MEG = 0,59 \text{ dB}$

NB-15-WLAN-Er-Original



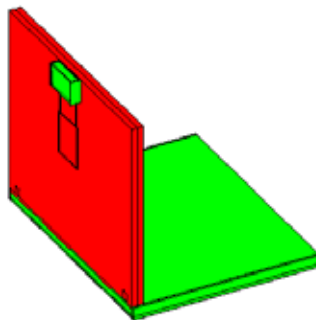
$SAR_{GK} = 156,9 \mu W/kg$ (100% von Original)
 $SAR_{10g_max}^{10g}$ (Rumpf) = $7,05 mW/kg$ (100% von Original)
 $SAR_{10g_max}^{10g}$ (Gliedermaßen) = $18,86 mW/kg$ (100% von Original)
Position des SAR^{10g} -Maximums (Rumpf): $x = 0,604 m$; $y = 0,208 m$; $z = 0,798 m$
Position des SAR^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,436 m$; $y = 0,188 m$; $z = 0,904 m$
MEG = - 13,32 dB

NB-16-WLAN-Er-unten



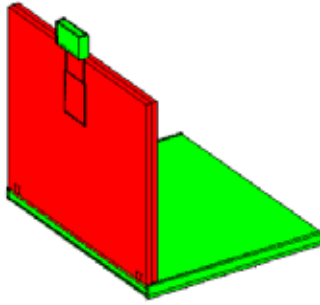
$SAR_{GK} = 51,1 \mu W/kg$ (33% von Original)
 $SAR_{10g_max}^{10g}$ (Rumpf) = $422 \mu W/kg$ (6% von Original)
 $SAR_{10g_max}^{10g}$ (Gliedermaßen) = $3,49 mW/kg$ (19% von Original)
Position des SAR^{10g} -Maximums (Rumpf): $x = 0,596 m$; $y = 0,212 m$; $z = 0,794 m$
Position des SAR^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,236 m$; $y = 0,196 m$; $z = 0,664 m$
 $\Delta MEG = 1,32 dB$

NB-17-WLAN-Er-mitte



$SAR_{GK} = 3,8 \mu W/kg$ (2,4% von Original)
 $SAR_{10g_max}^{10g}$ (Rumpf) = $148 \mu W/kg$ (2,1% von Original)
 $SAR_{10g_max}^{10g}$ (Gliedermaßen) = $275 \mu W/kg$ (1,5% von Original)
Position des SAR^{10g} -Maximums (Rumpf): $x = 0,580 m$; $y = 0,323 m$; $z = 1,288 m$
Position des SAR^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,364 m$; $y = 0,428 m$; $z = 0,916 m$
 $\Delta MEG = 4,87 dB$
starke Veränderung der Antennen-Eingangsimpedanz !

NB-18-WLAN-Er-oben



$SAR_{GK} = 37,3 \mu W/kg$ (24% von Original)

$SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Rumpf) = 1,59 mW/kg (23% von Original)

$SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Gliedermaßen) = 5,50 mW/kg (29% von Original)

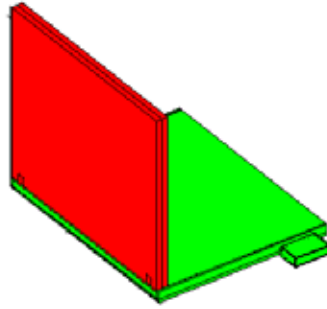
Position des SAR^{10g} -Maximums (Rumpf): $x = 0,580 \text{ m}$; $y = 0,319 \text{ m}$; $z = 1,292 \text{ m}$

Position des SAR^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,376 \text{ m}$; $y = 0,416 \text{ m}$; $z = 0,916 \text{ m}$

$\Delta MEG = 3,15 \text{ dB}$

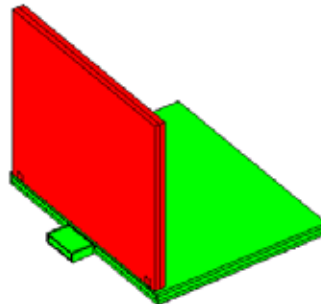
starke Veränderung der Antennen-Eingangsimpedanz !

NB-19-WLAN-Ju-Original



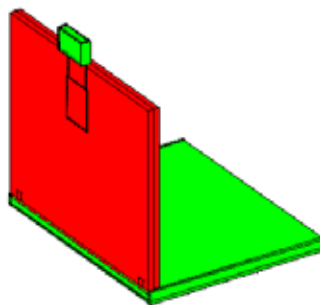
$SAR_{GK} = 281,6 \mu W/kg$ (100% von Original)
 $SAR_{10g_max}^{10g}$ (Rumpf) = $4,14 mW/kg$ (100% von Original)
 $SAR_{10g_max}^{10g}$ (Gliedermaßen) = $18,45 mW/kg$ (100% von Original)
Position des SAR^{10g} -Maximums (Rumpf): $x = 0,496 m$; $y = 0,311 m$; $z = 0,590 m$
Position des SAR^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,473 m$; $y = 0,197 m$; $z = 0,590 m$
MEG = -13,36 dB

NB-20-WLAN-Ju-unten



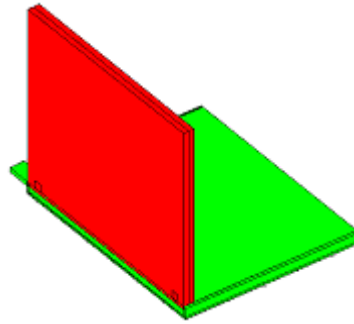
$SAR_{GK} = 65,5 \mu W/kg$ (23% von Original)
 $SAR_{10g_max}^{10g}$ (Rumpf) = $753,6 \mu W/kg$ (18% von Original)
 $SAR_{10g_max}^{10g}$ (Gliedermaßen) = $2,84 mW/kg$ (15% von Original)
Position des SAR^{10g} -Maximums (Rumpf): $x = 0,503 m$; $y = 0,272 m$; $z = 0,585 m$
Position des SAR^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,188 m$; $y = 0,232 m$; $z = 0,416 m$
 $\Delta MEG = 1,75 dB$

NB-21-WLAN-Ju-oben



$SAR_{GK} = 39,8 \mu W/kg$ (14% von Original)
 $SAR_{10g_max}^{10g}$ (Rumpf) = $2,34 mW/kg$ (56% von Original)
 $SAR_{10g_max}^{10g}$ (Gliedermaßen) = $3,00 mW/kg$ (16% von Original)
Position des SAR^{10g} -Maximums (Rumpf): $x = 0,507 m$; $y = 0,344 m$; $z = 0,944 m$
Position des SAR^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,362 m$; $y = 0,375 m$; $z = 0,685 m$
 $\Delta MEG = 4,21 dB$
starke Veränderung der Antennen-Eingangsimpedanz !

NB-22-BT-Er-Original



$SAR_{GK} = 125 \mu W/kg$ (100% von Original)

$SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Rumpf) = 4,10 mW/kg (100% von Original)

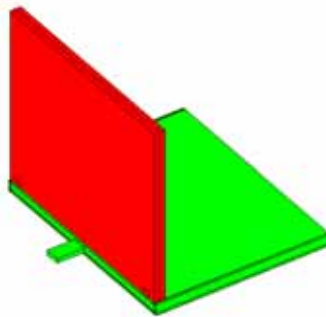
$SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Gliedermaßen) = 6,57 mW/kg (100% von Original)

Position des SAR_{10g}^{10g} -Maximums (Rumpf): $x = 0,556 \text{ m}$; $y = 0,360 \text{ m}$; $z = 0,800 \text{ m}$

Position des SAR_{10g}^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,232 \text{ m}$; $y = 0,432 \text{ m}$; $z = 0,644 \text{ m}$

MEG = - 13,51 dB

NB-23-BT-Er-unten



$SAR_{GK} = 132 \mu W/kg$ (106% von Original)

$SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Rumpf) = 4,98 mW/kg (121% von Original)

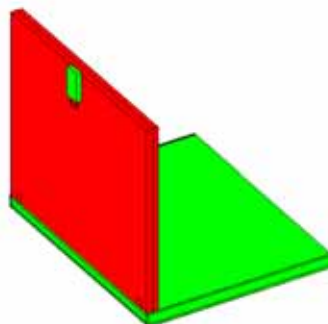
$SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Gliedermaßen) = 9,83 mW/kg (150% von Original)

Position des SAR_{10g}^{10g} -Maximums (Rumpf): $x = 0,568 \text{ m}$; $y = 0,388 \text{ m}$; $z = 0,852 \text{ m}$

Position des SAR_{10g}^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,364 \text{ m}$; $y = 0,420 \text{ m}$; $z = 0,916 \text{ m}$

$\Delta MEG = 2,66 \text{ dB}$

NB-24-BT-Er-Mitte



$SAR_{GK} = 14,7 \mu W/kg$ (12% von Original)

$SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Rumpf) = 824 $\mu W/kg$ (20% von Original)

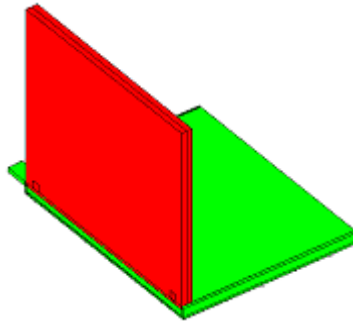
$SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Gliedermaßen) = 1,33 mW/kg (20% von Original)

Position des SAR_{10g}^{10g} -Maximums (Rumpf): $x = 0,580 \text{ m}$; $y = 0,308 \text{ m}$; $z = 1,280 \text{ m}$

Position des SAR_{10g}^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,384 \text{ m}$; $y = 0,356 \text{ m}$; $z = 0,956 \text{ m}$

MEG = 4,21 dB

NB-25-BT-Ju-Original



$SAR_{GK} = 297,6 \mu W/kg$ (100% von Original)

$SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Rumpf) = 8,28 mW/kg (100% von Original)

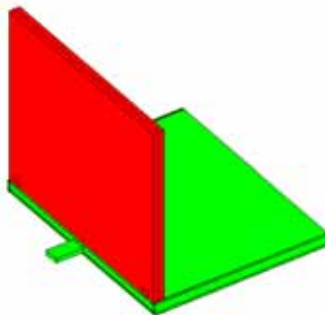
$SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Gliedermaßen) = 12,07 mW/kg (100% von Original)

Position des SAR^{10g} -Maximums (Rumpf): $x = 0,493 \text{ m}$; $y = 0,382 \text{ m}$; $z = 0,594 \text{ m}$

Position des SAR^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,359 \text{ m}$; $y = 0,323 \text{ m}$; $z = 0,667 \text{ m}$

MEG = -12,27 dB

NB-26-BT-Ju-unten



$SAR_{GK} = 274 \mu W/kg$ (92% von Original)

$SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Rumpf) = 7,02 mW/kg (85% von Original)

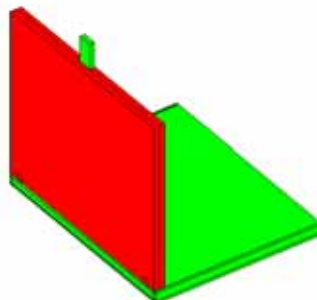
$SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Gliedermaßen) = 15,98 mW/kg (132% von Original)

Position des SAR^{10g} -Maximums (Rumpf): $x = 0,501 \text{ m}$; $y = 0,405 \text{ m}$; $z = 0,590 \text{ m}$

Position des SAR^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,478 \text{ m}$; $y = 0,478 \text{ m}$; $z = 0,594 \text{ m}$

$\Delta MEG = 0,93 \text{ dB}$

NB-27-BT-Ju-oben



$SAR_{GK} = 84,5 \mu W/kg$ (28% von Original)

$SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Rumpf) = 2,92 mW/kg (35% von Original)

$SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Gliedermaßen) = 11,52 mW/kg (95% von Original)

Position des SAR^{10g} -Maximums (Rumpf): $x = 0,505 \text{ m}$; $y = 0,346 \text{ m}$; $z = 0,949 \text{ m}$

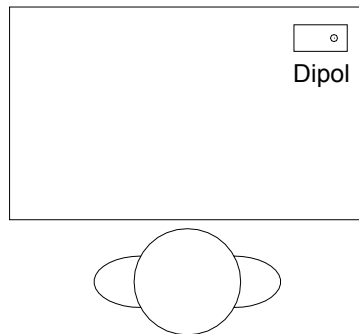
Position des SAR^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,365 \text{ m}$; $y = 0,372 \text{ m}$; $z = 0,686 \text{ m}$

$\Delta MEG = 2,16 \text{ dB}$

5.3.2 Endgerät 2: W-LAN-Router ($P_S = 100 \text{ mW}$); am Schreibtisch sitzende Person

Der zweite Teil des Katalogs bezieht sich auf Szenarien mit dem W-LAN-Router auf dem Schreibtisch, denen Konfigurationen in Anlehnung an Bild 7a bzw. Tabelle Vb (oben) zugrunde liegen.

Router-1-Er-Original



$SAR_{GK} = 43,5 \text{ } \mu\text{W/kg}$ (100% von Original)

$SAR_{10g_{max}}^{\text{Rumpf}} = 1,45 \text{ mW/kg}$ (100% von Original)

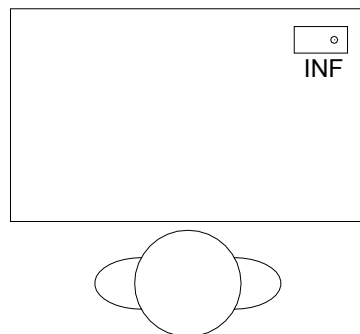
$SAR_{10g_{max}}^{\text{Gliedmaßen}} = 2,53 \text{ mW/kg}$ (100% von Original)

Position des SAR_{10g} -Maximums (Rumpf): $x = 0,572 \text{ m}$; $y = 0,396 \text{ m}$; $z = 0,768 \text{ m}$

Position des SAR_{10g} -Maximums (Gliedmaßen): $x = 0,564 \text{ m}$; $y = 0,516 \text{ m}$; $z = 0,821 \text{ m}$

MEG = -11,52 dB

Router-2-Er-INF



$SAR_{GK} = 30,2 \text{ } \mu\text{W/kg}$ (69% von Original)

$SAR_{10g_{max}}^{\text{Rumpf}} = 819 \text{ } \mu\text{W/kg}$ (56% von Original)

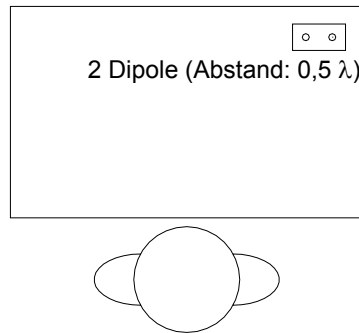
$SAR_{10g_{max}}^{\text{Gliedmaßen}} = 1,68 \text{ mW/kg}$ (67% von Original)

Position des SAR_{10g} -Maximums (Rumpf): $x = 0,572 \text{ m}$; $y = 0,396 \text{ m}$; $z = 0,768 \text{ m}$

Position des SAR_{10g} -Maximums (Gliedmaßen): $x = 0,576 \text{ m}$; $y = 0,524 \text{ m}$; $z = 0,792 \text{ m}$

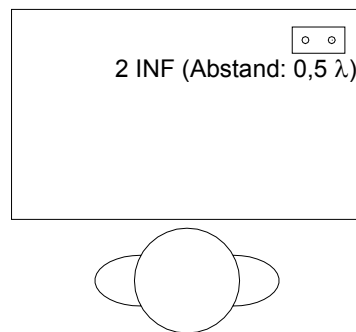
$\Delta\text{MEG} = 1,11 \text{ dB}$

Router-3-Er-2Dipole-halblambda



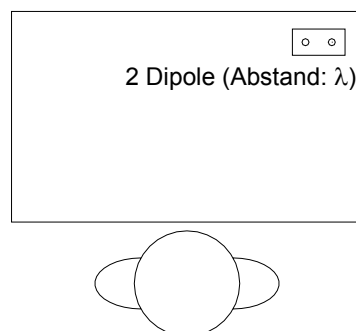
$SAR_{GK} = 24,5 \mu W/kg$ (56% von Original)
 $SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Rumpf) = $673 \mu W/kg$ (46% von Original)
 $SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Gliedermaßen) = $1,32 mW/kg$ (52% von Original)
Position des SAR_{10g}^{10g} -Maximums (Rumpf): $x = 0,680 m$; $y = 0,536 m$; $z = 0,996 m$
Position des SAR_{10g}^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,696 m$; $y = 0,580 m$; $z = 0,748 m$
 $\Delta MEG = -0,63 dB$

Router-4-Er-2INF-halblambda



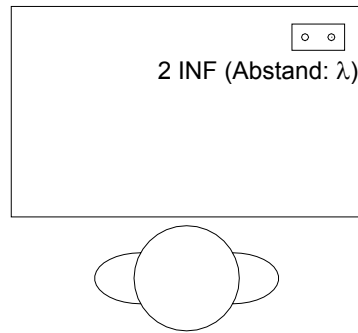
$SAR_{GK} = 21,4 \mu W/kg$ (49% von Original)
 $SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Rumpf) = $792 \mu W/kg$ (55% von Original)
 $SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Gliedermaßen) = $746 \mu W/kg$ (30% von Original)
Position des SAR_{10g}^{10g} -Maximums (Rumpf): $x = 0,716 m$; $y = 0,576 m$; $z = 0,880 m$
Position des SAR_{10g}^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,588 m$; $y = 0,560 m$; $z = 0,794 m$
 $\Delta MEG = -0,98 dB$

Router-5-Er-2Dipole-lambda



$SAR_{GK} = 28,1 \mu W/kg$ (65% von Original)
 $SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Rumpf) = $1,36 mW/kg$ (94% von Original)
 $SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Gliedermaßen) = $1,33 mW/kg$ (53% von Original)
Position des SAR_{10g}^{10g} -Maximums (Rumpf): $x = 0,556 m$; $y = 0,356 m$; $z = 0,780 m$
Position des SAR_{10g}^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,156 m$; $y = 0,468 m$; $z = 0,580 m$
 $\Delta MEG = -0,87 dB$

Router-6-Er-2INF-lambda



$SAR_{GK} = 18,3 \mu W/kg$ (42% von Original)

$SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Rumpf) = $368 \mu W/kg$ (25% von Original)

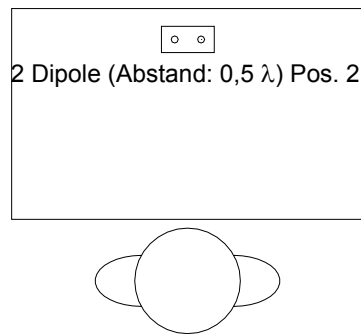
$SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Gliedermaßen) = $654 \mu W/kg$ (26% von Original)

Position des SAR^{10g} -Maximums (Rumpf): $x = 0,556 \text{ m}$; $y = 0,356 \text{ m}$; $z = 0,768 \text{ m}$

Position des SAR^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,368 \text{ m}$; $y = 0,432 \text{ m}$; $z = 0,920 \text{ m}$

$\Delta MEG = 1,67 \text{ dB}$

Router-7-Er-2Dipole-halblambda-Pos2



$SAR_{GK} = 94,6 \mu W/kg$ (217% von Original)

$SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Rumpf) = $2,43 \text{ mW/kg}$ (168% von Original)

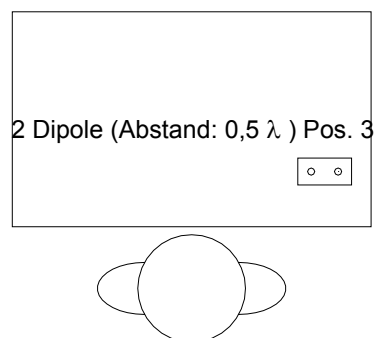
$SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Gliedermaßen) = $6,28 \text{ mW/kg}$ (248% von Original)

Position des SAR^{10g} -Maximums (Rumpf): $x = 0,552 \text{ m}$; $y = 0,316 \text{ m}$; $z = 0,772 \text{ m}$

Position des SAR^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,516 \text{ m}$; $y = 0,360 \text{ m}$; $z = 0,660 \text{ m}$

$\Delta MEG = -0,69 \text{ dB}$

Router-8-Er-2Dipole-halblambda-Pos3



$SAR_{GK} = 21,2 \mu W/kg$ (49% von Original)

$SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Rumpf) = $605 \mu W/kg$ (42% von Original)

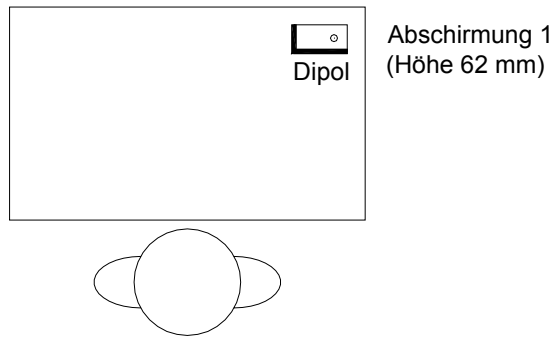
$SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Gliedermaßen) = $1,60 \text{ mW/kg}$ (64% von Original)

Position des SAR^{10g} -Maximums (Rumpf): $x = 0,676 \text{ m}$; $y = 0,532 \text{ m}$; $z = 1,008 \text{ m}$

Position des SAR^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,112 \text{ m}$; $y = 0,516 \text{ m}$; $z = 0,032 \text{ m}$

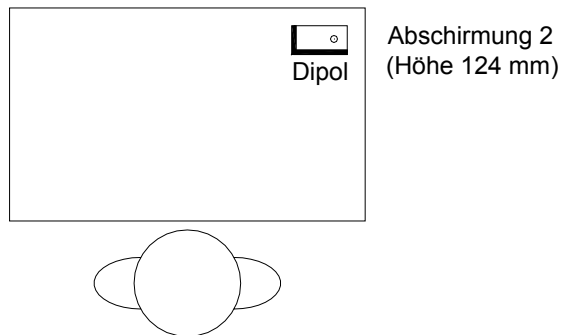
$\Delta MEG = -0,17 \text{ dB}$

Router-9-Er-Abschirmung1



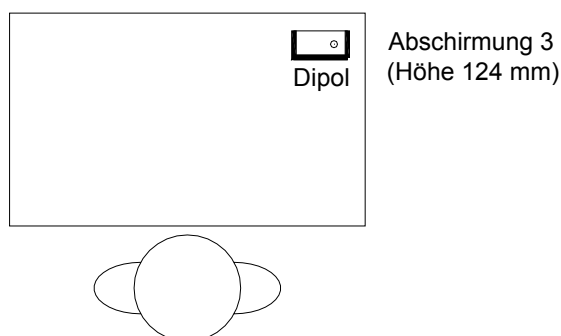
$SAR_{GK} = 34,9 \mu W/kg$ (80% von Original)
 $SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Rumpf) = 1,53 mW/kg (106% von Original)
 $SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Gliedermaßen) = 2,42 mW/kg (96% von Original)
Position des $SAR_{10g_{max}}^{10g}$ -Maximums (Rumpf): $x = 0,572 \text{ m}$; $y = 0,396 \text{ m}$; $z = 0,768 \text{ m}$
Position des $SAR_{10g_{max}}^{10g}$ -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,572 \text{ m}$; $y = 0,532 \text{ m}$; $z = 0,802 \text{ m}$
 $\Delta MEG = 0,49 \text{ dB}$

Router-10-Er-Abschirmung2



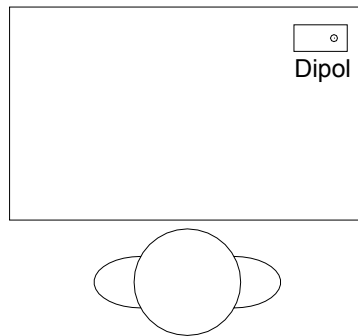
$SAR_{GK} = 35,2 \mu W/kg$ (81% von Original)
 $SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Rumpf) = 1,40 mW/kg (96% von Original)
 $SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Gliedermaßen) = 2,27 mW/kg (90% von Original)
Position des $SAR_{10g_{max}}^{10g}$ -Maximums (Rumpf): $x = 0,572 \text{ m}$; $y = 0,396 \text{ m}$; $z = 0,768 \text{ m}$
Position des $SAR_{10g_{max}}^{10g}$ -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,572 \text{ m}$; $y = 0,532 \text{ m}$; $z = 0,802 \text{ m}$
 $\Delta MEG = 0,76 \text{ dB}$

Router-11-Er-Abschirmung3



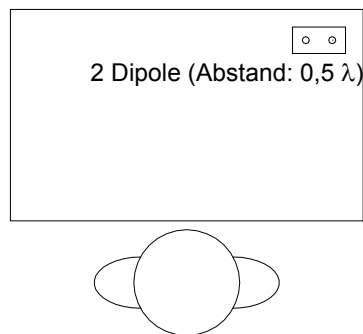
$SAR_{GK} = 30,0 \mu W/kg$ (69% von Original)
 $SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Rumpf) = 969 $\mu W/kg$ (67% von Original)
 $SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Gliedermaßen) = 1,34 mW/kg (53% von Original)
Position des $SAR_{10g_{max}}^{10g}$ -Maximums (Rumpf): $x = 0,572 \text{ m}$; $y = 0,396 \text{ m}$; $z = 0,768 \text{ m}$
Position des $SAR_{10g_{max}}^{10g}$ -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,564 \text{ m}$; $y = 0,516 \text{ m}$; $z = 0,821 \text{ m}$
 $\Delta MEG = 0,04 \text{ dB}$

Router-12-Ju-Original



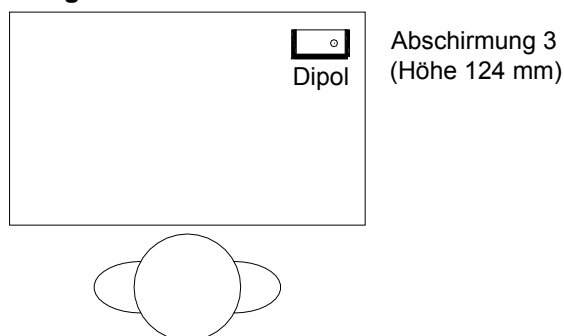
$SAR_{GK} = 76,7 \mu W/kg$ (100% von Original)
 $SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Rumpf) = 1,20 mW/kg (100% von Original)
 $SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Gliedermaßen) = 2,15 mW/kg (100% von Original)
Position des SAR^{10g} -Maximums (Rumpf): $x = 0,593 \text{ m}$; $y = 0,526 \text{ m}$; $z = 0,660 \text{ m}$
Position des SAR^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,464 \text{ m}$; $y = 0,488 \text{ m}$; $z = 0,602 \text{ m}$
 $\Delta MEG = -11,19 \text{ dB}$

Router-13-Ju-2Dipole-halblambda



$SAR_{GK} = 37,8 \mu W/kg$ (49% von Original)
 $SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Rumpf) = 652 $\mu W/kg$ (54% von Original)
 $SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Gliedermaßen) = 813 $\mu W/kg$ (38% von Original)
Position des SAR^{10g} -Maximums (Rumpf): $x = 0,599 \text{ m}$; $y = 0,518 \text{ m}$; $z = 0,708 \text{ m}$
Position des SAR^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,450 \text{ m}$; $y = 0,463 \text{ m}$; $z = 0,643 \text{ m}$
 $\Delta MEG = -0,54 \text{ dB}$

Router-14-Ju-Abschirmung3

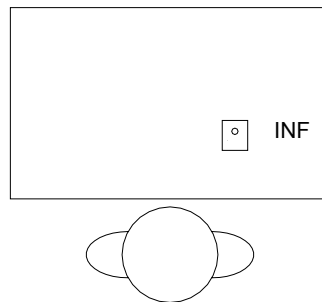


$SAR_{GK} = 49,4 \mu W/kg$ (64% von Original)
 $SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Rumpf) = 524 $\mu W/kg$ (44% von Original)
 $SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Gliedermaßen) = 1,11 mW/kg (52% von Original)
Position des SAR^{10g} -Maximums (Rumpf): $x = 0,476 \text{ m}$; $y = 0,386 \text{ m}$; $z = 0,581 \text{ m}$
Position des SAR^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,572 \text{ m}$; $y = 0,520 \text{ m}$; $z = 0,546 \text{ m}$
 $\Delta MEG = 1,46 \text{ dB}$

5.3.3 Endgerät 3: DECT-Basisstation ($P_S = 100 \text{ mW}$); am Schreibtisch sitzende Person

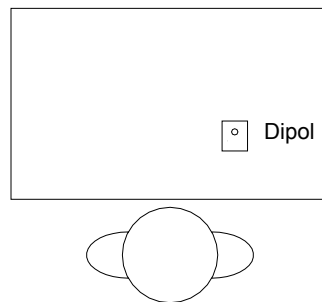
Der dritte Teil des Katalogs bezieht sich auf Szenarien mit der DECT-Basisstation auf dem Schreibtisch, denen Konfigurationen in Anlehnung an Bild 7a bzw. Tabelle Vb (unten) zugrunde liegen.

Dect-1-Er-Original



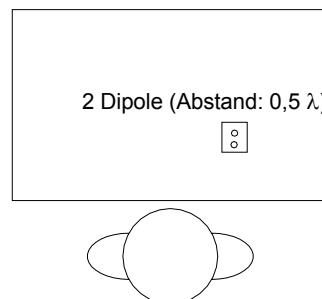
$SAR_{GK} = 136,1 \mu\text{W/kg}$ (100% von Original)
 $SAR_{10g_{max}}^{\text{Rumpf}} = 2,64 \text{ mW/kg}$ (100% von Original)
 $SAR_{10g_{max}}^{\text{Gliedermaßen}} = 11,69 \text{ mW/kg}$ (100% von Original)
Position des SAR^{10g} -Maximums (Rumpf): $x = 0,576 \text{ m}$; $y = 0,328 \text{ m}$; $z = 1,280 \text{ m}$
Position des SAR^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,276 \text{ m}$; $y = 0,452 \text{ m}$; $z = 0,656 \text{ m}$
 $\Delta\text{MEG} = -11,11 \text{ dB}$

Dect-2-Er-Dipol



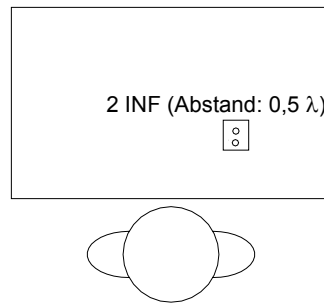
$SAR_{GK} = 94,3 \mu\text{W/kg}$ (69% von Original)
 $SAR_{10g_{max}}^{\text{Rumpf}} = 2,01 \text{ mW/kg}$ (76% von Original)
 $SAR_{10g_{max}}^{\text{Gliedermaßen}} = 4,81 \text{ mW/kg}$ (41% von Original)
Position des SAR^{10g} -Maximums (Rumpf): $x = 0,564 \text{ m}$; $y = 0,380 \text{ m}$; $z = 0,768 \text{ m}$
Position des SAR^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,516 \text{ m}$; $y = 0,360 \text{ m}$; $z = 0,648 \text{ m}$
 $\Delta\text{MEG} = 0,19 \text{ dB}$

Dect-3-Er-2Dipole-halblambda



$SAR_{GK} = 102,9 \mu\text{W/kg}$ (76% von Original)
 $SAR_{10g_{max}}^{\text{Rumpf}} = 550 \mu\text{W/kg}$ (21% von Original)
 $SAR_{10g_{max}}^{\text{Gliedermaßen}} = 7,59 \text{ mW/kg}$ (65% von Original)
Position des SAR^{10g} -Maximums (Rumpf): $x = 0,576 \text{ m}$; $y = 0,308 \text{ m}$; $z = 1,284 \text{ m}$
Position des SAR^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,260 \text{ m}$; $y = 0,420 \text{ m}$; $z = 0,656 \text{ m}$
 $\Delta\text{MEG} = -1,67 \text{ dB}$

Dect-4-Er-2INF-halblambda



$SAR_{GK} = 149,2 \mu\text{W/kg}$ (110% von Original)

$SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Rumpf) = $1,93 \text{ mW/kg}$ (73% von Original)

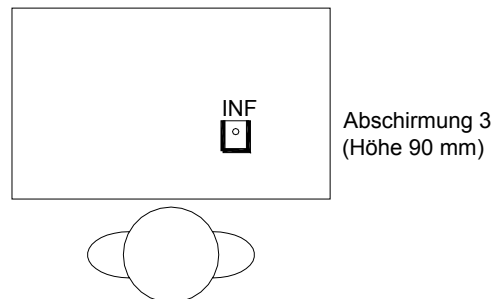
$SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Gliedermaßen) = $13,03 \text{ mW/kg}$ (112% von Original)

Position des SAR^{10g} -Maximums (Rumpf): $x = 0,576 \text{ m}$; $y = 0,328 \text{ m}$; $z = 1,284 \text{ m}$

Position des SAR^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,276 \text{ m}$; $y = 0,452 \text{ m}$; $z = 0,656 \text{ m}$

$\Delta\text{MEG} = -1,83 \text{ dB}$

Dect-5-Er-Abschirmung3



$SAR_{GK} = 45,6 \mu\text{W/kg}$ (33% von Original)

$SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Rumpf) = $942,9 \mu\text{W/kg}$ (36% von Original)

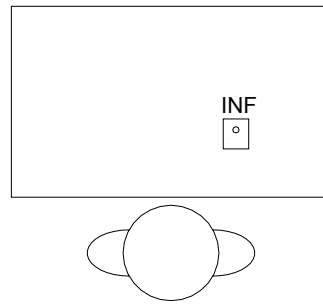
$SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Gliedermaßen) = $4,08 \text{ mW/kg}$ (35% von Original)

Position des SAR^{10g} -Maximums (Rumpf): $x = 0,576 \text{ m}$; $y = 0,328 \text{ m}$; $z = 1,280 \text{ m}$

Position des SAR^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,156 \text{ m}$; $y = 0,460 \text{ m}$; $z = 0,576 \text{ m}$

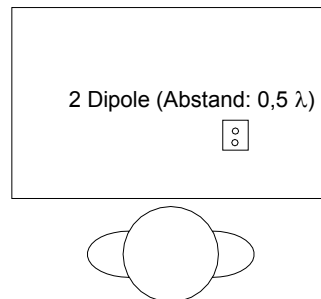
$\Delta\text{MEG} = -2,00 \text{ dB}$

Dect-6-Ju-Original



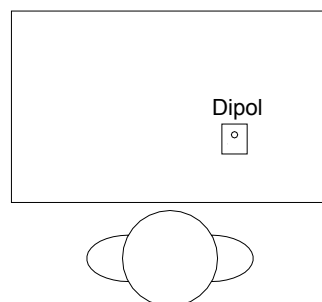
$SAR_{GK} = 276,6 \mu W/kg$ (100% von Original)
 $SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Rumpf) = $4,44 mW/kg$ (100% von Original)
 $SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Gliedermaßen) = $10,20 mW/kg$ (100% von Original)
Position des SAR^{10g} -Maximums (Rumpf): $x = 0,487 m$; $y = 0,341 m$; $z = 0,940 m$
Position des SAR^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,209 m$; $y = 0,422 m$; $z = 0,416 m$
 $MEG = -11,58 dB$

Dect-7-Ju-2Dipole-halblambda



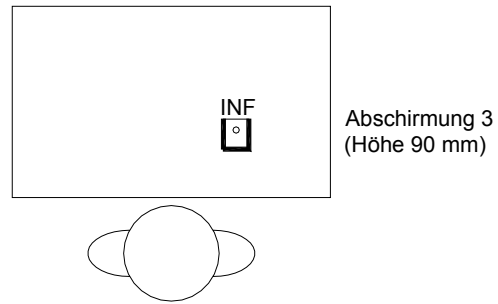
$SAR_{GK} = 183,4 \mu W/kg$ (66% von Original)
 $SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Rumpf) = $682,9 \mu W/kg$ (15% von Original)
 $SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Gliedermaßen) = $11,70 mW/kg$ (115% von Original)
Position des SAR^{10g} -Maximums (Rumpf): $x = 0,527 m$; $y = 0,291 m$; $z = 0,526 m$
Position des SAR^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,200 m$; $y = 0,399 m$; $z = 0,415 m$
 $\Delta MEG = -2,25 dB$

Dect-8-Ju-Dipol



$SAR_{GK} = 186,1 \mu W/kg$ (67% von Original)
 $SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Rumpf) = $1,68 mW/kg$ (38% von Original)
 $SAR_{10g_{max}}^{10g}$ (Gliedermaßen) = $4,55 mW/kg$ (45% von Original)
Position des SAR^{10g} -Maximums (Rumpf): $x = 0,475 m$; $y = 0,379 m$; $z = 0,518 m$
Position des SAR^{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,200 m$; $y = 0,402 m$; $z = 0,419 m$
 $\Delta MEG = 0,44 dB$

Dect-9-Ju-Abschirmung3



$SAR_{GK} = 100,4 \mu\text{W/kg}$ (36% von Original)

$SAR_{10g_{max}}^{\text{Rumpf}} = 672,3 \mu\text{W/kg}$ (15% von Original)

$SAR_{10g_{max}}^{\text{Gliedermaßen}} = 4,25 \text{ mW/kg}$ (42% von Original)

Position des SAR_{10g} -Maximums (Rumpf): $x = 0,592 \text{ m}$; $y = 0,527 \text{ m}$; $z = 0,634 \text{ m}$

Position des SAR_{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,296 \text{ m}$; $y = 0,454 \text{ m}$; $z = 0,466 \text{ m}$

$\Delta\text{MEG} = -1,88 \text{ dB}$

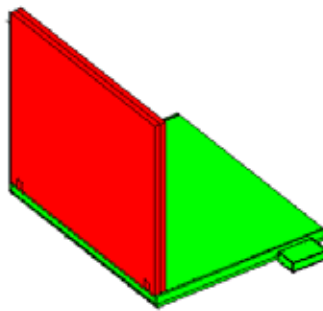
5.3.4 Endgerät 1: Notebook auf den Oberschenkeln; GPRS-Funkschnittstelle ($P_S = 960 \text{ mW}$)

Dieser vierte Teil des Katalogs enthält Ergebnisse von zusätzlich behandelten Szenarien mit dem Notebook auf den Oberschenkeln in Anlehnung an Bild 7b und die nachstehende Tabelle VI, um das Minimierungspotenzial für die als 'worst case' identifizierten GPRS-Expositionen darzustellen. Abweichend von den ersten drei Teilen des Katalogs wurde hier die theoretische Maximalleistung für den GPRS-Fall von 960 mW zugrunde gelegt.

Endgerät 1: Funkschnittstellen-Karte					
Szenario	System (f [MHz])	Sitzendes Personenmodell		Notebook auf den Oberschenkeln	
		Erwachsener	Jugendlicher	Original, Monitorwinkel 90°	Karte hinter Bildschirm (Mitte)
28	GPRS (900)	x		x	
29	GPRS (900)	x			x
30	GPRS (900)		x	x	
31	GPRS (900)		x		x

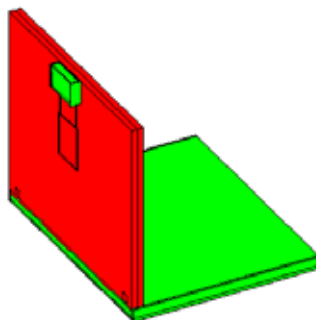
Tabelle VI: 'worst case'-Szenarien für Endgerät 1

NB-28-GPRS-Er-Knie-Original



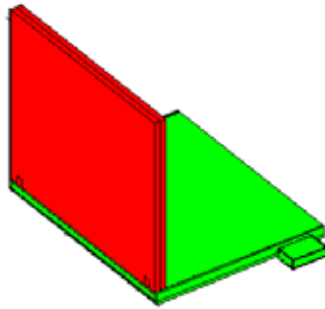
$SAR_{GK} = 6,2 \text{ mW/kg}$ (100% von Original; 7,7% vom Grenzwert)
 $SAR_{10g_{max}} \text{ (Rumpf)} = 37,3 \text{ mW/kg}$ (100% von Original; 1,9% vom Grenzwert)
 $SAR_{10g_{max}} \text{ (Gliedermaßen)} = 1,54 \text{ W/kg}$ (100% von Original; 38,5% vom Grenzwert)
 Position des SAR_{10g} -Maximums (Rumpf): $x = 0,644 \text{ m}$; $y = 0,228 \text{ m}$; $z = 0,681 \text{ m}$
 Position des SAR_{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,444 \text{ m}$; $y = 0,162 \text{ m}$; $z = 0,658 \text{ m}$
 $MEG = -8,78 \text{ dB}$

NB-29-GPRS-Er-Knie-mitte



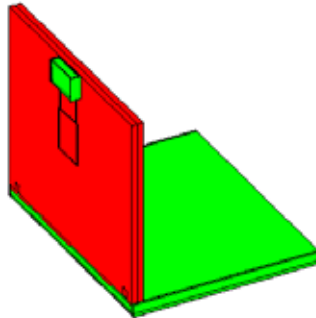
$SAR_{GK} = 1 \text{ mW/kg}$ (16,22% von Original; 1,3% vom Grenzwert)
 $SAR_{10g_{max}} \text{ (Rumpf)} = 5,79 \text{ mW/kg}$ (15% von Original; 0,3% vom Grenzwert)
 $SAR_{10g_{max}} \text{ (Gliedermaßen)} = 156 \text{ mW/kg}$ (10% von Original; 3,9% vom Grenzwert)
 Position des SAR_{10g} -Maximums (Rumpf): $x = 0,636 \text{ m}$; $y = 0,313 \text{ m}$; $z = 1,208 \text{ m}$
 Position des SAR_{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,412 \text{ m}$; $y = 0,436 \text{ m}$; $z = 0,933 \text{ m}$
 $\Delta MEG = 0,91 \text{ dB}$

NB-30-GPRS-Ju-Knie-Original



$SAR_{GK} = 10,2 \text{ mW/kg}$ (100% von Original; 12,8% vom Grenzwert)
 $SAR_{10g_{max}} \text{ (Rumpf)} = 53,02 \text{ mW/kg}$ (100% von Original; 2,7% vom Grenzwert)
 $SAR_{10g_{max}} \text{ (Gliedermaßen)} = 608 \text{ mW/kg}$ (100% von Original; 15,2% vom Grenzwert)
Position des SAR_{10g} -Maximums (Rumpf): $x = 0,560 \text{ m}$; $y = 0,269 \text{ m}$; $z = 0,543 \text{ m}$
Position des SAR_{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,419 \text{ m}$; $y = 0,240 \text{ m}$; $z = 0,466 \text{ m}$
MEG = -7,42 dB

NB-31-GPRS-Ju-Knie-mitte



$SAR_{GK} = 1,02 \text{ mW/kg}$ (10% von Original; 1,3% vom Grenzwert)
 $SAR_{10g_{max}} \text{ (Rumpf)} = 13,8 \text{ mW/kg}$ (26% von Original; 0,7% vom Grenzwert)
 $SAR_{10g_{max}} \text{ (Gliedermaßen)} = 69,8 \text{ mW/kg}$ (11% von Original; 1,7% vom Grenzwert)
Position des SAR_{10g} -Maximums (Rumpf): $x = 0,545 \text{ m}$; $y = 0,340 \text{ m}$; $z = 0,886 \text{ m}$
Position des SAR_{10g} -Maximums (Gliedermaßen): $x = 0,395 \text{ m}$; $y = 0,437 \text{ m}$; $z = 0,656 \text{ m}$
 $\Delta\text{MEG} = -0,83 \text{ dB}$

Ein Vergleich der Originalkonfigurationen mit den jeweils zugehörigen modifizierten Anordnungen zeigt, dass der Tendenz der Grenzwertannäherung von 38,5% für die Teilkörper-SAR beim Erwachsenen bzw. von 12,8% für die Ganzkörper-SAR beim Jugendlichen durch die einfache Verlagerung der PCMCIA-Karte auf die Rückseite des Displays effektiv entgegen gewirkt werden kann.

5.4 Fazit und Designkriterien zur Expositionsminimierung

Es ist offensichtlich, dass eine Reduzierung der Sendeleistung die SAR in direkt proportionaler Abhängigkeit verringern würde. Meist darf eine bestimmte Sendeleistung aber nicht unterschritten werden, um die Kommunikationseigenschaften der Funksysteme nicht zu verschlechtern. Allerdings belegen beispielsweise in [miniWatt II 2007] untersuchte Ansätze, konventionelle Systeme konsequent durch Implementierung verschiedener Techniken (MIMO-Systeme, Sendeleistungsregelung, Fehlerkodierung etc.) zu modernisieren, dass damit auch ohne Abstriche bei der Übertragungsqualität Leistungsabsenkungen teilweise um mehrere Größenordnungen erreichbar sein sollten.

Eine Verkleinerung der SAR durch Aufteilung der Gesamtleistung auf mehrere Antennen oder durch einen veränderten Abstand der Sendeantennen vom Menschen setzt eine genaue Kenntnis der Feldinterferenzen im Nahfeld voraus und ist im Fall von körpernahen Endgeräten wegen der engen Toleranzen für eine optimale Positionierung somit in der Regel nicht praktikabel. Grundsätzlich könnten weiter entfernte externe Antennen verwendet werden, bei denen die bekannten Fernfeld-Abstandsregeln anwendbar wären; die Geräte müssten dann aber über Kabel, die durch die Integration der Funk-Schnittstellen gerade vermieden werden sollten, mit den Endgeräten verbunden werden.

Wenn nach Ausschöpfung praktikabler Maßnahmen zur Leistungsminimierung und ggfs. zur Abstandsmaximierung weiterer Bedarf an Verringerung der SAR bestehen sollte, wäre eine effektive Möglichkeit, die Abstrahlung der Antenne selektiv in Richtung des Nutzers zu reduzieren, zum Beispiel durch eine gezielte Anpassung der Antennen-Richtcharakteristik oder durch partielle Abschirmung des Gerätes. Als Beispiel sei die in Abschnitt 5.2 diskutierte Verlagerung der PCMCIA-Schnittstelle auf die Rückseite des Notebook-Displays erwähnt. Daran zeigt sich, dass in günstigen Fällen durch konstruktive Maßnahmen eine Verminderung der SAR-Werte um mehr als 80% erreicht werden kann, ohne eine Verschlechterung des MEG in Kauf nehmen zu müssen.

Vor der Durchführung von Veränderungen zur Minimierung der SAR körpernaher Endgeräte sollte man aber berücksichtigen, dass die hier untersuchten, hinsichtlich Einsatzzweck, Frequenz und Sendeleistung repräsentativen Endgeräte SAR-Werte produzieren, die die anerkannten Grenzwerte in den meisten Fällen nur zu einem sehr geringen Prozentsatz ausschöpfen.

Insgesamt ist somit festzustellen, dass SAR reduzierende Maßnahmen voraussichtlich erst im Zusammenhang mit der Exposition durch multiple Quellen interessant werden könnten, zu denen dann auch körperferne und körperberührende Quellen gehören. Dabei erhält die Ganzkörper- gegenüber der Teilkörper-SAR nochmals größeres Gewicht, da eine Addition der SAR_{GK} -Werte immer, die Summierung der SAR^{10g}_{max} -Werte aber nur dann vorgenommen werden muss, wenn zufällig die durch verschiedene Quellen erzeugten Maxima am selben Ort im Körper auftreten. Ein entsprechendes Vorhaben wird ebenfalls im Rahmen des Deutschen Mobilfunk Forschungsprogramms bearbeitet [BfS 2006].

Zusammenfassung

Dieses Forschungsvorhaben befasste sich mit Endgeräten mobiler Kommunikationssysteme, die typischerweise in Abständen von Zentimetern bis Dezimetern zum menschlichen Körper betrieben werden, d.h. weder in unmittelbarem Kontakt (wie z.B. das Handy am Ohr) noch weit entfernt (wie z.B. der Zentral-Router eines Funk-Netzwerks). Ziel des Projektes war die Bestimmung der Exposition eines Nutzers durch die von derartigen Endgeräten ausgehenden elektromagnetischen Felder. Als Kriterium für die Exposition wurden die Spezifischen Absorptionsraten (SAR, unterschieden nach Ganzkörper- und maximaler Teilkörper-SAR) herangezogen. Davon ausgehend wurde untersucht, welches Minimierungspotenzial sich für die Spezifische Absorptionsrate durch Modifizierung der Endgeräte, insbesondere durch Variation der Antennenposition und -geometrie, bietet, ohne dass die Kommunikationseigenschaften eingeschränkt werden.

Auf der Basis einer Marktrecherche wurden anhand der Kriterien „weite Verbreitung“, „lange Benutzungszeiten“ und „möglichst hohe Ausgangsleistung“ repräsentative Endgeräte für die Untersuchungen ausgewählt: Ein Notebook mit PCMCIA-Funkschnittstelle (GPRS-, UMTS- und W-LAN-Betriebsart) und Bluetooth-USB-Adapter, ein W-LAN-Router und eine Basisstation für ein DECT-Schnurlostelefon.

Um die Feld- bzw. SAR-Verteilungen innerhalb des menschlichen Körpers zu ermitteln, wurden – auf der Grundlage ausgereifter Feldlöser der Elektrodynamik und unter Verwendung von insgesamt 4 anatomisch detaillierten 3D-Computermodellen für den Menschen und von 3 hoch aufgelösten Nachbildungen der technischen Geräte mit insgesamt 6 Sendeantennen – numerische Simulationsrechnungen durchgeführt. Es kam die Methode der Finiten Differenzen im Zeitbereich (FDTD), umgesetzt in einen eigenen parallelisierten Programmcode, zur Anwendung. Zur Validierung der Rechenmodelle für die Endgeräte wurden die ohne Anwesenheit eines Menschmodells numerisch berechneten Abstrahlcharakteristika mit gemessenen Richtdiagrammen der Original-Geräte verglichen. Die Übereinstimmung zwischen den numerischen Rechenergebnissen und den Messdaten kann als äußerst zufrieden stellend bezeichnet werden.

Für die Einzelfallrechnungen wurden 46 verschiedene Konfigurationen betrachtet, die einen realistischen Einsatz der Endgeräte im Wohn- oder Arbeitsumfeld widerspiegeln. Darunter ist beispielsweise die Positionierung der Geräte in Bezug auf den Benutzer zu verstehen, aber auch die Körperhaltung der Person sowie die nähere Umgebung, in die das Szenario "Mensch - Endgerät" eingebettet ist.

Darüber hinaus wurden weitere 45 Szenarien mit veränderten Antennenpositionen oder -formen, Mehrfachantennensystemen und modifizierten Gerätetopologien hinsichtlich der SAR-Veränderung gegenüber den ursprünglichen Anordnungen untersucht. Als Kriterium für die System-Übertragungsqualität wurde der 'mean effective gain' (MEG) herangezogen.

Dabei erwies sich im Falle des Notebooks die Ausnutzung der Abschirmwirkung des Bildschirms nach Verlagerung der Funkschnittstellen auf dessen Rückseite als besonders günstig. Die Ergebnisse der Berechnungen zeigen, dass eine Verminderung der Ganzkörper-SAR um mehr als 80% erreicht werden kann, ohne eine Verschlechterung des MEG in Kauf nehmen zu müssen. Dagegen scheidet die Möglichkeit einer Verkleinerung der SAR durch Aufteilung der Gesamtleistung auf mehrere Antennen wegen der dadurch bedingten Feldinterferenzen im Nahfeld und der engen Toleranzen für eine optimale Positionierung der körpernahen Endgeräte in der Regel aus, es sei denn, dass durch den zusätzlichen Einsatz von MIMO-Technologien auf der Systemseite eine Absenkung des generellen Leistungsniveaus erreicht wird.

Weniger lageempfindlich ist die Verwendung einer dreiseitigen metallischen Abschirmung der Gehäuse von W-LAN-Router bzw. DECT-Basisstation, die Reduzierungen der Ganzkörper-SAR um ca. 30% bzw. 67% zur Folge hatte.

Am Vergleich der absoluten SAR-Werte wird offensichtlich, dass die hier untersuchten Endgeräte die anerkannten Grenzwerte in den meisten Fällen nur zu einem sehr geringen Prozentsatz ausschöpfen. Grenzwertüberschreitungen wurden in keinem Fall beobachtet. Selbst bei den ungünstigsten der untersuchten Szenarien (Notebook im GPRS-Modus auf den Oberschenkeln des Nutzers), bei denen die theoretische Maximalleistung von 960 mW im zeitlichen Mittel zugrunde gelegt und keine SAR-Minimierung vorgenommen wurde, ergaben sich mit maximalen Ausschöpfungen von ca. 11% hinsichtlich der Ganzkörper-SAR (beim Jugendlichen) und ca. 37% hinsichtlich der Teilkörper-SAR (beim Erwachsenen) keine kritischen Annäherungen an die Grenzwerte.

Insgesamt kann daraus geschlossen werden, dass Modifikationen zur Minimierung der SAR körpernaher Endgeräte voraussichtlich nur in Einzelfällen bzw. für Expositionssituationen mit multiplen Quellen zweckmäßig sein könnten.

Summary

This research project dealt with terminals of mobile communication systems being operated at distances of centimetres to decimetres from the human body, i.e. neither in body contact (as e.g. a mobile phone at the ear) nor far away (as e.g. the central router of a wireless network). The goal of the project was the determination of the user's exposure to electromagnetic fields originating from such devices, whereby the exposure was expressed by means of the specific absorption rate (SAR, distinguished between whole-body and maximum localized SAR). Furthermore it was examined, which potential for minimizing the SAR is offered by modifications of the devices, especially by changes of the antennas' positions and geometries, but without diminishing the communication characteristics of the devices.

Based on a market survey with priority put on the features 'wide-spread use', 'long-term utilization' and 'high transmitting power' the following representative devices were chosen for the investigations: A notebook with PCMCIA card (UMTS, GPRS and WLAN operation modes) and with Bluetooth USB adapter, a WLAN router, and a DECT cordless phone base station.

The field and SAR distributions within the human body were found by numerical simulations applying the finite difference time domain method (FDTD) in a parallelized version and using 4 anatomical 3D computer models for the human body and 3 highly-resolved models for the above mentioned original devices with all in all 6 different transmit antennas. In order to validate the computer models for the terminals the simulated radiation characteristics were compared with the measured radiation patterns. The agreement between theory and practice is most satisfactory.

For the SAR computations 46 particular cases were considered reflecting realistic applications of the devices in home and office. This implies the location of the terminals with regard to the user, but as well the posture of the person and the environment into which the 'human – device' scenario is embedded. Moreover, 45 additional scenarios with changed antenna positions and geometries, with multi-antenna systems and with modified topologies of the devices were investigated aiming at the identification of SAR changes as compared to the original cases. As a criterion for the system's quality of communication the mean effective gain (MEG) was used.

For the case of the notebook it turned out that the effect of shielding after relocating the PCMCIA card to the rear side of the monitor is very beneficial. The obtained results confirm that a reduction of the whole-body SAR by more than 80% is possible without deterioration of the MEG. In contrast, minimizing the SAR by distributing the total power to multiple antennas seems to be unfavourable since - due to field interference effects in the near-field - the tolerances for the optimum position of the terminals are very small. Yet, this is no hindrance for achieving a reduction of SAR by additional use of MIMO technologies which allow an overall decrease of the power levels. The use of a three sided metallic shielding of the housings of the W-LAN router and of the DECT base station proved to be less position-sensitive yielding decreases of the whole-body SAR values of up to 31% and 67%, respectively.

A comparison of the absolute SAR values shows that the terminals mostly produce SAR values which exploit only a very low percentage of the acknowledged basic restrictions. An exceedance of the recommended limits could not be observed. Even for the most disadvantageous scenarios, namely the notebook with the PCMCIA card upon the thigh of the user at the highest average transmit power of 960 mW for GPRS mode and without SAR minimization, no critical approach of the limits occurred. The consumptions amounted to 11% of the limits for the whole-body SAR of the adolescent and to approx. 37% for the maximum of the localized SAR of the adult.

Altogether it can be concluded that modifying commercially available mobile communication terminals, which are typically operated near the human body, with the objective of minimizing the SAR is presumably only purposive for particular cases or for exposure situations involving multiple sources.

Literatur

- Alaydrus, M.: Hybridmethode zur Lösung komplexer elektromagnetischer Feldprobleme : Kombination der Finite-Elemente-Methode, eines Integralgleichungsverfahrens und der Vereinheitlichten Geometrischen Beugungstheorie. Dissertation, Bergische Universität Wuppertal, 2001.
- Alaydrus, M., Becker, A., Hansen, V., Streckert, J.: Analysis of scattering and antenna problems involving complex composite radiating structures using combination of FE/BE hybrid method and PO. URSI Int. Symp. on Electromagnetic Theory, Victoria, Canada, 2001, 4-6.
- Alaydrus, M., Hansen, V., Eibert, T. F.: Hybrid⁽²⁾: Combining the three-dimensional hybrid finite element-boundary integral technique for planar multilayered media with the uniform geometrical theory of diffraction. IEEE Trans. AP-50, No. 1, 2002, 67-74.
- Becker, A.: Zeitbereichs-Hybridmethoden zur Lösung komplexer transientser elektromagnetischer Feldprobleme - Kombination eines Integralgleichungsverfahrens mit der Vereinheitlichten Geometrischen Beugungstheorie und der Finiten Differenzen Methode. Dissertation, Bergische Universität Wuppertal, 2006.
- Berenger, J.-P.: A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves. Journal of Computational Physics, 114, 1994, 185-200.
- Berenger, J.-P.: Three-dimensional perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves. Journal of Computational Physics, 127, 1996, 363-379.
- Bernardi, P, Cavagnaro, M., Pisa, S., Piuze, E.: Specific absorption rate and temperature elevation in a subject exposed in the far-field of radio-frequency sources operating in the 10-900-MHz range. IEEE Trans. Biomedical Engin., 50, 2003, 295-304.
- BfS: Entwicklung eines praktikablen rechentechnischen Verfahrens zur Ermittlung der tatsächlichen Exposition in komplizierten Immissionsszenarien mit mehreren verschiedenartigen HF-Quellen. Forschungsvorhaben im Rahmen des Deutschen Mobilfunk Forschungsprogramms, Dezember 2006.
http://www.emf-forschungsprogramm.de/forschung/dosimetrie/dosimetrie_verg/dosi_090.html
- Bitz, A., Alaydrus, M., Streckert, J., Hansen, V.: Combination of the Hybrid⁽²⁾-method and the FDTD-method for solution of boundary value problems with electrically large and high-resolution bodies. IEEE, AP-S Intern. Symp. San Antonio, Texas, 2002, vol. III, 278-281.
- Bitz, A.: Numerische Feldberechnung im biologischen Gewebe: Exposition von Personen, Tieren und isolierten biologischen Systemen in elektromagnetischen Feldern. Dissertation, Bergische Universität Wuppertal, 2004.
- BNetzA: Die Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen.
<http://www.bundesnetzagentur.de/enid/2.html>
- Braess, D.: Finite Elemente. Springer Verlag, Berlin, 1992.
- Christ, A., Klingeböck, A., Kuster, N.: Exposition durch körpernahe Sender im Rumpfbereich. Arbeitspaket 1: Bestandsaufnahme. Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben im Rahmen des Deutschen Mobilfunk Forschungsprogramms, Dezember 2004.
http://www.emf-forschungsprogramm.de/forschung/dosimetrie/dosimetrie_abges/dosi_055_ZwB_01.pdf
- Christ, A., Klingeböck, A., Samaras, T., Neufeld, E., Kuster, N.: Exposition durch körpernahe Sender im Rumpfbereich. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben im Rahmen des Deutschen Mobilfunk Forschungsprogramms, Juli 2006.
http://www.emf-forschungsprogramm.de/forschung/dosimetrie/dosimetrie_abges/dosi_055_AB.pdf
- Christopoulos, C.: The Transmission-Line Modeling Method TLM. IEEE Press, Series on Electromagnetic Wave Theory, New York, 1995.
- CST GmbH: MICROWAVE STUDIO™ Version 2006B, Darmstadt, 2006.

- DIN: Grundnorm für die Berechnung und Messung der Exposition von Personen gegenüber elektromagnetischen Feldern durch Mobilfunk-Basisstationen und stationäre Teilnehmergeräte von schnurlosen Telekommunikationsanlagen (110 MHz bis 40 GHz). Deutsche Fassung prEN 50383:2001, Entwurf September 2002.
- DIN: Bewertung von elektrischen und elektronischen Einrichtungen in Bezug auf Begrenzungen der Exposition von Personen in elektromagnetischen Feldern (0 Hz bis 300 GHz). Deutsche Fassung prEN 62311:2006, Entwurf Februar 2007.
- Donderici, B., Teixeira, F. L.: Improved FDTD subgridding algorithms via digital filtering and domain overriding. *IEEE Trans. AP-53*, No. 9, 2005, 2938-2951.
- Eibert, T. F.: Verknüpfung der Methode der Finiten Elemente mit einem Integralgleichungsverfahren für ebene geschichtete Strukturen. Dissertation, Bergische Universität Wuppertal, 1997.
- Green, B. M., Jensen, M. A.: Diversity Performance of Dual-Antenna Handsets Near Operator Tissue. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 48, 2000, 1017-1024.
- Harrington, R. F.: *Field Computation by Moment Methods*. MacMillan, New York, 1968.
- ICNIRP: Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Physics*, vol. 74, 1998, 494-522.
- Jin, J.: *The Finite Element Method in Electromagnetics*. John Wiley & Sons, New York, 1993.
- Kotyrbá, G.: Anwendung des MIMO-Prinzips bei Mikrowellensensoren für Abbildung und Positionierung. Dissertation, Bergische Universität Wuppertal, 2007.
- Kunz, K. S., Luebbers, R. J.: *The Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics*. CRC Press, Boca Raton, 1993.
- Lee, J., Buris, N.: Solving Maxwell's equations by Edge Elements Time Domain Methods. *IEEE AP-S Intern. Symp. Seattle, Washington*, 1994, 1756-1759.
- Marrocco, G., Sabbadini, M., Bardati, F.: FDTD improvement by dielectric subgrid resolution. *IEEE Trans. MTT-46*, No. 1, 1998, 2166-2169.
- Mayer, F., Schuhmann, R., Weiland, T.: Flexible subgrids in FDTD calculations. *IEEE, AP-S Intern. Symp. San Antonio, Texas*, 2002, vol. III, 252-255.
- Maxwell, J. C.: *A Treatise on Electricity and Magnetism*. Clarendon Press, Oxford, 1873.
- Meyer, F. J. C., Davidson, D. B., Jakobus, U., Stuchly, M. A.: Human exposure assessment in the near field of GSM base-station antennas using a hybrid finite element/method of moments technique. *IEEE Trans. Biomedical Engineering*, 50, No. 2, 2003, 224-233.
- miniWatt II: Minimierung der Immission künftiger Funkdienste (miniWatt II-technischer Teil), BMBF-Vorhaben 01 BU 550 vom 01.04.2005 bis 31.03.2007.
- Mitra, R. (Ed.): *Computer Techniques for Electromagnetics*, Pergamon Press, Oxford, New York, 1973. Revised: Hemisphere Publishing Corporation, Washington, New York, London, 1987.
- Monzon, J. C.: On surface integral representations: validity of Huygens' principle and the equivalence principle in inhomogeneous bianisotropic media. *IEEE Trans. MTT-41*, No. 11, 1993, 1995-2001.
- Nagaoka, T., Watanabe, So., Sakurai, K., Kunieda, E., Watanabe, Sa., Taki, M., Yamanaka, Y.: Development of realistic high-resolution whole-body voxel models of Japanese adult males and females of average height and weight, and application of models to radio-frequency electromagnetic-field dosimetry. *Phys. Med. Biol.*, vol. 49, 2004, 1-15.
- National Library of Medicine: Visible Human Project, 1986.
http://www.nlm.nih.gov/research/visible/visible_human.html

- Paulraj, A., Nabar, R., Gore, D.: Introduction to Space-Time Wireless Communications. Cambridge University Press, Cambridge 2003.
- Railton, C. J., Schneider, J. B.: An analytical and numerical analysis of several locally conformal FDTD schemes. IEEE Trans. MTT-47, No. 1, 1999, 56-66.
- Schmid, G., Lager, D., Preiner, P., Überbacher, R., Neubauer, G., Cecil, S.: Bestimmung der Exposition bei Verwendung kabelloser Übermittlungsverfahren in Haushalt und Büro. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben im Rahmen des Deutschen Mobilfunk Forschungsprogramms, Juli 2005.
http://www.emf-forschungsprogramm.de/forschung/dosimetrie/dosimetrie_abges/dosi_030_AB.pdf
- Silvester, P. P., Ferrari, R. L.: Finite Elements for Electrical Engineers. 2nd edition, Cambridge University Press, Cambridge, 1990.
- Spitzer, V., Ackerman, M.J., Scherzinger, A.L., Whitlock, D.: The Visible Human Male: A technical report. J. Am. Med. Informatics Assoc., vol. 3, 1996, 118-130.
- Stratton, J. A.; Electromagnetic Theory. IEEE Press, Series on Electromagnetic Wave Theory, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2007.
- Taflove, A.: Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method. Artech House, Norwood, MA, 1995.
- Taflove, A., Hagness, S.C.: Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method. 3rd ed., Artech House, Norwood, MA, 2005.
- Taga, T.: Analysis for mean effective gain of mobile antennas in land mobile radio environments. IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 39, No. 2, 1990, 117 – 131.
- Tzoulis, A., Eibert, T.: A hybrid FE/BI-MLFMM-UTD method for numerical solutions of electromagnetic problems including arbitrarily shaped and electrically large objects. IEEE Trans. AP-53, No. 10, 2005, 3358-3366.
- Weiland, T.: Time domain electromagnetic field computation with Finite Difference Methods. Int. J. Numerical Modelling, 9, 1996, 259-319.

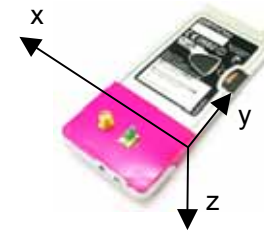
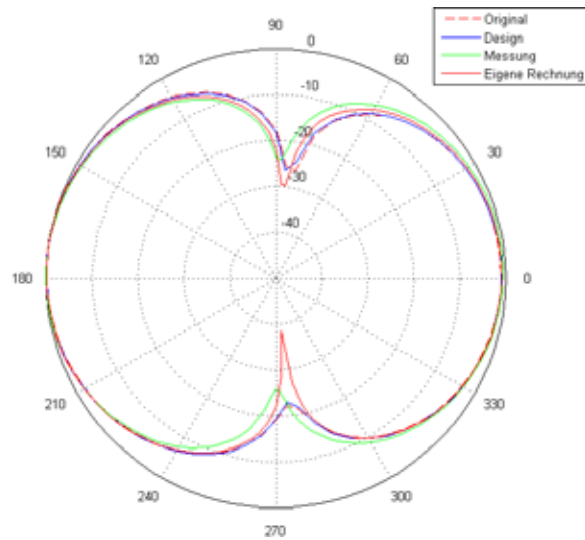
Anhang zum Abschlussbericht

**Untersuchung des Einflusses von Antennen- und Gerätetopologien
von körpernah betriebenen drahtlosen Kommunikationsendgeräten
auf die von diesen verursachten SAR-Werte**

- A) Mess- und Berechnungsergebnisse für Richtdiagramme der Endgeräte
- B) Tabellen der für die Berechnungen verwendeten Materialdaten ϵ_r , κ , ρ
der biologischen Gewebe und der technischen Bauelemente

Mess- und Berechnungsergebnisse für Richtdiagramme der Endgeräte

PCMCIA-Karte:



Bezugskoordinatensystem

Bild 1: Frequenz 900 MHz: Horizontales Richtdiagramm bei $\vartheta = 90^\circ$ für horizontale Polarisation

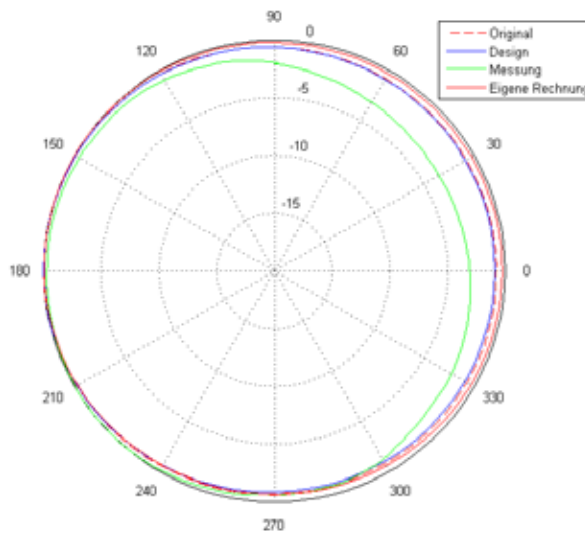


Bild 2: Frequenz 900 MHz: Horizontales Richtdiagramm bei $\vartheta = 90^\circ$ für vertikale Polarisation

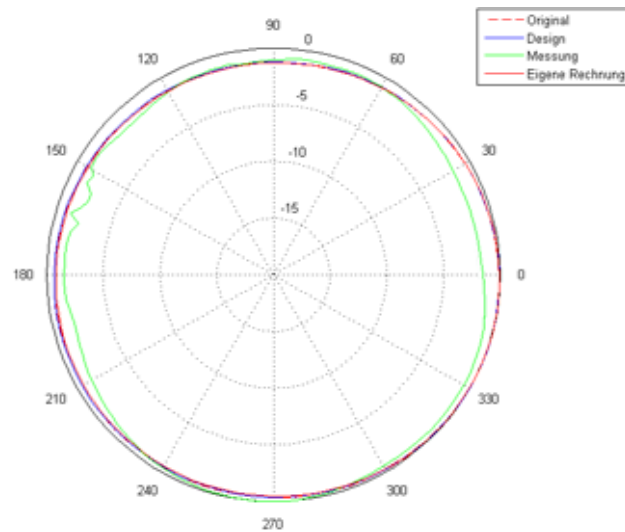


Bild 3: Frequenz 900 MHz: Horizontales Richtdiagramm bei $\varphi = 0^\circ$ für horizontale Polarisation

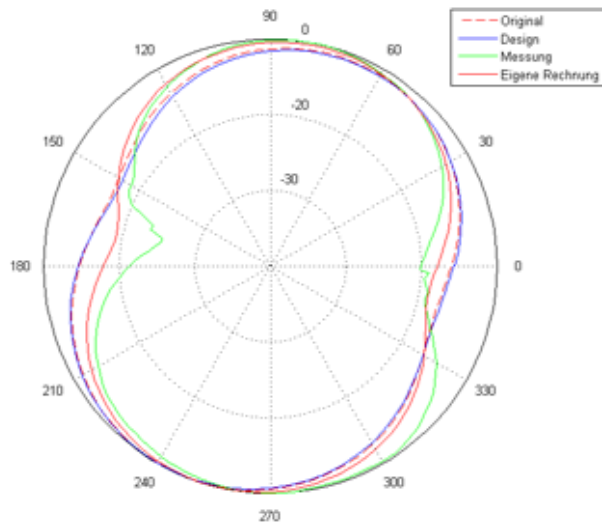


Bild 4: Frequenz 900 MHz: Horizontales Richtdiagramm bei $\varphi = 0^\circ$ für vertikale Polarisation

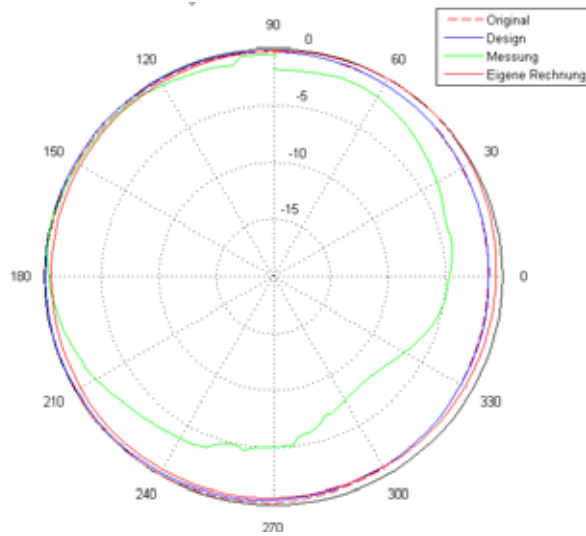


Bild 5: Frequenz 1800 MHz: Horizontales Richtdiagramm bei $\vartheta = 90^\circ$ für horizontale Polarisation

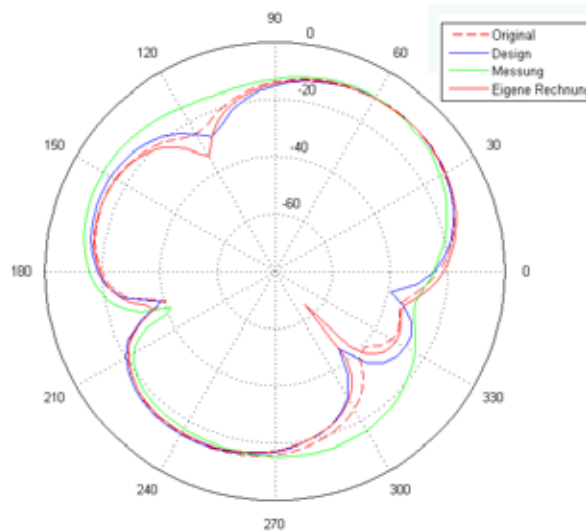


Bild 6: Frequenz 1800 MHz: Horizontales Richtdiagramm bei $\vartheta = 90^\circ$ für vertikale Polarisation

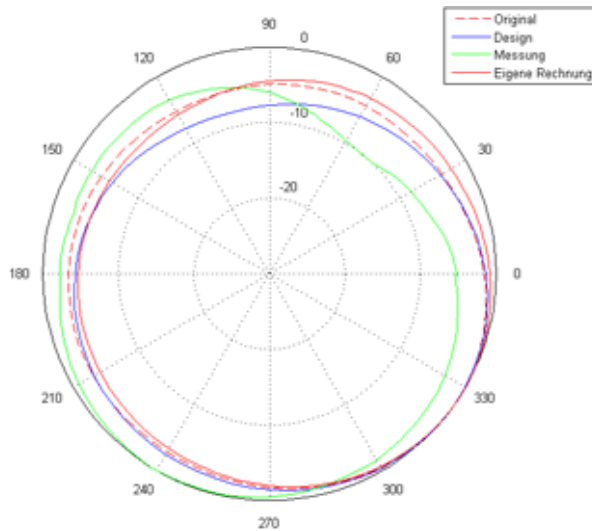


Bild 7: Frequenz 1800 MHz: Horizontales Richtdiagramm bei $\varphi = 0^\circ$ für horizontale Polarisation

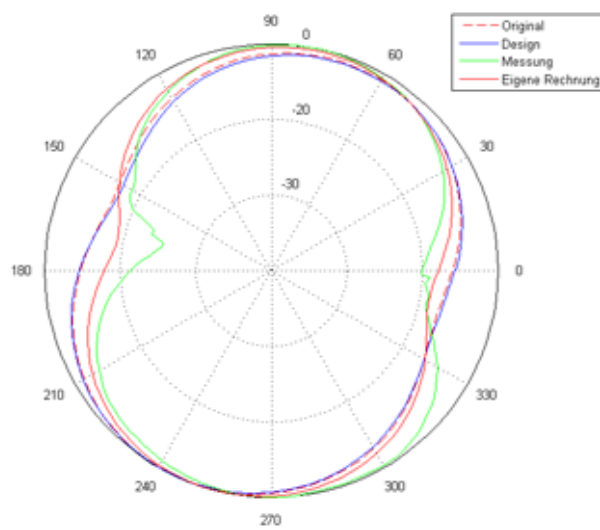


Bild 8: Frequenz 1800 MHz: Horizontales Richtdiagramm bei $\varphi = 0^\circ$ für vertikale Polarisation

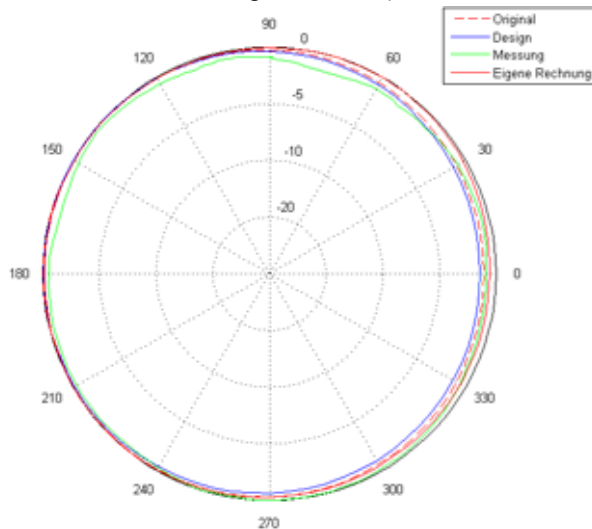


Bild 9: Frequenz 1.950 MHz: Horizontales Richtdiagramm bei $\vartheta = 90^\circ$ für horizontale Polarisation

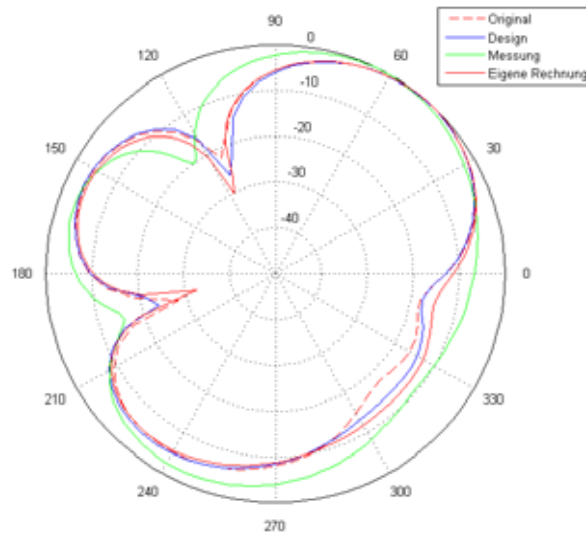


Bild 10: Frequenz 1.950 MHz: Horizontales Richtdiagramm bei $\vartheta = 90^\circ$ für vertikale Polarisation

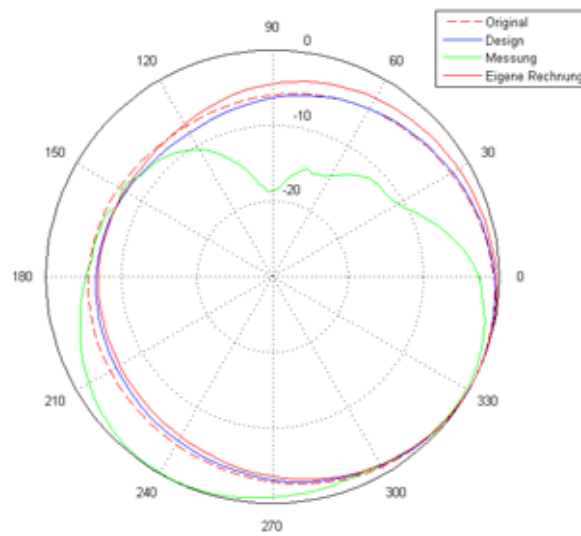


Bild 11: Frequenz 1.950 MHz: Horizontales Richtdiagramm bei $\varphi = 0^\circ$ für horizontale Polarisation

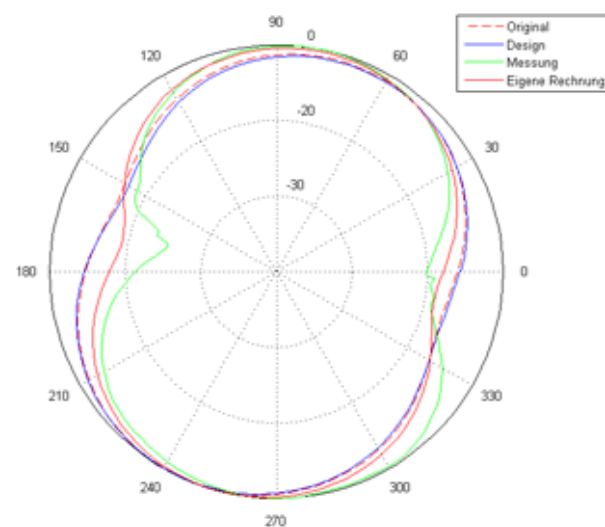


Bild 12: Frequenz 1.950 MHz: Horizontales Richtdiagramm bei $\varphi = 0^\circ$ für vertikale Polarisation

Anmerkung: Messungen im W-LAN-Betrieb der PCMCIA-Karte wurden nicht durchgeführt, da eine externe Speisung der Antenne auf der Karte nicht durchführbar war.

DECT-Basisstation:

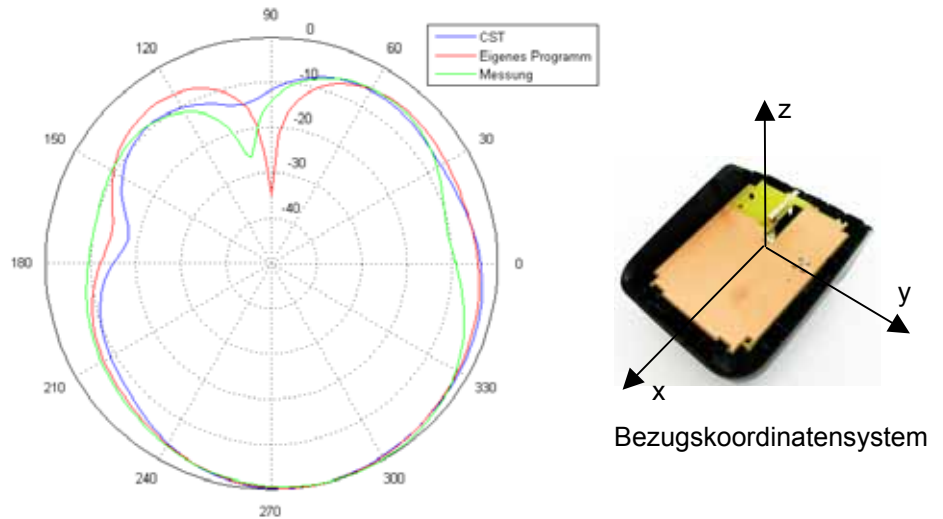


Bild 13: Frequenz 2.450 MHz: Horizontales Richtdiagramm bei $\vartheta = 90^\circ$ für horizontale Polarisation

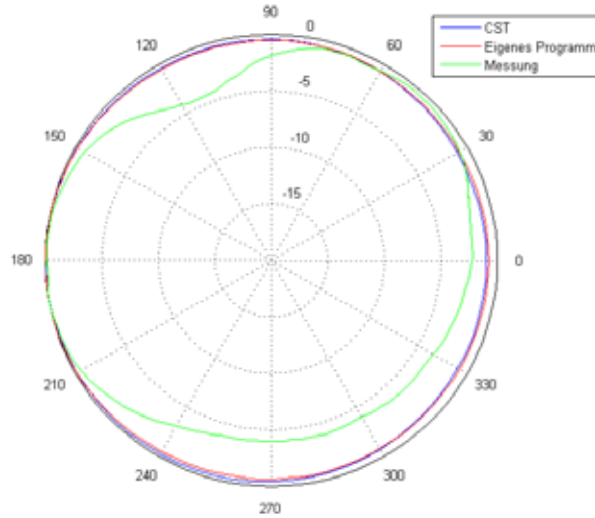


Bild 14: Frequenz 2.450 MHz: Horizontales Richtdiagramm bei $\vartheta = 90^\circ$ für vertikale Polarisation

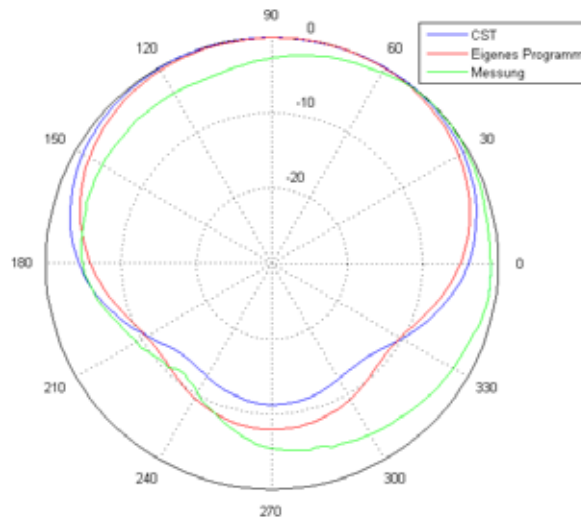


Bild 15: Frequenz 2.450 MHz: Vertikales Richtdiagramm bei $\varphi = 0^\circ$ für horizontale Polarisation

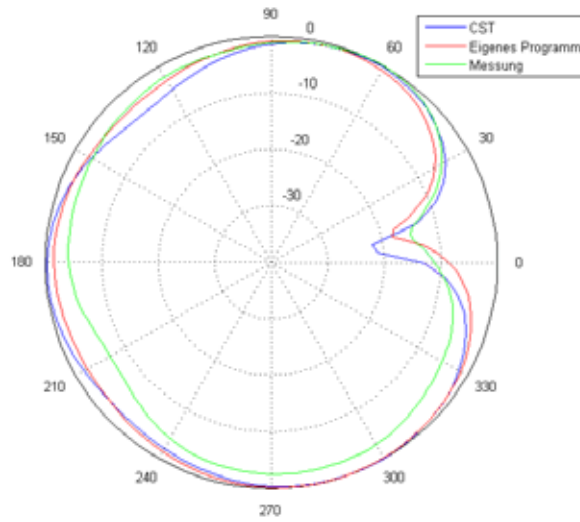


Bild 16: Frequenz 2.450 MHz: Vertikales Richtdiagramm bei $\varphi = 0^\circ$ für vertikale Polarisation

W-LAN-Router:

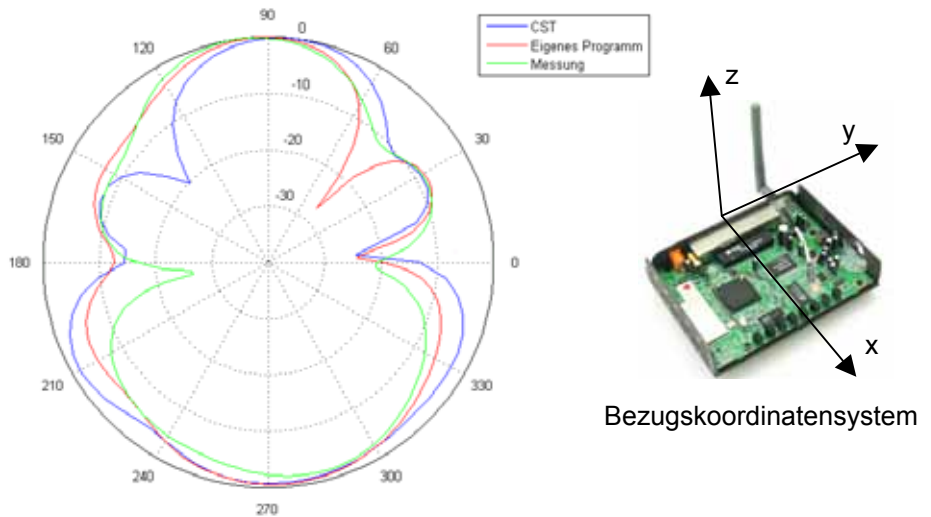


Bild 17: Frequenz 1.900 MHz: Horizontales Richtdiagramm bei $\vartheta = 90^\circ$ für horizontale Polarisation

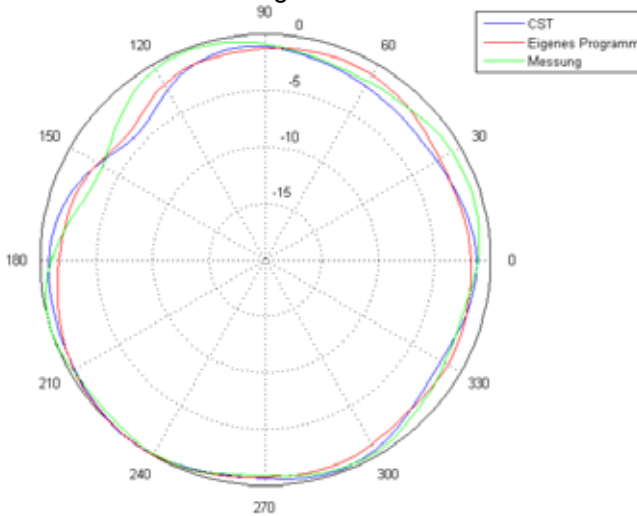


Bild 18: Frequenz 1.900 MHz: Horizontales Richtdiagramm bei $\vartheta = 90^\circ$ für vertikale Polarisation

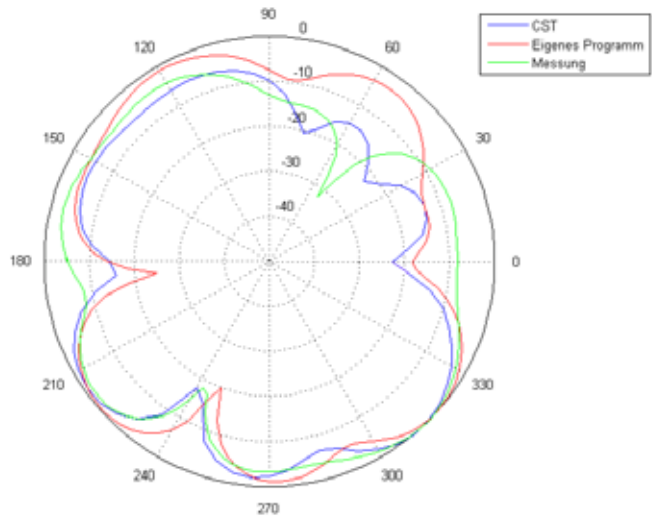


Bild 19: Frequenz 1.900 MHz: Vertikales Richtdiagramm bei $\vartheta = 0^\circ$ für horizontale Polarisation

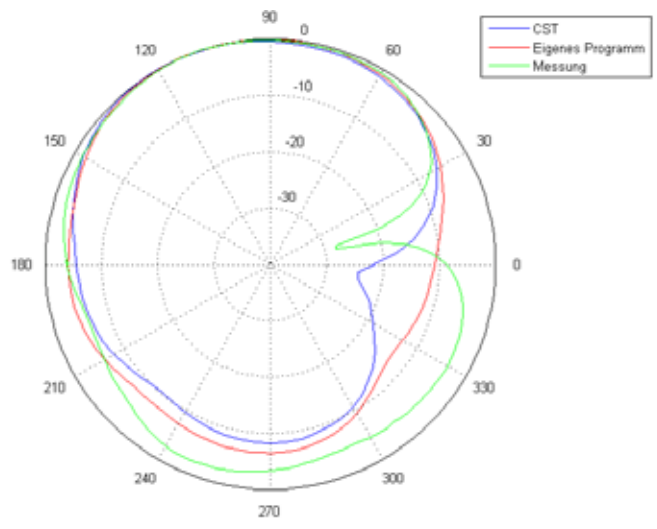


Bild 20: Frequenz 1.900 MHz: Vertikales Richtdiagramm bei $\vartheta = 0^\circ$ für vertikale Polarisation

**Tabellen der für die Berechnungen
verwendeten Materialdaten ϵ_r , κ , ρ
der biologischen Gewebe
und der technischen Bauelemente**

Frequenz = 2.450 MHz

Bezeichnung	epsilon_r	kappa(S/m)	density(kg/m ³)
Gale_Blad_Bile	68,360931	2,800733	1,01E+03
Bladder	18,000759	0,685294	1,03E+03
Blood	58,263756	2,544997	1,06E+03
Blood Vessel	42,531000	1,435300	1,04E+03
Vitreous_Humour	68,208023	2,478094	1,01E+03
Bone_Cancellous	18,548979	0,805112	1,92E+03
Bone_Cortical	11,381223	0,394277	1,99E+03
Bone_Marrow_Not_Infiltr	5,296872	0,095031	1,04E+03
Catilage	38,771160	1,755682	1,10E+03
Cerebro_Spinal_Fluid	66,243279	3,457850	1,01E+03
Cornea	51,614494	2,295194	1,08E+03
Lens_Cortex	44,625317	1,504036	1,05E+03
Eye_Tissue(Sclera)	52,627628	2,033048	1,03E+03
Eye_Tissue(Sclera)	52,627628	2,033048	1,03E+03
Vitreous_Humour	68,208023	2,478094	1,01E+03
Fat	5,280096	0,104517	9,16E+02
Gall_Bladder	57,633728	2,059032	1,03E+03
Thyroid_Thymus	57,200367	1,967798	1,05E+03
Heart	54,814018	2,256186	1,03E+03
Colon(Large_Intestine)	53,878193	2,038204	1,04E+03
Small_Intestine	54,424351	3,172779	1,04E+03
Kidney	52,742668	2,429709	1,05E+03
Tendon	43,121975	1,684531	1,22E+03
Liver	43,034443	1,686411	1,03E+03
Lung(Inflated)	20,476801	0,804128	2,60E+02
Lung(Deflated)	48,380974	1,682395	1,05E+03
Thyroid_Thymus	57,200367	1,967798	1,04E+03
Skin(wet)	42,852562	1,591928	1,04E+03
Muscle(Transverse_Fibr)	52,729469	1,738781	1,05E+03
Bone_Cortical	11,381223	0,394277	1,03E+03
Nerve(Spinal_Chord)	30,145145	1,088474	1,04E+03
Gray_Matter	48,911255	1,807664	1,04E+03
White_Matter	36,166599	1,215008	1,04E+03
Cerebellum	44,803696	2,101270	1,04E+03
Thyroid_Thymus	57,200367	1,967798	1,05E+03
Skin(dry)	38,006660	1,464073	1,13E+03
Spleen	52,449310	2,238070	1,05E+03
Stomach_Esop_Duodenum	62,158325	2,210518	1,05E+03
Testis_Prostat	57,550518	2,167421	1,04E+03
Bone_Cortical	11,381223	0,394277	2,16E+03
plywood	1,700000	0,008341	6,50E+02
ABS	2,800000	0,004961	1,05E+03
Polycarbonate+ABS	2,900000	0,003162	1,15E+03
PVC-U	2,800000	0,011449	1,38E+03
circuit board RO4003C	3,400000	0,000973	1,79E+03

Frequenz = 1.950 MHz

Bezeichnung	epsilon_r	kappa(S/m)	density(kg/m ³)
Gale_Blad_Bile	68,901382	2,403940	1,01E+03
Bladder	18,260452	0,566922	1,03E+03
Blood	59,108727	2,149651	1,06E+03
Blood Vessel	43,152000	1,143800	1,04E+03
Vitreous_Humour	68,498520	2,123629	1,01E+03
Bone_Cancellous	19,149752	0,635913	1,92E+03
Bone_Cortical	11,685085	0,301173	1,99E+03
Bone_Marrow_Not_Infiltr	5,353641	0,074181	1,04E+03
Catilage	39,872242	1,388137	1,10E+03
Cerebro_Spinal_Fluid	66,983032	3,035314	1,01E+03
Cornea	52,481339	1,951358	1,08E+03
Lens_Cortex	45,182148	1,222461	1,05E+03
Eye_Tissue(Sclera)	53,343674	1,692860	1,03E+03
Eye_Tissue(Sclera)	53,343674	1,692860	1,03E+03
Vitreous_Humour	68,498520	2,123629	1,01E+03
Fat	5,332977	0,083988	9,16E+02
Gall_Bladder	58,082981	1,728335	1,03E+03
Thyroid_Thymus	57,922134	1,599192	1,05E+03
Heart	55,938255	1,875905	1,03E+03
Colon(Large_Intestine)	54,830605	1,675004	1,04E+03
Small_Intestine	55,524910	2,798415	1,04E+03
Kidney	53,989544	2,054203	1,05E+03
Tendon	43,994896	1,303202	1,22E+03
Liver	43,915863	1,374531	1,03E+03
Lung(Inflated)	20,828028	0,672884	2,60E+02
Lung(Deflated)	49,138206	1,364927	1,05E+03
Thyroid_Thymus	57,922134	1,599192	1,04E+03
Skin(wet)	43,600479	1,309107	1,04E+03
Muscle(Transverse_Fibr)	53,353966	1,424819	1,05E+03
Bone_Cortical	11,685085	0,301173	1,03E+03
Nerve(Spinal_Chord)	30,684464	0,895614	1,04E+03
Gray_Matter	49,785683	1,480381	1,04E+03
White_Matter	36,799404	0,979288	1,04E+03
Cerebellum	45,774696	1,793721	1,04E+03
Thyroid_Thymus	57,922134	1,599192	1,05E+03
Skin(dry)	38,639870	1,244868	1,13E+03
Spleen	53,491531	1,878623	1,05E+03
Stomach_Esop_Duodenum	62,974926	1,806060	1,05E+03
Testis_Prostat	58,352669	1,792035	1,04E+03
Bone_Cortical	11,685085	0,301173	2,16E+03
plywood	1,700000	0,006639	6,50E+02
ABS	2,800000	0,003949	1,05E+03
Polycarbonate+ABS	2,900000	0,002517	1,15E+03
PVC-U	2,800000	0,009112	1,38E+03
circuit board RO4003C	3,400000	0,000775	1,79E+03

Frequenz = 1.900 MHz

Bezeichnung	epsilon_r	kappa(S/m)	density(kg/m ³)
Gale_Blad_Bile	68,953964	2,368638	1,01E+03
Bladder	18,287127	0,556129	1,03E+03
Blood	59,195789	2,113665	1,06E+03
Blood Vessel	43,215000	1,117300	1,04E+03
Vitreous_Humour	68,524101	2,092460	1,01E+03
Bone_Cancellous	19,213427	0,619844	1,92E+03
Bone_Cortical	11,716689	0,292404	1,99E+03
Bone_Marrow_Not_Infiltr	5,359567	0,072248	1,04E+03
Catilage	39,985783	1,353862	1,10E+03
Cerebro_Spinal_Fluid	67,055649	2,997276	1,01E+03
Cornea	52,574863	1,919736	1,08E+03
Lens_Cortex	45,238697	1,196926	1,05E+03
Eye_Tissue(Sclera)	53,417667	1,661908	1,03E+03
Eye_Tissue(Sclera)	53,417667	1,661908	1,03E+03
Vitreous_Humour	68,524101	2,092460	1,01E+03
Fat	5,338405	0,082090	9,16E+02
Gall_Bladder	58,126629	1,698913	1,03E+03
Thyroid_Thymus	57,995132	1,565774	1,05E+03
Heart	56,063240	1,840534	1,03E+03
Colon(Large_Intestine)	54,934162	1,641513	1,04E+03
Small_Intestine	55,647621	2,763648	1,04E+03
Kidney	54,130901	2,018959	1,05E+03
Tendon	44,080601	1,268387	1,22E+03
Liver	44,012112	1,345636	1,03E+03
Lung(Inflated)	20,866415	0,660769	2,60E+02
Lung(Deflated)	49,218849	1,335827	1,05E+03
Thyroid_Thymus	57,995132	1,565774	1,04E+03
Skin(wet)	43,682064	1,283021	1,04E+03
Muscle(Transverse_Fibr)	53,418453	1,396326	1,05E+03
Bone_Cortical	11,716689	0,292404	1,03E+03
Nerve(Spinal_Chord)	30,743879	0,877753	1,04E+03
Gray_Matter	49,881302	1,450184	1,04E+03
White_Matter	36,868435	0,957516	1,04E+03
Cerebellum	45,884365	1,765019	1,04E+03
Thyroid_Thymus	57,995132	1,565774	1,05E+03
Skin(dry)	38,714371	1,224557	1,13E+03
Spleen	53,607277	1,845264	1,05E+03
Stomach_Esop_Duodenum	63,058311	1,769339	1,05E+03
Testis_Prostat	58,435921	1,757854	1,04E+03
Bone_Cortical	11,716689	0,292404	2,16E+03
plywood	1,700000	0,006469	6,50E+02
ABS	2,800000	0,003847	1,05E+03
Polycarbonate+ABS	2,900000	0,002452	1,15E+03
PVC-U	2,800000	0,008879	1,38E+03
circuit board RO4003C	3,400000	0,000755	1,79E+03

Frequenz = 900 MHz

Bezeichnung	epsilon_r	kappa(S/m)	density(kg/m ³)
Gale_Blad_Bile	70,187889	1,838271	1,01E+03
Bladder	18,936157	0,383049	1,03E+03
Blood	61,360718	1,538069	1,06E+03
Blood Vessel	44,750000	0,696140	1,04E+03
Vitreous_Humour	68,901840	1,636162	1,01E+03
Bone_Cancellous	20,787804	0,339975	1,92E+03
Bone_Cortical	12,453704	0,143304	1,99E+03
Bone_Marrow_Not_Infiltr	5,504309	0,040201	1,04E+03
Catilage	42,653103	0,782333	1,10E+03
Cerebro_Spinal_Fluid	68,638336	2,412575	1,01E+03
Cornea	55,234486	1,394106	1,08E+03
Lens_Cortex	46,572613	0,793379	1,05E+03
Eye_Tissue(Sclera)	55,270130	1,166726	1,03E+03
Eye_Tissue(Sclera)	55,270130	1,166726	1,03E+03
Vitreous_Humour	68,901840	1,636162	1,01E+03
Fat	5,461937	0,051039	9,16E+02
Gall_Bladder	59,141594	1,256896	1,03E+03
Thyroid_Thymus	59,683323	1,038448	1,05E+03
Heart	59,892677	1,229882	1,03E+03
Colon(Large_Intestine)	57,939129	1,079813	1,04E+03
Small_Intestine	59,487000	2,164847	1,04E+03
Kidney	58,675552	1,392205	1,05E+03
Tendon	45,825668	0,718366	1,22E+03
Liver	46,833118	0,854965	1,03E+03
Lung(Inflated)	21,999969	0,456663	2,60E+02
Lung(Deflated)	51,423416	0,857877	1,05E+03
Thyroid_Thymus	59,683323	1,038448	1,04E+03
Skin(wet)	46,080399	0,844670	1,04E+03
Muscle(Transverse_Fibr)	55,031891	0,942945	1,05E+03
Bone_Cortical	12,453704	0,143304	1,03E+03
Nerve(Spinal_Chord)	32,530067	0,573612	1,04E+03
Gray_Matter	52,724701	0,942193	1,04E+03
White_Matter	38,886288	0,590815	1,04E+03
Cerebellum	49,443092	1,262649	1,04E+03
Thyroid_Thymus	59,683323	1,038448	1,05E+03
Skin(dry)	41,405334	0,866780	1,13E+03
Spleen	57,178375	1,272679	1,05E+03
Stomach_Esop_Duodenum	65,061401	1,186670	1,05E+03
Testis_Prostat	60,552464	1,209408	1,04E+03
Bone_Cortical	12,453704	0,143304	2,16E+03
plywood	1,700000	0,003064	6,50E+02
ABS	2,800000	0,001822	1,05E+03
Polycarbonate+ABS	2,900000	0,001162	1,15E+03
PVC-U	2,800000	0,004206	1,38E+03
circuit board RO4003C	3,400000	0,000460	1,79E+03