



R E P O R T

Forschungsvorhaben

*Bestimmung der Exposition durch Ultra-
Wideband Technologien*

Teil 3 (Arbeitspaket 3):

Messungen und Berechnungen

Gernot Schmid, Stefan Cecil, Benjamin Petric, Luis Alberto Pérez

Mai 2008
Exemplar 1
ARC-IT-0236

Verteiler:

- 1-2 Bundesamt für Strahlenschutz
- 3 DI. Lamedschwandner
- 4 DI. Schmid
- 5 DI Cecil
- 6 Ing. Petric
- 7 Hr. Pérez, BSc.
- 8 Sekretariat ARCS/IT

Bestimmung der Exposition durch Ultra Wideband Technologien

3. Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben Arbeitspaket 3 : Messungen und Berechnungen

im Auftrag des

**Bundesamtes für Strahlenschutz
38201 Salzburg, Deutschland**

Gernot Schmid, Stefan Cecil, Benjamin Petric, Luis Alberto Pérez

Austrian Research Centers GmbH – ARC
Bereich Smart Systems
Geschäftsfeld Sichere Mobilkommunikation

Verfasser:

Dipl. Ing. Gernot Schmid
Geschäftsfeld Sichere Mobilkommunikation, Bereich Smart Systems
Austrian Research Centers GmbH-ARC
A-2444 Seibersdorf

Dipl. Ing. Stefan Cecil
Geschäftsfeld Sichere Mobilkommunikation, Bereich Smart Systems
Austrian Research Centers GmbH-ARC
A-2444 Seibersdorf

Ing. Benjamin Petric
Geschäftsfeld Sichere Mobilkommunikation, Bereich Smart Systems
Austrian Research Centers GmbH-ARC
A-2444 Seibersdorf

Luis Alberto Pérez, BSc.
Geschäftsfeld Sichere Mobilkommunikation, Bereich Smart Systems
Austrian Research Centers GmbH-ARC
A-2444 Seibersdorf

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

ZUSAMMENFASSUNG

Im dritten und letzten Arbeitspaket dieses Vorhabens wurden einerseits messtechnische Immissionserhebungen in der Nähe bereits verfügbarer UWB-Geräte und andererseits numerische Berechnungen der Strahlungsabsorption für unterschiedliche Szenarien mit körpernah betriebenen UWB-Quellen durchgeführt.

Sowohl die Messungen als auch die numerischen Berechnungen bestätigten den bereits auf Basis theoretischer Überlegungen ableitbaren Befund, dass die Exposition von Personen durch UWB-Geräte (konform zur gegenwärtigen Funkregulierung) im Vergleich zur Exposition mit anderen, bereits etablierten Funkanwendungen, äußerst gering ist. Die Messungen an den untersuchten Geräten ergaben in 15 cm Abstand maximale, zeitlich gemittelte Werte der äquivalenten Strahlungsleistungsdichte von nicht mehr als ca. $0,32 \text{ mW/m}^2$, was $0,0032\%$ des entsprechenden ICNIRP-Referenzwertes für die Allgemeinbevölkerung von 10 W/m^2 entspricht.

Die numerischen Berechnungen unter Betrachtung von unterschiedlichen, in Zukunft denkbaren Expositionssituationen mit unmittelbar am Körper betriebenen UWB-Sendern (Abstand zwischen Körper und Antenne im Bereich 8-12 mm), führten auf maximale über 10g Gewebe gemittelte SAR-Werte bis maximal $0,013 \text{ W/kg}$, bei Zugrundelegung einer 100% Ausnutzung des zur europäischen bzw. deutschen Funkregulierung konformen Sendespektrums. Für reale Geräte, mit geringerer spektraler Effizienz, bzw. für Geräte die nur Subbereiche des zur Verfügung stehenden UWB-Frequenzbandes nutzen, ist daher davon auszugehen, dass die maximalen SAR_{10g}-Werte deutlich geringer sein werden. Beispielsweise liegen die maximalen Sendeleistungen der konkret untersuchten Geräte im Bereich von weniger als ca. $40 \mu\text{W}$. Selbst wenn diese Sendeleistung (einer sehr theoretischen Überlegung folgend) vollständig innerhalb der Mittelungsmasse von 10g absorbiert wird, kann dies zu nicht mehr als $0,004 \text{ W/kg}$ SAR_{10g} führen ($0,2\%$ des Basiswertes für lokale Exposition des Kopfes für die Allgemeinbevölkerung nach ICNIRP).

Im Vergleich zu anderen am Körper betreibbaren Funkanwendungen (Mobiltelefon, DECT, WLAN, Bluetooth-Klasse 1) sind daher die von UWB-Geräten zu erwartenden maximalen SAR-Werte um mehrere Größenordnungen geringer einzustufen. Selbst im Vergleich zu Bluetooth-Geräten der Klasse 3 (1 mW Sendeleistung) werden UWB-Geräte im Allgemeinen noch zu deutlich geringeren, von der jeweiligen Anwendung abhängigen, SAR-Werten führen.

Die von regulierungskonformen Geräten zu erwartenden Werte der maximalen über 10g gemittelten spezifischen Absorption SA_{10g} werden noch deutlicher als die maximalen SAR_{10g}-Werte unterhalb des entsprechenden Limits liegen, typischerweise im Bereich von deutlich weniger als 10^{-8} J/kg , was deutlich weniger als $0,0005\%$ des Basiswertes von 2 mJ/kg entspricht.

INHALT

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | EINLEITUNG..... | 3 |
| 2 | MESSTECHNISCHE EXPOSITIONSERFASSUNG IN DER UMGEBUNG VON UWB-GERÄTEN | 4 |
| 2.1 | Gegenwärtig verfügbare UWB-Geräte..... | 4 |
| 2.2 | Messtechnisch untersuchte UWB-Geräte..... | 5 |
| 2.2.1 | Gerät 1: Cable Free USB Hub und Adapter (Belkin, Inc.) [8] | 5 |
| 2.2.2 | Gerät 2: Wireless USB Hub und Adapter (IOGEAR, Inc.) [9] | 6 |
| 2.2.3 | Gerät 3: PulsON Reference Design (Time Domain, Inc.) [10] | 6 |
| 2.2.4 | Gerät 4: Ubisense Serie 7000 (Ubisense AG) [11]..... | 7 |
| 2.3 | Messmethoden..... | 8 |
| 2.3.1 | Unsicherheiten zufolge Messungen im Nahfeld der Messantenne..... | 10 |
| 2.4 | Messergebnisse | 12 |
| 2.4.1 | Gerät 1: Cable Free USB Hub und Adapter (Belkin, Inc.) | 12 |
| 2.4.2 | Gerät 2: Wireless USB Hub und Adapter (IOGEAR, Inc.) | 13 |
| 2.4.3 | Gerät 3: PulsON Reference Design (Time Domain, Inc.) | 14 |
| 2.4.4 | Gerät 4: Ubisense Serie 7000 (Ubisense AG)..... | 15 |
| 3 | NUMERISCHE BERECHNUNGEN DER EXPOSITION DURCH UWB- ANWENDUNGEN | 19 |
| 3.1 | Betrachtete Szenarien | 19 |
| 3.2 | Berechnungsmethode | 19 |
| 3.2.1 | Feldquellen-Modelle | 19 |
| 3.2.2 | Berechnungsmethode für unterschiedliche spektrale Anregungen | 23 |
| 3.2.3 | Konkret betrachtete spektrale Anregungsformen | 25 |
| 3.3 | Dielektrische Gewebeparameter | 30 |
| 3.4 | Berechnungsergebnisse | 31 |
| 3.4.1 | Szenario 1: Notebook mit UWB-Sendemodul auf Oberschenkel | 31 |
| 3.4.2 | Szenario 2: UWB-Funkmodul am Hinterkopf für EEG-Übertragung..... | 33 |
| 3.4.3 | Szenario 3: UWB-Funkmodul in Augennähe (Videobrille)..... | 36 |
| 3.4.4 | Szenario 4: UWB-Funkmodul am Brustkorb (z.B. EKG-Übertragung) | 38 |
| 3.4.5 | Szenario 5: Modell mit 3 simultan betriebenen Quellen | 42 |
| 4 | BEURTEILUNG DER MESS- UND BERECHNUNGSERGEBNISSE | 45 |
| 4.1 | Exposition im Fernfeld von UWB-Geräten..... | 45 |
| 4.2 | Exposition bei körpernah betriebenen UWB-Geräten | 47 |
| 4.3 | Erhöhung des Immissionshintergrundes durch UWB-Geräte | 48 |
| 5 | LITERATUR..... | 50 |

1 EINLEITUNG

Nachdem in den beiden vorangegangenen Arbeitspaketen ([1],[2]) die expositionsrelevanten Grundlagen der UWB-Technologie zusammengefasst, der aktuelle Stand der Standardisierung und Funkregulierung erhoben und geeignete Mess- und Berechnungsverfahren für die Expositionsbestimmung erarbeitet wurden, erfolgten im abschließenden dritten Arbeitspaket Expositionsbestimmungen in praktisch relevanten Expositionsszenarien.

Es wurden dazu einerseits messtechnische Untersuchungen in der Umgebung von insgesamt 4 unterschiedlichen, gegenwärtig kommerziell erhältlichen UWB-Geräten durchgeführt, wobei auch unterschiedliche Ausbreitungsbedingungen (Reflexivität der Umgebung) betrachtet wurden.

Andererseits erfolgten numerische Berechnungen der Exposition unter Verwendung eines detaillierten anatomischen Körpermodells, basierend auf dem Datensatz des Visible Human Projekts mit mehr als 100 unterscheidbaren Gewebebereichen. Bei diesen Berechnungen wurden vor allem Szenarien betrachtet, bei denen UWB-Quellen unmittelbar am Körper betrieben werden. Mangels Verfügbarkeit von entsprechenden kommerziellen Produkten zum gegenwärtigen Zeitpunkt, wurden für diese Berechnungsszenarien Situationen bzw. Anwendungen gewählt, wie sie derzeit zwar noch nicht erhältlich, jedoch bereits absehbar, bzw. von einigen (potenziellen) Herstellern angekündigt sind.

Die Mess- und Berechnungsergebnisse wurden schließlich aus strahlenschutztechnischer Sicht beurteilt und mit den Immissionen bzw. Expositionen, anderer etablierter Funktechnologien verglichen.

2 MESSTECHNISCHE EXPOSITIONSERFASSUNG IN DER UMGEBUNG VON UWB-GERÄTEN

2.1 Gegenwärtig verfügbare UWB-Geräte

Grundsätzlich sind weltweit gegenwärtig nur sehr wenige UWB-Geräte kommerziell erhältlich. Dies liegt einerseits an der erst kürzlich fixierten Funkregulierung in Europa [3] bzw. Deutschland [4], andererseits stehen UWB-Anwendungen auch in den USA, wo die Funkregulierung bereits seit 2001 [5] vorliegt, erst am Anfang der Verbreitung im Massenmarkt. Die Gründe für letztere Tatsache sind offensichtlich in den lang anhaltenden rivalisierenden Standardisierungsbestrebungen des UWB-Forums und der WiMedia Alliance zu suchen, die erst seit Ende 2006/Anfang 2007 zugunsten der WiMedia Alliance entschieden wurden. Erst das Vorliegen eines von der WiMedia Alliance propagierten MB-OFDM basierten ISO/IEC Standards [6], [7] für UWB-Anwendungen im Bereich der Datenübertragung (inkl. Video und Sprache) war offensichtlich der entscheidende Moment für die Hersteller mit konkreten Produkten in den Markt zu gehen. Die ersten auf dem genannten Standard basierenden Produkte sind seit Ende 2007 auf dem US-amerikanischen Markt erhältlich (konform zur FCC Regulierung für UWB). Es handelt sich dabei bisher fast ausschließlich um so genannte „Wireless USB Hubs“ bzw. „Cable Free USB Hubs“; Anwendungen, die einer drahtlosen Erweiterung der USB-Anschlussmöglichkeiten eines Computers dienen. Diese, gegenwärtig in den USA verfügbaren Geräte arbeiten ausschließlich in Bandgruppe 1, d.h. im Frequenzbereich von 3,1-4,8 GHz. Geräte, die der europäischen Funkregulierung entsprechen sind bisher noch nicht verfügbar, werden allerdings noch 2008 erwartet. Aus einer Gegenüberstellung der WiMedia Bandgruppendefinition und der europäischen UWB-Funkregulierung ist jedoch zu erkennen, dass in Europa nur die Bandgruppe 3 (ca. 6,3-7,9 GHz) vollständig nutzbar ist. In Bandgruppe 1 sind langfristig, unter der Voraussetzung der Implementierung von Störminderungstechniken, nur Band 2 und 3 nutzbar, und in Bandgruppe 4 nur das unterste Band (Band 10, ca. 7,9-8,5 GHz). Nach [4] sind diese Störminderungstechniken an eine signifikante Reduktion der Aussendungsrate (Duty Cycle) und damit schlussendlich eine verringerte Datenrate geknüpft, wodurch der Frequenzbereich unterhalb von 4,8 GHz in Europa für Anwendungen mit hohen Anforderungen an die Datenrate praktisch nicht sinnvoll nutzbar ist. D.h., für den europäischen Markt sind die Hersteller gezwungen zu höheren Frequenzen (6,0-8,5 GHz) auszuweichen. Ob dieser Umstand zu weiteren Verzögerungen bei der Markteinführung Anlass gibt, bleibt abzuwarten.

Die unmittelbar absehbaren UWB-Anwendungen im Bereich der reinen Datenkommunikation (ohne die Notwendigkeit von Ortungs- bzw. Lokalisierungsfunktionalität) werden aus gegenwärtiger Sicht nahezu ausschließlich auf dem genannten MB-OFDM basierten Übertragungsverfahren beruhen.

Anwendungen, bei denen Ortungs- bzw. Lokalisierungsfunktionalitäten erforderlich sind werden auf Impuls-basiertem, „klassischem“ UWB beruhen. Da hier gegenwärtig keine Standardisierung absehbar ist, werden solche Anwendungen auf herstellerspezifischen Verfahren bzw. Übertragungsprotokollen beruhen. In dieser Anwendungskategorie seit längerem bekannt sind Geräte zum Zwecke der Personenortung bzw. –verfolgung im militärischen bzw. polizeilichen Bereich. Jedoch sind bereits auch für einige zivile Anwendungen, bei denen der Lokalisierung von Objekten oder Personen Bedeutung zukommt, große Marktchancen absehbar. Ein derartiges, im Frequenzbereich 6 – 8 GHz

arbeitendes System ist sogar bereits für den europäischen Markt verfügbar und wurde messtechnisch hinsichtlich der verursachten Immissionen untersucht.

Für die im Zuge des vorliegenden Vorhabens durchgeführten messtechnischen Untersuchungen sollten repräsentative Geräte ausgewählt werden. Aufgrund der oben geschilderten Situation einer erst sehr eingeschränkten Verfügbarkeit kommerzieller Geräte, mussten daher Kompromisse gemacht werden. Als Vertreter von MB-OFDM basierten UWB Anwendungen wurden zwei, für den US amerikanischen Markt, nicht aber gemäß der europäischen Regulierung zugelassene Produkte der oben angeführten Kategorie „Wireless USB Hub“ bzw. „Cable Free USB Hub“ untersucht.

Als Repräsentanten von Impuls basiertem UWB wurden ebenfalls zwei unterschiedliche Produkte betrachtet. Einerseits wurden Immissionsmessungen in der Umgebung eines, zu einem UWB-Developer-Kit gehörenden UWB-Sendeempfängers durchgeführt (konform zur US amerikanischen Funkregulierung), und andererseits erfolgten Messungen im Nahbereich von UWB-Sende-Tags des oben genannten, in Europa bereits kommerziell erhältlichen Ortungs- bzw. Lokalisierungssystems.

2.2 Messtechnisch untersuchte UWB-Geräte

Im Folgenden werden die konkret messtechnisch untersuchten UWB-Geräte im Detail beschrieben.

2.2.1 Gerät 1: Cable Free USB Hub und Adapter (Belkin, Inc.) [8]

Dieses Gerät dient als drahtlose Erweiterung der USB-Schnittstelle eines Computers. In kabelgebundener Form bzw. drahtlos, basierend auf WLAN-Technik (IEEE 802.11a,b,g,h), sind USB-Hubs bereits seit mehreren Jahren am Markt erhältlich. Das in Abbildung 2.1 dargestellte Gerät war im Sommer 2007 eines der ersten, die diese Funktionalität basierend auf MB-OFDM UWB bieten. Es besteht aus einem Adapter und dem zugehörigen Hub mit 4 USB Steckplätzen. Der Adapter wird, wie herkömmliche USB-Speichersticks, an eine freie USB-Buchse des Computers angesteckt und der Hub wird zur Stromversorgung über ein Steckernetzteil an die Netzsteckdose angeschlossen. Die Installation einer entsprechenden Treiber- bzw. Konfigurationssoftware am Computer vorausgesetzt, wird automatisch eine UWB-Funkverbindung zwischen Adapter und Hub hergestellt und alle herkömmlichen am Hub angeschlossenen USB-tauglichen Geräte (Kameras, Speichersticks, MP3-Player, usw.) sind sofort ansprechbar (so als ob sie direkt an einem USB-Port des Computers angeschlossen wären).



Abbildung 2.1: Adapter (links) und Hub (rechts) des Belkin Cable Free USB Produkts F5U301

Über kurze Distanzen (z.B. am Schreibtisch) sollen damit Bruttodatenraten bis zu 480 Mbit/s möglich sein. Da es sich um eine bidirektionale Übertragung handelt, sind selbstverständlich beide Gerätekomponenten (Adapter und Hub) als UWB-Quellen anzusehen. Beide Komponenten verfügen über unterschiedliche integrierte Antennen, die als gedruckte Schaltungen realisiert sind.

Das für den US-Markt, nicht aber für Europa zugelassene Gerät arbeitet nach dem WiMedia Standard [6],[7] und nutzt nur die Bandgruppe 1, d.h., die drei jeweils 528 MHz breiten Kanäle mit den Mittenfrequenzen 3432, 3960, 4488 MHz. Als Time Frequency Codes (TFC) stehen nur TFC1, TFC2, TFC5, TFC6 und TFC7 zur Verfügung (vgl. Kapitel 2.3.3 in [1]), wobei die Auswahl des TFC entweder automatisch oder manuell über eine Konfigurationssoftware erfolgen kann.

Als maximale Sendeleistung wird im Handbuch zum Gerät 80 μ W bzw. -41,25 dBm/MHz angegeben.

2.2.2 Gerät 2: Wireless USB Hub und Adapter (IOGEAR, Inc.) [9]

Hinsichtlich der Anwendungsmöglichkeiten entspricht dieses Gerät exakt jenen des oben beschriebenen Gerätes von Belkin. Ebenso wird nur die Bandgruppe 1 (ca. 3,1-4,8 GHz) genutzt, wobei bei diesem Gerät grundsätzlich alle 7 definierten TFCs angeboten werden. Das Gerät ist demnach ebenfalls nicht für den europäischen Markt zugelassen. Im Gegensatz zum Belkin-Gerät besitzt der Hub eine externe, leicht abnehmbare Stabantenne.

Angaben über die tatsächliche HF-Ausgangsleistung werden in der Bedienungsanleitung des Gerätes nicht gemacht.



Abbildung 2.2: Adapter (links) und Hub (rechts) des IOGEAR Wireless USB Produkts GUWH104KIT

2.2.3 Gerät 3: PulsON Reference Design (Time Domain, Inc.) [10]

Bei diesem Gerät handelt es sich um ein Developers Kit für Anwendungen auf Basis von Impuls-basierter, "klassischer" UWB-Funktechnik. Die Konfiguration der Geräte erfolgt über die mitgelieferte Software. Die Funkschnittstelle der Geräte ist konform zur US amerikanischen FCC UWB-Regulierung. Die Mittenfrequenz des Sendesignals ist 4,7 GHz, bei einer Bandbreite von 3,2 GHz (-10 dB Bandbreite). Als mittlere Impulswiederholfrequenz sind 9,6 MHz spezifiziert und als maximale mittlere Sendeleistung wird im Handbuch zum Gerät -12,8 dBm angegeben (entspricht ca.

52 μ W). Abbildung 2.3 zeigt die beiden Sendeempfänger. Als Strahlungselement dient eine extern montierte, gedruckte Breitbandantenne.



Abbildung 2.3: PulsON P210 Reference Design Kit

2.2.4 Gerät 4: Ubisense Serie 7000 (Ubisense AG) [11]

Bei diesem Gerät handelt es sich um eines der ersten, kommerziell erhältlichen und zur europäischen UWB-Regulierung konformen Systeme zur Echtzeitlokalisierung (*Real Time Location Systems, RTLS*). Es arbeitet im Frequenzbereich zwischen 6 und 8 GHz und besteht im Wesentlichen aus den zu lokalisierenden Tags, die UWB-Impulse absetzen und mehreren (typischerweise 4) Sensoren, die als UWB-Empfänger ausgelegt sind. Die Sensoren, üblicherweise in den Ecken des zu überwachenden Raumes montiert, sind kabelgebunden mit einem Computer verbunden, der mittels der zugehörigen Software die notwendigen Konfigurations-, Synchronisierungs-, Auswertungs- und Visualisierungsaufgaben übernimmt. Die von den Tags ausgesendeten UWB-Impulse werden von den Sensoren empfangen und hinsichtlich *Angle of Arrival (AoA)* and *Time Difference of Arrival (TDoA)* ausgewertet. Bei Verwendung mehrerer Sensoren ist damit eine präzise dreidimensionale Ortung der Tags möglich. Durch den Einsatz mehrerer, entsprechend vernetzter Sensorgruppen, können Tags über einen räumlich sehr großen Bereich lokalisiert und verfolgt werden, dessen Ausdehnung ein Vielfaches der Primärreichweite von maximal ca. 10-20 m der UWB-Funktechnik beträgt. Der potenziell große Anwendungsbereich solcher Systeme ist daher überall dort gegeben, wo (mit entsprechenden Tags ausgestattete) Objekte bzw. Personen identifiziert, lokalisiert oder verfolgt werden sollen, und es kann erwartet werden, dass derartige Systeme neue Impulse auf dem Gebiet der *Radio Frequency Identification (RFID)* setzen werden. Abbildung 2.4 zeigt Fotos eines Sensors (Abmessungen ca. 20 cm x 13 cm x 6 cm) und eines Tags (Abmessungen ca. 3,8 cm x 3,9 cm x 1,7 cm). Das aktiv UWB Impulse aussendende Tag ist zur Stromversorgung mit einer 3 V Knopfzelle ausgestattet. Abhängig von der Anzahl der abgesetzten Impulse pro Zeit sind Batterielevensdauern von mehreren Jahren möglich (z.B. 5 Jahre bei Dauerbetrieb mit einer Update-Rate von 0,2 Hz). Der Sensor ist, wie bereits erwähnt, als reiner UWB-Empfänger ausgelegt, der über ein Antennenarray eine räumliche und

zeitliche Auflösung der eintreffenden UWB-Impulse ermöglicht. UWB wird bei diesem System ausschließlich zur Lokalisierung der Tags verwendet. Für den Austausch von Daten (Konfigurationsdaten oder Informationsübertragung vom Tag zum Sensor) wird zusätzlich ein eigener bidirektionaler Kommunikationskanal bei ca. 2,4 GHz zwischen Sensor und Tag betrieben.



Abbildung 2.4: In einer Raumecke montierter Sensor (links) und ein Tag (rechts) des Ubisense Systems 7000

2.3 Messmethoden

Die oben beschriebenen Geräte 1-3 wurden für die durchzuführenden Immissionsmessungen angekauft und konnten daher unter Laborbedingungen sehr detailliert hinsichtlich der von ihnen verursachten UWB-Immissionen untersucht werden. Mit diesen Geräten wurden unterschiedliche Arten von Messungen durchgeführt. Mit den beiden Hubs der Geräte 1 und 2, sowie mit Gerät 3 wurden räumliche Verteilungen der Immissionen in einem definierten 30 cm x 30 cm x 30 cm Messraster (Abbildung 2.5) gemessen, wobei das Messraster in Hauptstrahlrichtung der Geräte lag. Die Hauptstrahlrichtung der Geräte wurde zuvor jeweils durch Messungen in konstantem Abstand zu den UWB Geräten bei unterschiedlicher räumlicher Lage der Geräte am Drehtisch bestimmt.

Mit den USB-Adaptern der Geräte 1 und 2 wurden Immissionsmessungen in 15 und 30 cm Abstand in Hauptstrahlrichtung durchgeführt.

Alle oben genannten Messungen erfolgten unter unterschiedlichen Ausbreitungsbedingungen: nicht-reflexiv im echoarmen Raum und reflexiv mit metallisch begrenztem Ausbreitungsraum. In zweitgenanntem Fall wurden Metallwände in 50 cm Abstand seitlich und hinter dem UWB-Gerät und in 1 m Abstand vor dem UWB-Gerät aufgestellt (Abbildung 2.5).

Alle Messungen erfolgten frequenzselektiv und quasi-isotrop mit einer Doppelsteghornantenne Model 3115 (EMCO) und einem Spektrumanalysator E4405B (Agilent). Während der Messungen wurde eine kontinuierliche Datenübertragung vom jeweils untersuchten Gerät zur entsprechenden Gegenstelle aufrechterhalten. Als Einstellungen am Spektrumanalysator für die Erfassung der mittleren Immissionen im Messraster wurden gewählt:

- RMS-Detektor
- Sweep Time 300-350 ms (bei 401 Frequenzpunkten)
- VBW 3 MHz
- RBW 100 kHz
- Band Power Messung über gesamten Sendefrequenzbereich (lt. Gerätespez.)
- Mittelung der Band Power Messungen über 10 Sweeps

Die Erfassung der Maximalimmissionen in Form der maximalen äquivalenten Strahlungsleistungsdichte erfolgte in der Messposition mit maximaler mittlerer Immission bei fix montierter Empfangsantenne in 15 cm Abstand zum Prüfling.

Für die MB-OFDM Geräte wird der Wert der Maximalimmissionen in Form des innerhalb des abgesendeten HF-Bursts auftretenden Effektivwertes der Immission definiert. Die folgenden Einstellungen am Spektrumanalysator wurden dafür verwendet.

- RMS-Detektor
- Sweep Time 15 ms (bei 401 Frequenzpunkten)
- VBW 3 MHz
- RBW 3 MHz
- MAXHOLD Funktion
- mit anschließender Bandbreitenkorrektur

Die relativ geringe Sweep Time zur Erfassung der Maximalimmissionen bei den MB-OFDM Geräten ist bei dieser Messung aufgrund des RMS-Detektors notwendig [12]. Würde die pro Frequenzpunkt für die Berechnung des RMS Wertes zur Verfügung stehende Zeit größer sein als die Länge der zu messenden HF-Bursts, käme es zu einer Unterbewertung der Maximalimmission, da auch Zeitbereiche außerhalb des Bursts (d.h. ohne Signalpegel) in die Integration im Zuge der Effektivwertberechnung eingeschlossen würden. Im Fall der untersuchten MB-OFDM Geräte beträgt die Dauer der HF-Bursts (im untersuchten Betriebszustand) ca. 40 μ s. Die gewählte Sweep Time von 15 ms bei 401 Frequenzpunkten führt auf 37,5 μ s pro Frequenzpunkt. Umgekehrt konnte auch verifiziert werden, dass 15 ms Sweep Time noch ausreichend für eine adäquate Effektivwertberechnung im Rahmen einer Genauigkeit von ca. ± 1 dB sind.

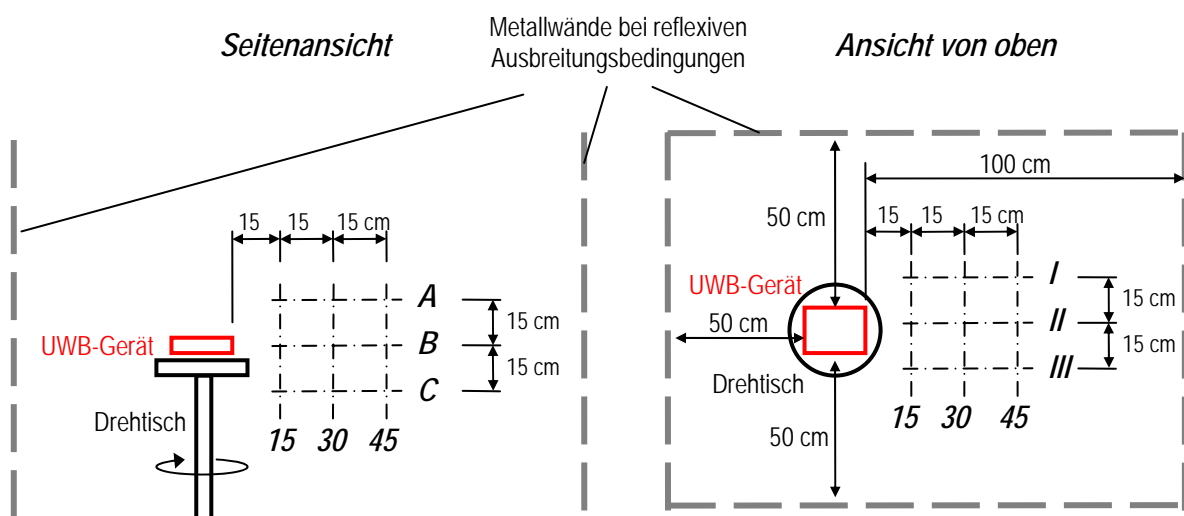


Abbildung 2.5: Definition des Messrasters für die Messungen der räumlichen Immissionsverteilung

Für die betrachteten Impuls-UWB-Geräte wurde die Größenordnung der maximalen Feldstärkeamplitude mit folgenden Spektrumanalysator-Einstellungen abgeschätzt:

- PEAK-Detektor
- Sweep Time 100 ms (bei 401 Frequenzpunkten)
- VBW 3 MHz
- RBW 3 MHz
- MAXHOLD Funktion
- mit anschließender Bandbreitenkorrektur

Da das Ubisense System 7000 (Gerät 4) aus finanziellen Gründen nicht eigens für die messtechnischen Untersuchungen angekauft werden konnte, erfolgten die Messungen in diesem Fall nicht unter den gleichen HF-Laborbedingungen wie oben beschrieben (echoarmer und ideal metallisch begrenzter Raum), sondern in einem Computer-Laborraum der Universität Salzburg, wo das Ubisense System 7000 zu Forschungszwecken verwendet wird. In diesem Fall wurde das oben beschriebene Messprozedere in vereinfachter Form angewendet (siehe Kapitel 2.4.4).

Weitere Details hinsichtlich der bei den einzelnen Geräten verwendeten Messmethodik finden sich in den jeweiligen Kapiteln mit den Messergebnissen (2.4.1 - 2.4.4).

2.3.1 Unsicherheiten zufolge Messungen im Nahfeld der Messantenne

Bei den durchzuführenden UWB-Immissionsmessungen besteht aufgrund der geringen Sendeleistungen der Geräte grundsätzlich die Problematik, dass nur relativ nahe an den UWB-Quellen und dort auch nur mit (hoch)direktiven Messantennen sinnvolle, d.h. deutlich über dem Hintergrundrauschen liegende Messwerte erzielt werden können (vgl. Kapitel 2 in [2]). Aufgrund physikalischer Gegebenheiten sind die Abmessungen von Antennen mit großer Direktivität im Allgemeinen groß gegenüber der Wellenlänge λ . Dadurch stellen sich erst in relativ großem Abstand ($\gg \lambda$) von der Antenne exakt Fernfeldbedingungen ein. Die Kalibrierdaten (z.B. Antennenfaktor) solcher Antennen sind daher üblicherweise erst in Abständen $\geq 1\text{m}$ definiert. Wird der in 1m Abstand definierte Antennenfaktor auf Roh-Messdaten angewendet, die bei wesentlich geringerem Abstand zwischen Quelle und Messantenne gewonnen wurden, ist mit zusätzlichen Messunsicherheiten zu rechnen, die mit dem in Abbildung 2.6 schematisch dargestellten Versuchsaufbau abgeschätzt wurden. Es wurde dazu im echoarmen Raum eine kleine, mit konstanter Leistung angespeiste Referenzquelle (3,1 GHz bzw. 7,5 GHz Halbwellendipole) positioniert und mit der bei den Immissionsmessungen verwendeten Hornantenne Feldstärkemessungen in unterschiedlichen Abständen d zur Quelle durchgeführt, wobei sowohl vertikale als auch horizontale Polarisierung der Referenzquelle betrachtet wurden¹.

Aufgrund der Kleinheit der Referenzquellen kann davon ausgegangen werden, dass sich die Hornantenne bereits im Fernfeld der Referenzquellen befindet. Etwaige Abweichungen vom erwarteten $1/d$ Feldstärkeverlauf sind daher auf die Tatsache zurückzuführen, dass die in 1 m Abstand definierten Messantennenparameter in geringeren Distanzen zur Feldquelle nicht mehr exakt gültig sind. Aus dem in Abbildung 2.7 dargestellten Verlauf der gemessenen Feldstärke über der Distanz ist zu erkennen,

¹ Die Messungen zeigten, dass die Feldstärkeanteile bei horizontal polarisierter Referenzquelle selbst bei $d=10\text{ cm}$ um mindestens 17 dB unterhalb jener Werte bei vertikaler Polarisierung lagen und daher im konkreten Fall nur vernachlässigbaren Einfluss haben.

dass sich bei 15 cm Abstand zur Antenne eine maximale Abweichung von ca. 3,5 dB (entspricht einem Faktor von ca. 1,5 für die Feldstärke bzw. 2,2 für die Leistungsflussdichte) vom für das Fernfeld charakteristischen Verlauf einer $1/d$ (Feldstärke) bzw. $1/d^2$ (Leistungsflussdichte) Abnahme ergibt. Für größer werdende Abstände d werden die Abweichungen geringer. Weiters zeigt Abbildung 2.7, dass dieser Effekt, wie zu erwarten, stärker bei niedrigeren Frequenzen zutage tritt, da hier die Fernfeldbedingungen (für die Messantenne) bei kleiner werdendem Abstand früher verletzt werden. Für die durchgeführten messtechnischen Immissionserhebungen bedeutet dies, dass die Messergebnisse mit einem zusätzlichen, von der Frequenz und der Distanz zwischen UWB-Quelle und Messantenne abhängigen Messfehler in Richtung einer Unterschätzung der Immissionen behaftet sind. Alle im Folgenden dargestellten Messergebnisse sind bezüglich dieses Messfehlers bereits korrigiert.

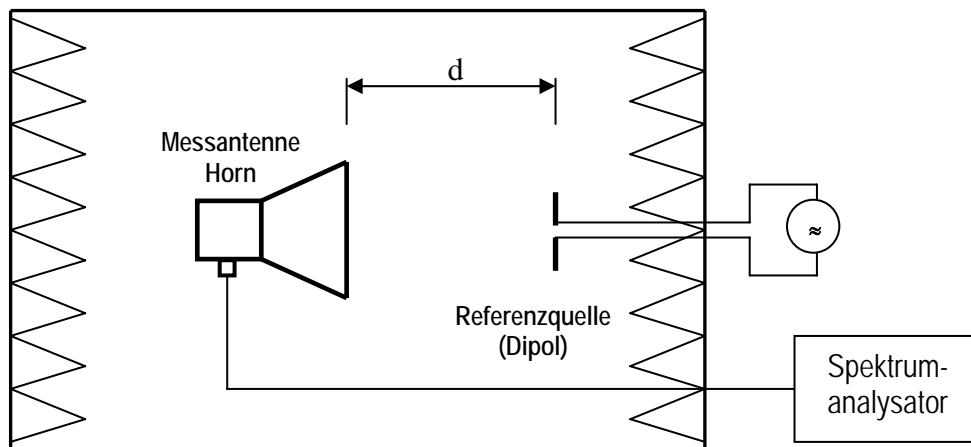


Abbildung 2.6: Schema zur Abschätzung der Unsicherheit zufolge der Messungen im Nahfeld der Messantenne

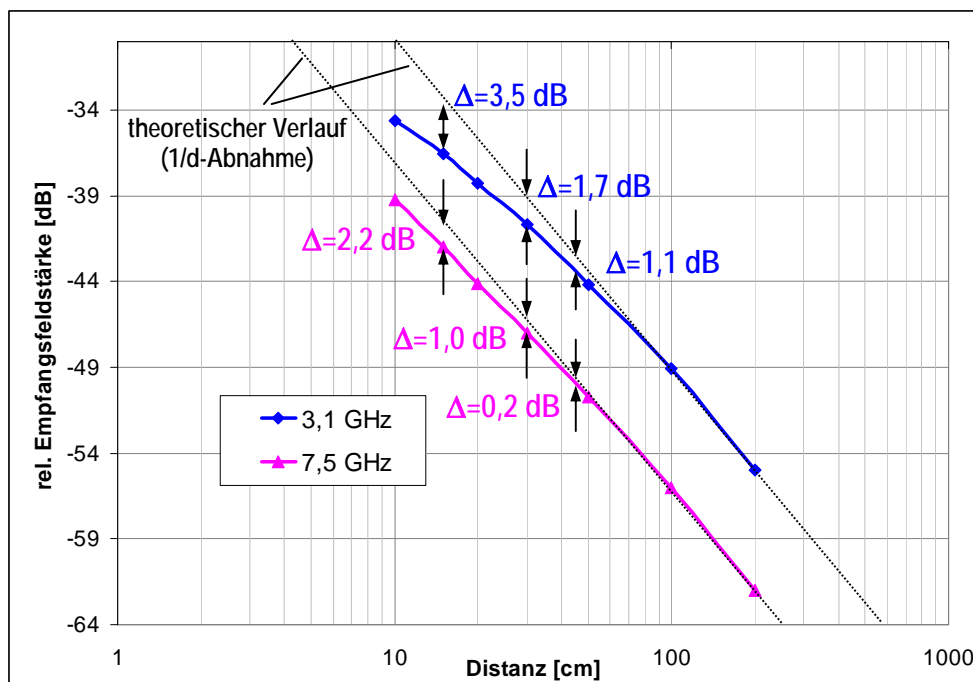


Abbildung 2.7: Mit Hornantenne gemessene Feldstärke in Abhängigkeit von der Distanz zu einer Referenzquelle

2.4 Messergebnisse

2.4.1 Gerät 1: Cable Free USB Hub und Adapter (Belkin, Inc.)

Über den gesamten Zeitraum der Messungen wurde eine Datenübertragung zwischen Hub und Adapter aufrechterhalten, wobei TFC 1 für die Übertragung verwendet wurde. Tabelle 2.1 fasst die Messergebnisse bei Betrachtung des Hubs als Quelle zusammen. Angegeben sind jeweils die Werte der mittleren äquivalenten Leistungsflussdichte $S_{\text{sequ,avg}}$ an den Achsenschnittpunkten des Messrasters, sowie die maximale (nicht zeitlich gemittelte), im MAXHOLD Modus gemessene Leistungsflussdichte $S_{\text{sequ,max}}$ an der Position der maximalen mittleren Leistungsflussdichte.

| Belkin Cable Free USB Hub | | | | | | | | | |
|--|-----|---|-------|-------|--|-----|---|-------|-------|
| nicht-reflexive Umgebung | | | | | reflexive Umgebung | | | | |
| | | $S_{\text{sequ, avg}} [\mu\text{W}/\text{m}^2]$ | | | | | $S_{\text{sequ, avg}} [\mu\text{W}/\text{m}^2]$ | | |
| | | 15 cm | 30 cm | 45 cm | | | 15 cm | 30 cm | 45 cm |
| A | I | 24.12 | 10.10 | 6.62 | A | I | 20.80 | 12.96 | 9.99 |
| A | II | 23.68 | 11.73 | 7.42 | A | II | 26.04 | 13.08 | 9.34 |
| A | III | 18.25 | 10.77 | 7.77 | A | III | 14.88 | 10.17 | 7.45 |
| B | I | 25.31 | 9.95 | 6.44 | B | I | 32.97 | 15.61 | 10.83 |
| B | II | 34.08 | 11.50 | 7.22 | B | II | 50.22 | 16.86 | 10.10 |
| B | III | 17.26 | 9.43 | 7.51 | B | III | 16.18 | 9.10 | 7.43 |
| C | I | 20.84 | 9.28 | 6.39 | C | I | 26.94 | 11.43 | 7.69 |
| C | II | 17.78 | 9.48 | 6.74 | C | II | 23.63 | 13.21 | 8.63 |
| C | III | 13.77 | 8.35 | 6.26 | C | III | 15.61 | 8.18 | 6.61 |
| $S_{\text{sequ, max}}$ in Position B/II/15 cm: 212,5 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ | | | | | $S_{\text{sequ, max}}$ in Position B/II/15 cm: 310,7 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ | | | | |

Tabelle 2.1: Ergebnis der Immissionsmessungen mit dem Belkin Cable Free USB Hub

Tabelle 2.2 fasst die Ergebnisse der Messungen in Hauptstrahlrichtung des USB Adapters zusammen.

| Belkin Cable Free USB Adapter | | | |
|---|-------|---|-------|
| nicht-reflexive Umgebung | | reflexive Umgebung | |
| $S_{\text{sequ, avg}} [\mu\text{W}/\text{m}^2]$ | | $S_{\text{sequ, avg}} [\mu\text{W}/\text{m}^2]$ | |
| 15 cm | 30 cm | 15 cm | 30 cm |
| 84,9 | 25,9 | 77,9 | 23,75 |
| $S_{\text{sequ, max}}$ in 15 cm Entfernung: 515,3 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ | | $S_{\text{sequ, max}}$ in 15 cm Entfernung: 475,7 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ | |

Tabelle 2.2: Ergebnis der Immissionsmessungen mit dem Belkin Cable Free USB Adapter

Der Einfluss der reflexiven Ausbreitungsbedingungen ist eher gering und bleibt kleiner als ca. $\pm 2,5$ dB. Interessant erscheint die Tatsache, dass der Adapter zu wesentlich höheren Immissionen führt als der Hub, wenngleich das absolute Ausmaß der Immissionswerte sehr gering ist. Der maximale Zeitmittelwert der Immissionen im Abstand von 15 cm zum Adapter beträgt nicht mehr als $84,9 \mu\text{W}/\text{m}^2$. Dies entspricht weniger als 0,00085% des Leistungsflussdichte-Referenzwertes für die Allgemeinbevölkerung gemäß ICNIRP [13].

2.4.2 Gerät 2: Wireless USB Hub und Adapter (IOGEAR, Inc.)

In gleicher Weise wie bei den Messungen mit Gerät 1 wurde im gesamten Zeitraum der Messungen eine Datenübertragung zwischen Hub und Adapter aufrechterhalten, wobei auch hier TFC 1 für die Übertragung verwendet wurde.

Tabelle 2.3 fasst die Messergebnisse bei Betrachtung des Hubs als Quelle zusammen. Angegeben sind jeweils die Werte der mittleren äquivalenten Leistungsflussdichte $S_{\text{equ,avg}}$ an den Achsenschnittpunkten des Messrasters, sowie die maximale (nicht zeitlich gemittelte), im MAXHOLD Modus gemessene Leistungsflussdichte $S_{\text{equ,max}}$ an der Position der maximalen mittleren Leistungsflussdichte.

| IOGEAR Wireless USB Hub | | | | | | | | | |
|---|-----|--|-------|--------------------|---|-----|--|-------|-------|
| nicht-reflexive Umgebung | | | | reflexive Umgebung | | | | | |
| | | $S_{\text{equ, avg}}$ [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] | | | | | $S_{\text{equ, avg}}$ [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] | | |
| | | 15 cm | 30 cm | 45 cm | | | 15 cm | 30 cm | 45 cm |
| A | I | 24.29 | 8.67 | 6.40 | A | I | 35.08 | 15.08 | 8.38 |
| A | II | 29.61 | 8.67 | 6.40 | A | II | 41.53 | 19.23 | 10.02 |
| A | III | 23.09 | 8.95 | 7.55 | A | III | 35.08 | 15.08 | 8.38 |
| B | I | 36.59 | 10.66 | 5.90 | B | I | 43.37 | 14.36 | 8.91 |
| B | II | 60.57 | 16.28 | 8.66 | B | II | 67.81 | 21.20 | 10.26 |
| B | III | 34.45 | 11.41 | 7.08 | B | III | 43.37 | 14.36 | 8.91 |
| C | I | 24.29 | 8.96 | 5.51 | C | I | 35.08 | 15.08 | 8.38 |
| C | II | 29.61 | 11.27 | 7.04 | C | II | 19.97 | 12.45 | 10.01 |
| C | III | 23.09 | 9.25 | 6.66 | C | III | 35.08 | 15.08 | 8.38 |
| $S_{\text{equ, max}}$ in Position B/II/15 cm: 353,4 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ | | | | | $S_{\text{equ, max}}$ in Position B/II/15 cm: 395,2 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ | | | | |

Tabelle 2.3: Ergebnis der Immissionsmessungen mit dem IOGEAR Wireless USB Hub

Tabelle 2.4 fasst die Ergebnisse der Messungen in Hauptstrahlrichtung des USB Adapters zusammen.

| IOGEAR Wireless USB Adapter | | | |
|--|-------|--|-------|
| nicht-reflexive Umgebung | | reflexive Umgebung | |
| $S_{\text{equ, avg}}$ [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] | | $S_{\text{equ, avg}}$ [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] | |
| 15 cm | 30 cm | 15 cm | 30 cm |
| 58,74 | 19,9 | 74,8 | 26,3 |
| $S_{\text{equ, max}}$ in 15 cm Entfernung: 364,3 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ | | $S_{\text{equ, max}}$ in 15 cm Entfernung: 445,7 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ | |

Tabelle 2.4: Ergebnis der Immissionsmessungen mit dem IOGEAR Wireless USB Adapter

Der Einfluss der reflexiven Ausbreitungsbedingungen auf die Immissionswerte bleibt auch bei diesem Gerät unter den gegebenen Bedingungen auf maximal ca. $\pm 2,5$ dB beschränkt. Das absolute Ausmaß der Immissionswerte ist ähnlich gering wie bei Gerät 1. Der maximale Zeitmittelwert der Immissionen im Abstand von 15 cm zum Adapter beträgt weniger 75 $\mu\text{W}/\text{m}^2$. Dies entspricht ca. 0,00075% des Referenzwertes von 10 W/m^2 für die Allgemeinbevölkerung gemäß ICNIRP [13].

2.4.3 Gerät 3: PulsON Reference Design (Time Domain, Inc.)

Für den Zeitraum der Messungen wurde eine Datenübertragung mit 9,6 Mbit/s konstant aufrechterhalten.

Tabelle 2.5 fasst die Messergebnisse zusammen. Angegeben sind jeweils die Werte der mittleren äquivalenten Leistungsflussdichte $S_{\text{sequ, avg}}$ an den Punkten des Messrasters. Zusätzlich wird die aus der Messung mit PEAK-Detektor und MAXHOLD abgeschätzte maximale Feldstärkeamplitude \hat{E}_{max} an der Position der maximalen mittleren Leistungsflussdichte angegeben.

| PulsON Reference Design | | | | | | | | | | | |
|--|-----|---|-------|-------|--|-----|---|--------|-------|--|--|
| nicht-reflexive Umgebung | | | | | reflexive Umgebung | | | | | | |
| | | $S_{\text{sequ, avg}}$ [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] | | | | | $S_{\text{sequ, avg}}$ [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] | | | | |
| | | 15 cm | 30 cm | 45 cm | | | 15 cm | 30 cm | 45 cm | | |
| A | I | 93.81 | 56.34 | 41.15 | A | I | 177.22 | 106.02 | 82.03 | | |
| A | II | 86.60 | 57.77 | 42.22 | A | II | 191.61 | 111.99 | 84.71 | | |
| A | III | 71.64 | 45.14 | 35.28 | A | III | 131.38 | 90.24 | 74.81 | | |
| B | I | 154.10 | 74.96 | 46.29 | B | I | 250.26 | 119.40 | 84.09 | | |
| B | II | 222.72 | 81.65 | 47.24 | B | II | 322.40 | 125.03 | 90.10 | | |
| B | III | 76.41 | 53.07 | 38.40 | B | III | 109.24 | 92.68 | 76.69 | | |
| C | I | 103.44 | 56.42 | 42.28 | C | I | 179.76 | 102.13 | 74.81 | | |
| C | II | 116.69 | 63.42 | 43.26 | C | II | 194.32 | 110.41 | 84.71 | | |
| C | III | 78.03 | 46.39 | 35.52 | C | III | 130.22 | 84.95 | 71.44 | | |
| \hat{E}_{max} in Position B/II/15 cm: 0,75 V/m | | | | | \hat{E}_{max} in Position B/II/15 cm: 0,89 V/m | | | | | | |

Tabelle 2.5: Ergebnis der Immissionsmessungen mit dem PulsON reference Design

Die reflexiven Ausbreitungsbedingungen führen in diesem Fall zu einer Erhöhung der Immissionen um maximal ca. 3,5 dB.

Verglichen mit den Geräten 1 und 2 sind die (mittleren) Immissionen dieses Gerätes deutlich höher. Im Vergleich zum Belkin Cable Free USB Hub beträgt der Unterschied ca. einen Faktor 6,5 bezüglich der mittleren äquivalenten Leistungsflussdichte. Dies ist insofern plausibel, als die Ausgangsleistung des PulsON Gerätes deutlich über jener des Belkin Cable Free USB Hub liegt (vgl. Kapitel 2.3 in [2]).

Das absolute Ausmaß der Immissionswerte im Hinblick auf den Referenzwert für die Allgemeinbevölkerung nach ICNIRP [13] ist aber auch hier sehr gering. Der maximale Zeitmittelwert der Immissionen (Abstand von 15 cm) beträgt 322,4 $\mu\text{W}/\text{m}^2$, was gerade einmal ca. 0,0032% des genannten Referenzwertes für die Leistungsflussdichte entspricht.

Da es sich bei diesem Gerät um ein „echtes“ Impuls-basiertes UWB-Gerät handelt erscheint auch die Beurteilung der maximalen Feldstärkeamplitude interessant. Gemäß der Referenzwertfestlegung für Allgemeinbevölkerung nach ICNIRP [13] darf der Spitzenwert der Feldstärke nicht größer als das 32-fache des jeweils geltenden Referenzwertes sein². Im Frequenzbereich über 2 GHz liegt der Feldstärkegrenzwert bei 61 V/m. Demzufolge liegt die maximal zulässige Feldstärkeamplitude bei 1952 V/m. Die Messwerte aus Tabelle 2.5 zeigen eine maximale Feldstärkeamplitude (in 15 cm

² Gemäß dem Wortlaut in [13] gilt dies streng genommen für die über die Impulsdauer gemittelte Amplitude. Im Sinne eines konservativen Vergleichs wird hier im Folgenden jedoch die tatsächliche Feldstärkeamplitude (Spitzenwert) beurteilt.

Abstand zu Gerät) von 0,89 V/m, was ca. 0,046% der maximal zulässigen Feldstärkeamplitude entspricht. Umgelegt auf die äquivalente Leistungsflussdichte bedeutet dies ca. 0,00002% des maximal zulässigen Wertes.

2.4.4 Gerät 4: Ubisense Serie 7000 (Ubisense AG)

Alle durchgeführten Messungen erfolgten grundsätzlich mit der zum Zeitpunkt der Messungen maximal möglichen Update-Rate des Systems von ca. 10 Hz. Abbildung 2.8 zeigt qualitativ den Zeitverlauf des Immissionssignals, gemessen mit einem 7 GHz Oszilloskop (Tektronix TDS7704B) und Horn-Antenne in unmittelbarer Nähe zu einem Tag. Daraus ist erkennbar, dass das Tag 10 mal pro Sekunde HF-Pakete mit einer Länge von ca. 2 ms absetzt. Aus dem dritten Teilbild in Abbildung 2.8 ist ersichtlich, dass ein wesentlicher Anteil der in diesen HF-Paketen steckenden Leistung offensichtlich bei einer Frequenz von 2,4 GHz, also dem Kommunikationskanal liegt. Die ebenfalls abgesetzten UWB-Impulse sind diesem 2,4 GHz Signal offensichtlich überlagert und daher in Abbildung 2.8 nicht ohne weiteres erkennbar.

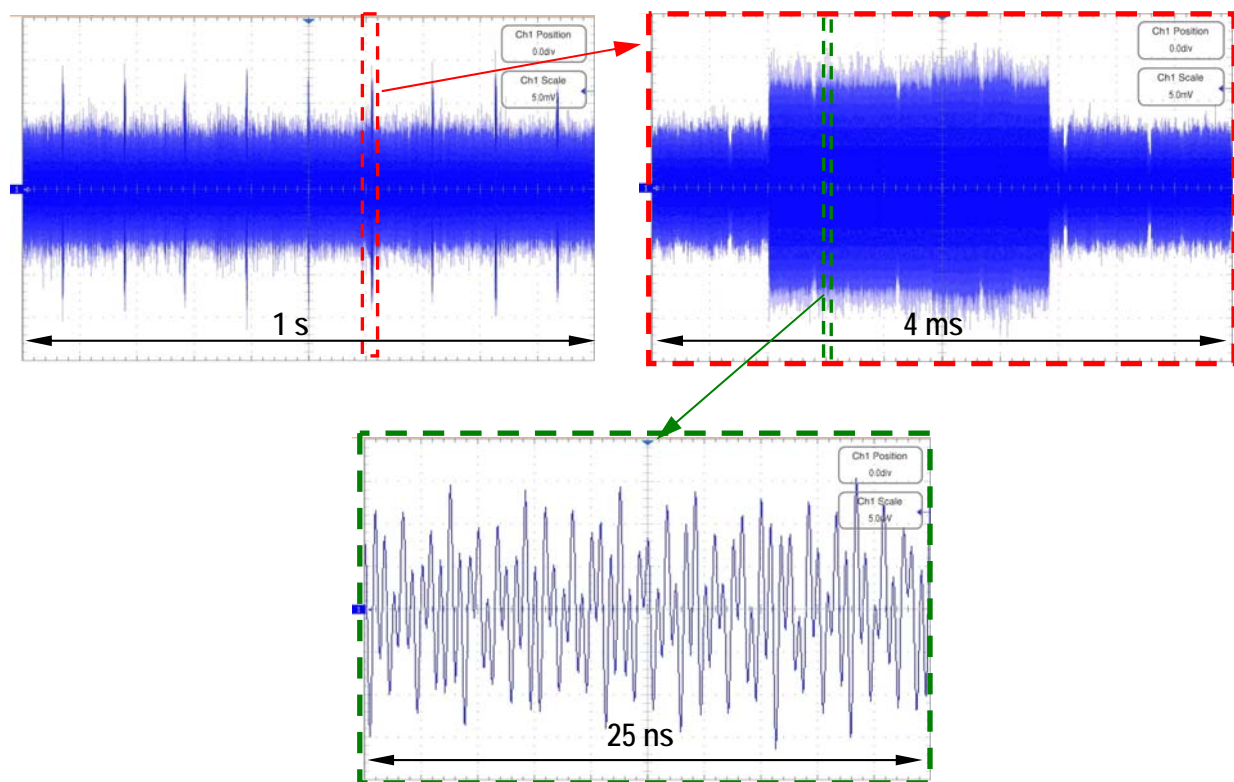


Abbildung 2.8: Qualitative Darstellung des Zeitverlauf des von den Ubisense 7000 Tags stammenden Immissionssignals, gemessen mit Antenne und 7 GHz-Oszilloskop

Die spektrale Dominanz des Kommunikationssignals zeigt auch das Ergebnis einer frequenzselektiven Überblicksmessung in 15 cm Abstand zu einem aktiven Tag (Abbildung 2.9). Daraus kann die Zusammensetzung des emittierten Spektrums ersehen werden. Neben den UWB-Emissionen im Frequenzbereich zwischen 6 und 8 GHz tritt der (schmalbandige) Kommunikationskanal bei ca. 2,4 GHz deutlich hervor. Eine weitere schmalbandige Komponente bei 4,8 GHz (offensichtlich eine Harmonische der 2,4 GHz Schwingung) ist ebenfalls zu erkennen. Der in Abbildung 2.9 am linken Rand erkennbare

Spektralanteil bei ca. 2,1 GHz stammt von einer nahe gelegenen Basisstation des UMTS Mobilfunknetzes (ca. 70 m Distanz).

Dass nicht nur im Kommunikationskanal, sondern auch bezüglich UWB eine Update-Rate von 10 Hz vorliegt, zeigt das in Abbildung 2.10 dargestellte Ergebnis einer Zero Span Messung bei ca. der Mittenfrequenz des UWB-Signals (7 GHz).

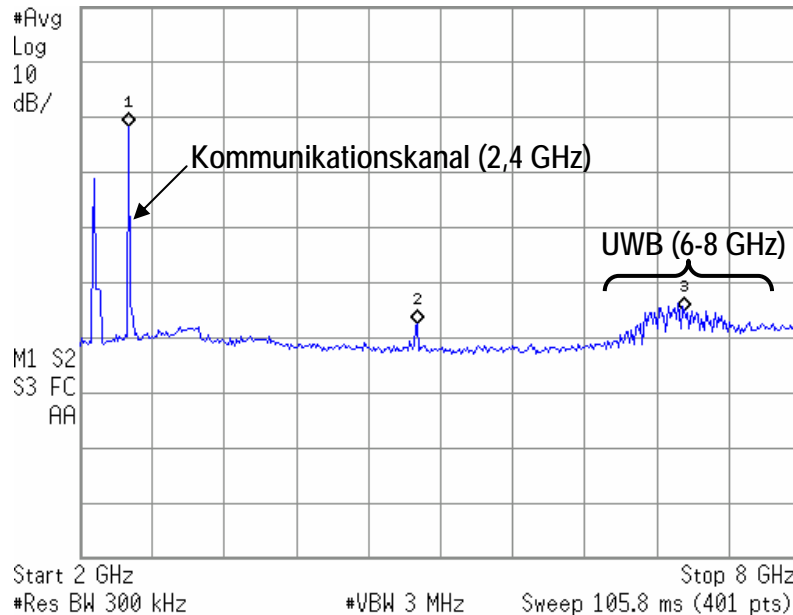


Abbildung 2.9: Spektrale Zusammensetzung (qualitativ) der Emissionen des Ubisense 7000 Tags. Die ganz links sichtbare Spektralkomponente stammt nicht vom Ubisense 7000 System, sondern von einer nahe gelegenen UMTS-Basisstation

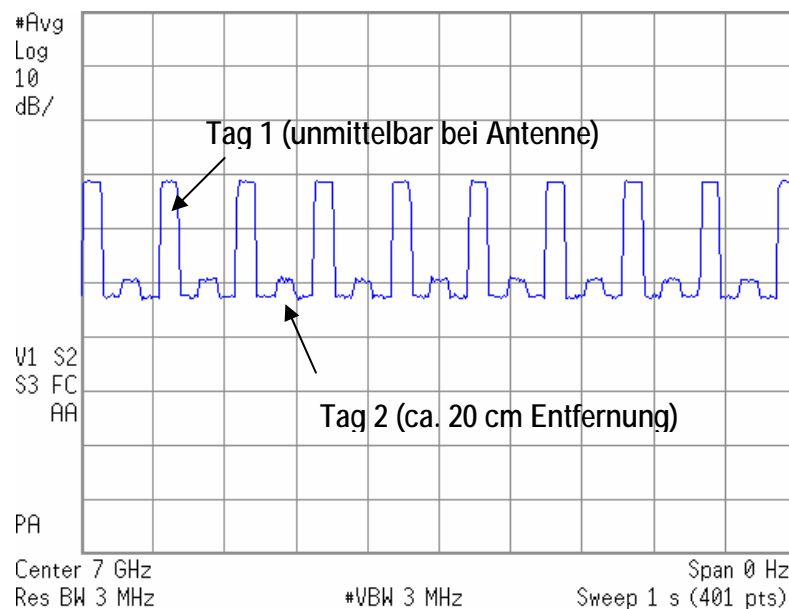


Abbildung 2.10: Zero Span Messung im UWB-Frequenzbereich des Ubisense 7000 Systems bei zwei gleichzeitig aktiven Tags, wobei sich Tag 1 unmittelbar vor der Empfangsantenne und Tag 2 in 20 cm Entfernung zur Empfangsantenne befand. Zu erkennen ist die Update-Rate von 10 Hz für jedes Tag.

Abbildung 2.11 zeigt qualitativ Detaildarstellungen des UWB-Kanals und des Kommunikationskanals im Frequenzbereich.

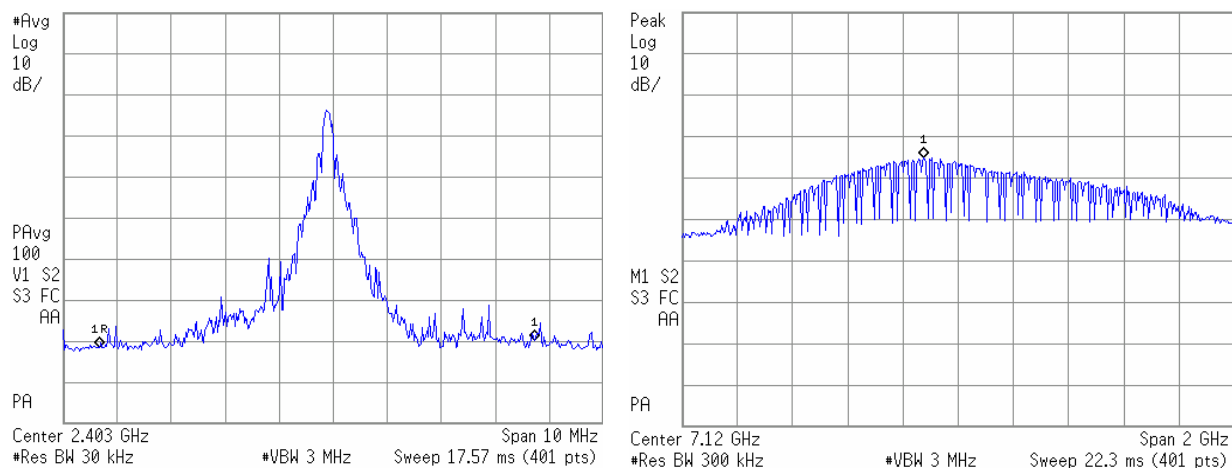


Abbildung 2.11: Qualitative Detail-Darstellung des 2,4 GHz Kommunikationskanals (links) und des UWB-Kanals (rechts) des Ubisense 7000 Systems

Die quantitative Erfassung der Maximalimmissionen erfolgte in der Art, dass zunächst ein zufällig ausgewähltes Tag auf einem Tisch in unterschiedlichen Lagen positioniert wurde und jeweils Messungen in 15 cm Abstand durchgeführt wurden, um die Haupt-Abstrahlrichtung des Tags zu identifizieren. Anschließend wurden in Hauptstrahlrichtung die mittleren und die Maximalimmissionen, mit den in Kapitel 2.3 angegebenen Messgeräteeinstellungen, in Abständen von 15 cm, 30 cm und 50 cm zum Tag gemessen. Um Unterschiede zwischen einzelnen Tags abzuschätzen, wurde die Maximalwertsuche in 15 cm Abstand auch mit zwei weiteren Tags wiederholt. Schließlich erfolgte eine Abschätzung des Einflusses reflexiver Umgebungsbedingungen auf die Maximalimmissionen, indem in unmittelbarer Nähe des Tags (ca. 20 cm Abstand) Metallplatten in unterschiedlichen Anordnungen angeordnet wurden (unterhalb, links, rechts und hinter dem Tag). In Tabelle 2.6 sind die Messergebnisse in Form der äquivalenten Strahlungsleistungsdichten $S_{\text{equ,avg}}$ und $S_{\text{equ,max}}$ (jeweils in $\mu\text{W}/\text{m}^2$) zusammengefasst. Der Index „avg“ bezeichnet dabei zeitlich gemittelte Werte (zeitlich gemittelte BandPower Funktion), der Index „max“ Maximalwerte der effektiven Leistung im betrachteten Frequenzband (MaxHold-Werte der BandPower Funktion).

Zur Abschätzung der maximalen UWB-Impulsamplitude wurde eine zusätzliche Messung mit PEAK-Detektor im MaxHold Modus des Spektrumanalysators durchgeführt (RBW 3 MHz, VBW 3 MHz). Nach entsprechender Bandbreitenkorrektur (-10 dB Signalbandbreite = 1,7 GHz, vgl. Abbildung 2.11 rechts) ergab sich in 15 cm Abstand zu Tag 1 ein Maximalwert der Impulsamplitude von ca. 0,96 V/m.

Der Einfluss reflexiver Umgebungsbedingungen auf die UWB-Immissionen war relativ gering und lag in den untersuchten Messpositionen durchwegs bei weniger als ± 2 dB. Insgesamt zeigen die Messergebnisse, sogar bei sehr geringen Abständen (>15 cm) zu den UWB-Geräten erwartungsgemäß sehr geringe Immissionswerte in der Größenordnung von maximal 10-15 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ bezüglich der äquivalenten mittleren Strahlungsleistungsdichte der UWB-Emissionen. Dies entspricht weniger als 0,000015% des Referenzwertes für die Allgemeinbevölkerung nach ICNIRP [13] von 10 W/m^2 . Wollte man nicht ausschließlich die UWB-Immissionen beurteilen, sondern das gesamte Gerät, so ist zum UWB-Immissionsanteil auch der Immissionsanteil des Kontrollkanals

hinzuzuzählen. In diesem Fall ergibt sich die maximale, in 15 cm Abstand ermittelte Gesamtimmission (äquivalente mittlere Strahlungsleistungsdichte, Tag 3) zu ca. 0,00002% des Referenzwertes.

| | | d=15 cm | | d=30 cm | | d=50 cm | |
|----------|---|------------------|----------------------------|------------------|----------------------------|------------------|----------------------------|
| | | UWB (6-8 GHz) | Kontrollkanal (2,4 GHz) | UWB (6-8 GHz) | Kontrollkanal (2,4 GHz) | UWB (6-8 GHz) | Kontrollkanal (2,4 GHz) |
| Tag 1 | Sequ, avg [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] | 8.89 | 6.24 | 3.8 | 1.78 | 2.17 | 0.51 |
| | Sequ, max [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] | 32.56 | 15.75 | 9.9 | 3.3 | 5.7 | 0.83 |
| Tag 2 | Sequ, avg [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] | 7.66 | 5.13 | - | - | - | - |
| | Sequ, max [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] | 24.64 | 11.64 | - | - | - | - |
| Tag 3 | Sequ, avg [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] | 11.13 | 7.98 | - | - | - | - |
| | Sequ, max [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] | 36.52 | 17.07 | - | - | - | - |

Tabelle 2.6: Immissionen in der Nähe der untersuchten Ubisense Tags

3 NUMERISCHE BERECHNUNGEN DER EXPOSITION DURCH UWB-ANWENDUNGEN

Zusätzlich zu den im vorangegangenen Kapitel beschriebenen messtechnischen Immissionserhebungen in der Umgebung konkreter UWB Geräte, wurden auch numerische Berechnungen der Exposition, auf Basis von Computersimulationen durchgeführt. Einerseits sind numerische Berechnungen der einzige Weg, um einen detaillierten Einblick in die Absorptionsverhältnisse im Gewebe bei UWB-Befeldung zu gewinnen. Andererseits können auf Basis dieser Berechnungen auch Prognosen für die Exposition durch UWB-Geräte (mit unterschiedlichen emittierten Signalspektren) erfolgen, die derzeit (zumindest in Europa) noch nicht verfügbar sind.

3.1 Betrachtete Szenarien

Die Auswahl der betrachteten Szenarien erfolgte mit Schwerpunkt auf Situationen, bei denen ein UWB Sendegerät unmittelbar am Körper getragen wird. Da gerade solche Geräte derzeit jedoch noch kaum verfügbar sind, wurden mehrere unterschiedliche Expositionsszenarien gewählt, wie sie aus heutiger Sicht, teilweise basierend auf konkreten Produktankündigungen, als realistisch eingestuft werden können. Weiters wurde bei der Auswahl der unterschiedlichen Szenarien darauf geachtet, unterschiedliche Anwendungen zu wählen, die möglichst unterschiedliche Körperregionen exponieren. Für die konkret gewählten, insgesamt 4 unterschiedlichen „Nahfeld“-Szenarien sind dies der Oberschenkelbereich (Szenario 1), der Hinterkopfbereich (Szenario 2), der Bereich eines Auges (Szenario 3), sowie der Brustbereich über dem Herzen (Szenario 4).

Zusätzlich zu den Szenarien mit unmittelbar am Körper betriebener UWB-Quelle, wurde auch ein Szenario mit mehreren gleichzeitig betriebenen UWB Sendegeräten betrachtet, bei dem sich die Person im Einwirkungsbereich von 3 UWB-Quellen befindet (Szenario 5).

Die detaillierte Beschreibung der betrachteten Szenarien erfolgt in jeweiligen Kapiteln in Abschnitt 3.4.

3.2 Berechnungsmethode

Alle numerischen Berechnungen erfolgten unter Anwendung der FDTD-Methode in Form der kommerziellen Simulationsplattform SEMCAD X (Version 13.2). Dieses Softwarepaket erlaubt die Anregung mit Breitbandsignalen und die Berücksichtigung der dispersiven Gewebeeigenschaften (vgl. Kapitel 3 in [2]). Die Berechnung der resultierenden SA bzw. SAR aus den Zeitbereichs-Ergebnisdaten erfolgte in MATLAB (Version 7.4), da gegenwärtig kommerziell verfügbare FDTD-Simulationsplattformen diesbezüglich (noch) keine Möglichkeiten bieten.

3.2.1 Feldquellen-Modelle

Antennenmodell 1

Für alle betrachteten Expositionsszenarien wurde als Feldquelle ein Modell der in [14] beschriebenen planaren UWB Antenne verwendet, die einfach als gedruckte Schaltung

realisierbar ist und deren -7 dB Bandbreite den Frequenzbereich von 3,0-12,3 GHz überstreicht. Abbildung 3.1 zeigt die Geometrie der verwendeten Breitbandantenne und Abbildung 3.2 den Frequenzgang des S11 Parameters.

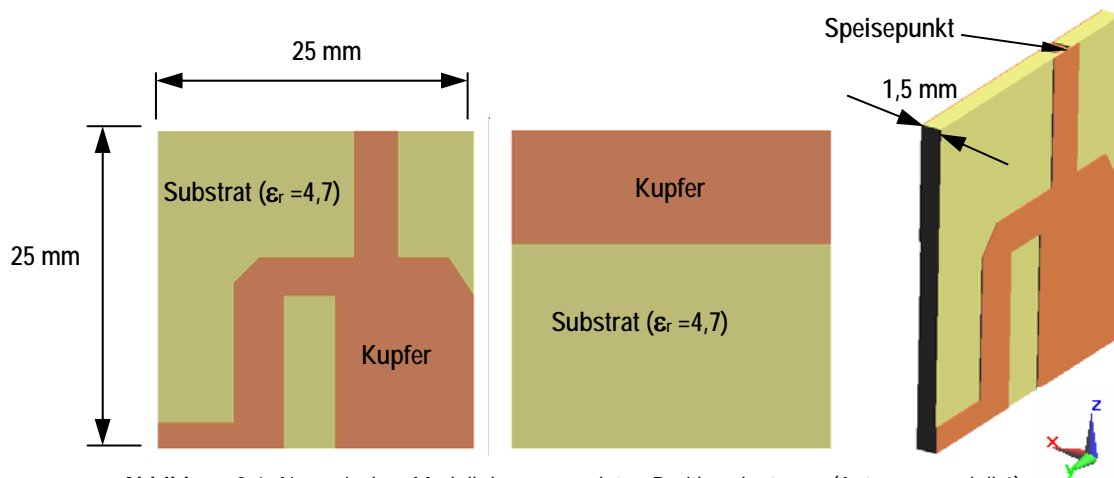


Abbildung 3.1: Numerisches Modell der verwendeten Breitbandantenne (Antennenmodell 1): Vorderseite (links), Rückseite (Mitte), 3D-Ansicht (rechts)

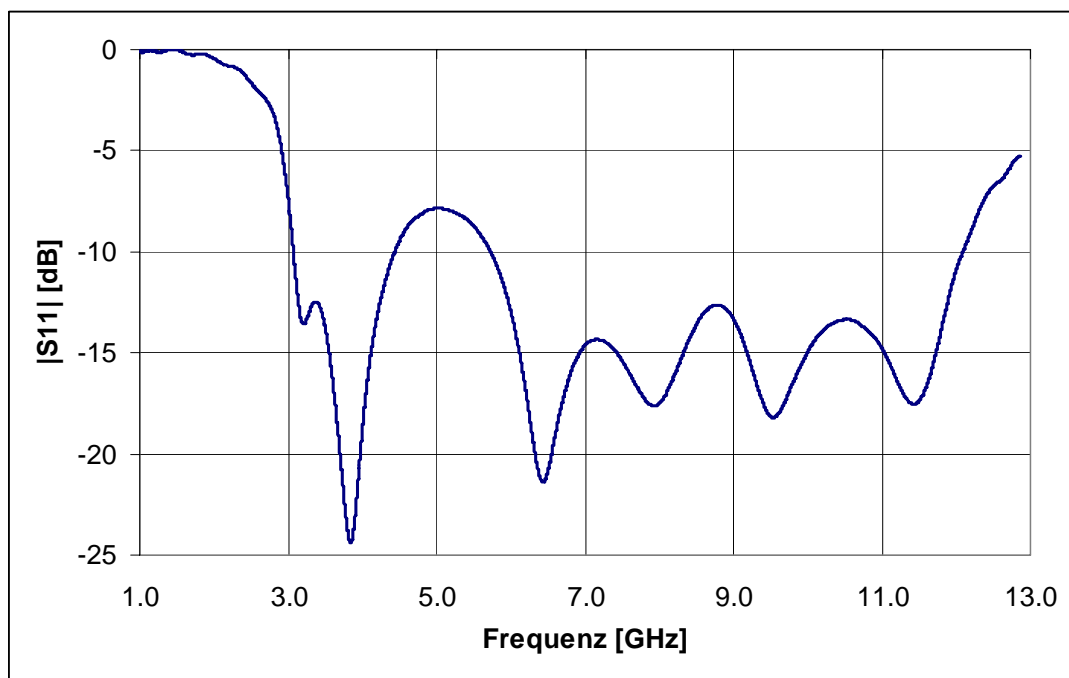


Abbildung 3.2: |S11| der verwendeten Breitbandantenne (Antennenmodell 1)

Für Expositionssituationen im Fernfeld der Strahlungsquelle ist auch die Abstrahlcharakteristik (Antennenpattern) relevant.

Abbildung 3.3 zeigt 3D-Darstellungen der Abstrahlcharakteristika des verwendeten Breitband-Antennenmodells in unterschiedlichen Ansichten, jeweils am unteren Bandende, bei der Mittenfrequenz und am oberen Bandende des betrachteten Frequenzbereichs. Der maximale Antennengewinn über den gesamten Frequenzbereich 3,1-10,6 GHz liegt im Bereich zwischen 2,7 dBi (bei 3,1 GHz) und 5,2 dBi (bei 10,6 GHz).

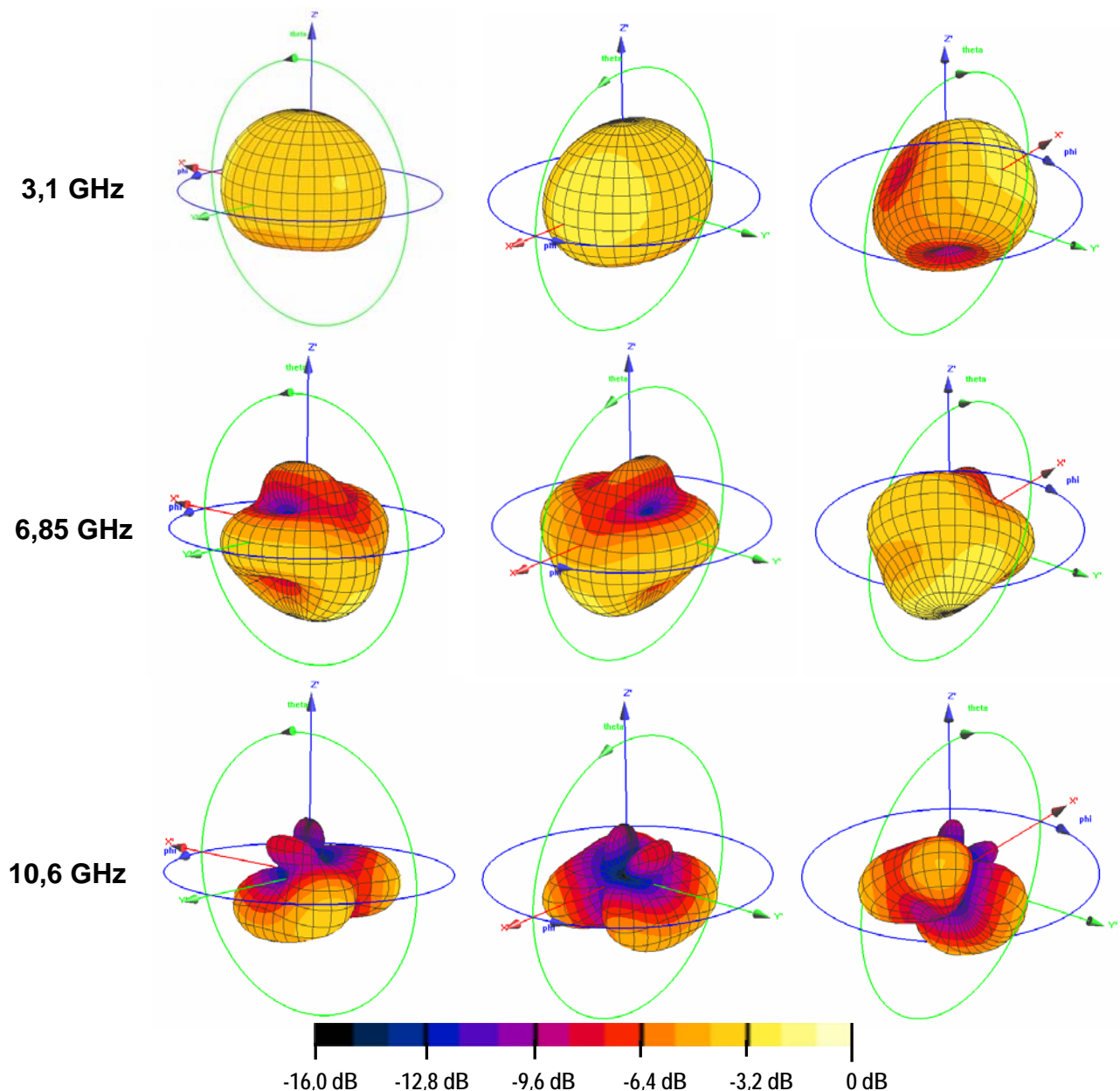


Abbildung 3.3: 3D-Abstrahlcharakteristika des verwendeten Breitband-Antennenmodells in unterschiedlichen Ansichten und bei unterschiedlichen Frequenzen

Antennenmodell 2

Um den Einfluss unterschiedlicher Antennen geometrien bzw. Antennenkonzepte auf die resultierende Absorption abschätzen zu können, wurde in einem der betrachteten Szenarien (Szenario 4) zusätzlich zum oben beschriebenen Antennenmodell 1 noch ein weiteres Quellenmodell betrachtet. Dieses Modell wurde in Anlehnung an die Antennen des auch messtechnisch untersuchten Belkin Cable Free USB-Hubs modelliert. Abbildung 3.4 zeigt die Geometrie und Abbildung 3.5 den Frequenzgang von $|S_{11}|$ des Modells. Erwartungsgemäß liegt der Nutzfrequenzgang der Antenne im Arbeitsfrequenzbereich des Belkin Cable Free USB-Hubs (3,1 - 4,8 GHz).

Abbildung 3.6 zeigt 3D-Darstellungen der im Nutzfrequenzgang sich nur wenig ändernden Abstrahlcharakteristik des Antennenmodells 2 in unterschiedlichen Ansichten. Der maximale Antennengewinn über den gesamten Frequenzbereich 3,1-4,8 GHz liegt im Bereich zwischen 2,2 dBi (bei 3,1 GHz) und 3,3 dBi (bei 4,8 GHz).

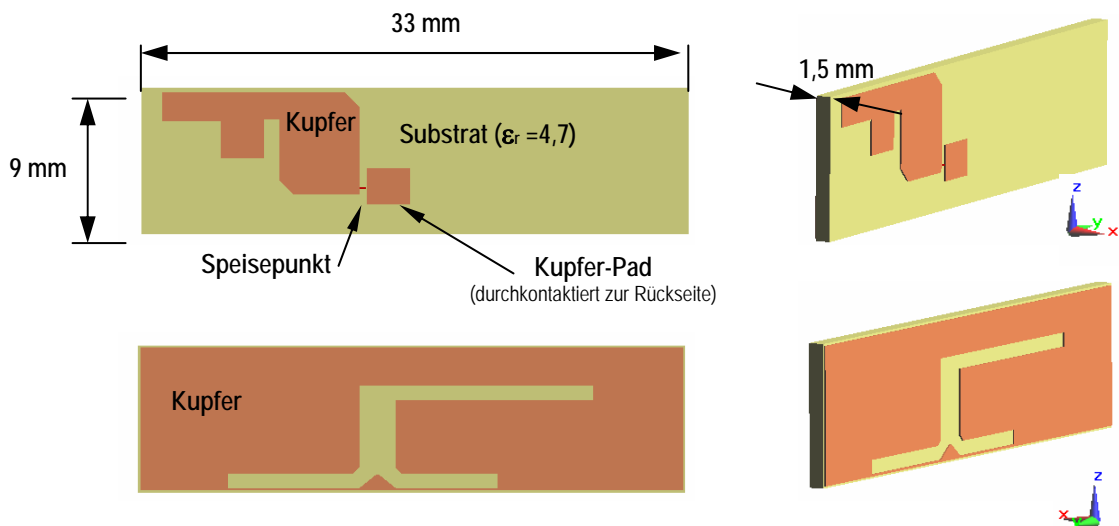


Abbildung 3.4: Numerisches Modell des Antennenmodells 2: Vorderseite (oben) und Rückseite (unten) in Draufsicht (links) und 3D-Ansicht (rechts).

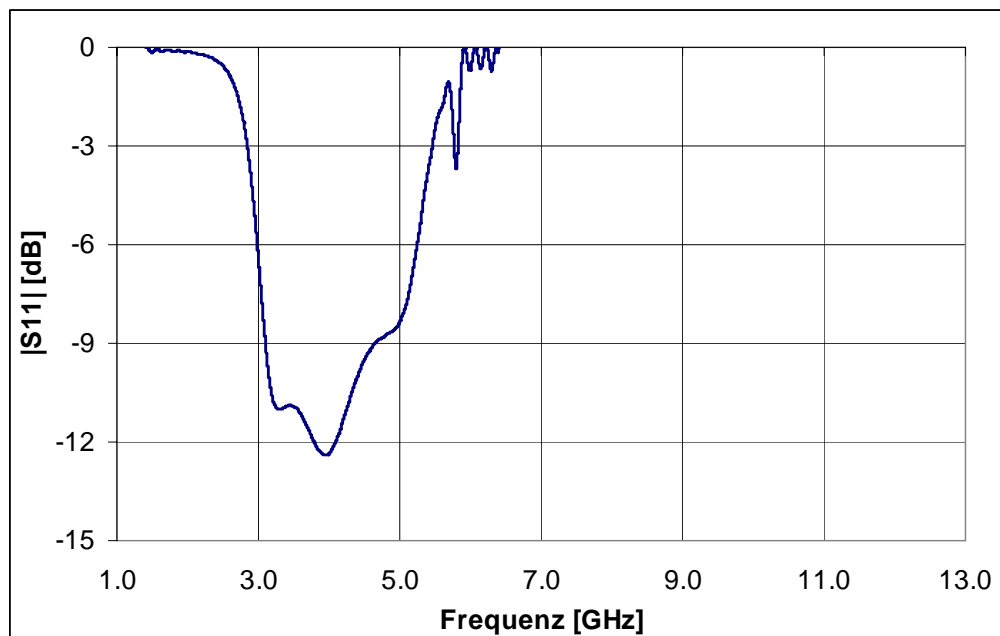


Abbildung 3.5: $|S_{11}|$ der Antennenmodells 2

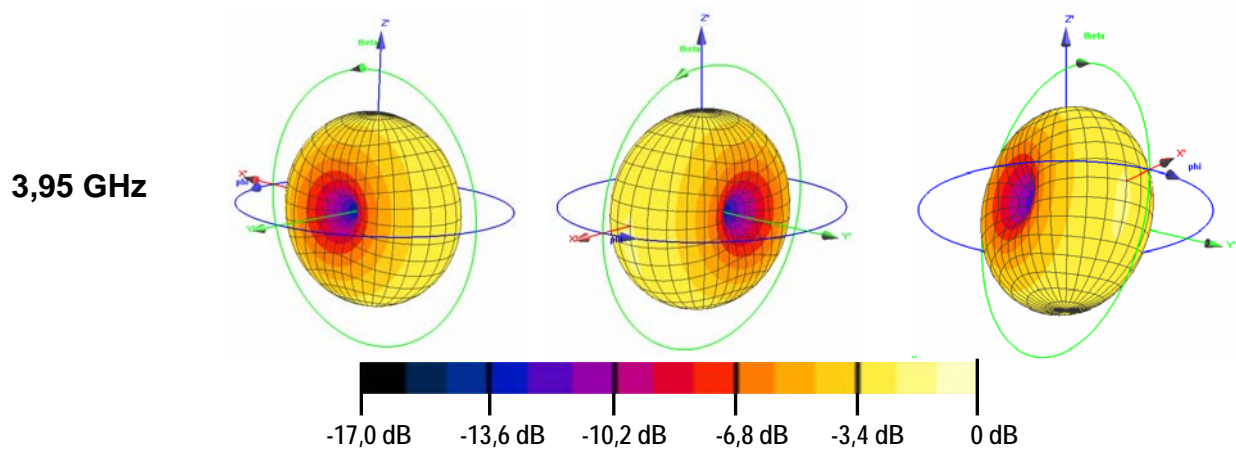


Abbildung 3.6: 3D-Abstrahlcharakteristik des Antennenmodells 2 bei der Mittenfrequenz in unterschiedlichen Ansichten

3.2.2 Berechnungsmethode für unterschiedliche spektrale Anregungen

Die unterschiedlichen zu erwartenden UWB Anwendungen werden naturgemäß unterschiedliche Sub-Frequenzbereiche des zur Verfügung stehenden Frequenzbandes von 3,1-10,6 GHz nutzen, bzw. unterschiedliche spektrale Verteilungen (Impulsformen) der emittierten Signale verwenden. Aus diesem Grund wurden auch die Absorptionsverhältnisse in den unterschiedlichen Szenarien, jeweils für mehrere, spektrale Verteilungen der Sendeleistung analysiert. Dazu wurde jedes betrachtete Szenario zunächst mit einer entsprechend breitbandigen, den gesamten betrachteten UWB-Frequenzbereich von 3,1-10,6 GHz abdeckende Anregung der Antenne (Antennenmodell 1) berechnet. Dadurch konnte jeweils für jedes betrachtete Szenario eine „vollständige Frequenzantwort“ der Absorptionsverteilung, $SAR(x,y,z,f)$ bzw. $SA(x,y,z,f)$, über den gesamten interessierenden UWB-Frequenzbereich gewonnen werden. Auf Basis dieser Absorptions-Frequenzantwort und der zugehörigen spektralen Verteilung der abgestrahlten Sendeleistung $P_t(f)$ war es möglich die Absorptionsverteilung für beliebige spektrale Sendeleistungsverteilungen innerhalb von 3,1 bis 10,6 GHz zu berechnen. Dass diese Vorgehensweise bei hinreichend hoher Frequenzauflösung ohne relevante Erhöhung der numerischen Unsicherheiten möglich ist, wird anhand des folgenden Beispiels demonstriert. Betrachtet wird dabei das bereits in [2] behandelte Modell eines ebenen geschichteten Gewebeblocks, der mit einer ebenen Welle beaufschlagt wird (Abbildung 3.7).

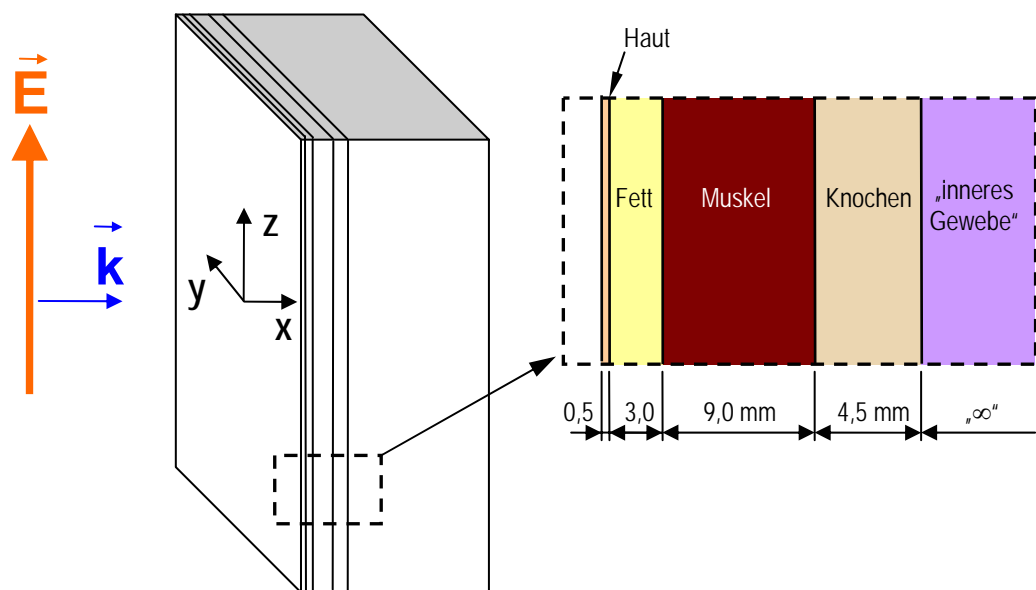


Abbildung 3.7: Schematische Darstellung des ebenen Schichtenmodells

Unter Berücksichtigung dispersiver Gewebeparameter werden zwei unterschiedliche spektrale Verteilungen der einfallenden ebenen Welle, gemäß den in Abbildung 3.8 dargestellten Zeitverläufen der elektrischen Feldstärke betrachtet. Die Breitbandanregung mit normierter Amplitude 1 erstreckt sich über den gesamten Frequenzbereich von 3,1-10,6 GHz (Mittelfrequenz 6,85 GHz). Die Subbandanregung mit Mittelfrequenz 3,95 GHz ist wesentlich schmalbandiger und hat eine etwas höhere Amplitude als der Breitbandimpuls. Abbildung 3.9 zeigt die spektrale Verteilung der Leistungsflussdichten für die beiden Anregungsfälle.

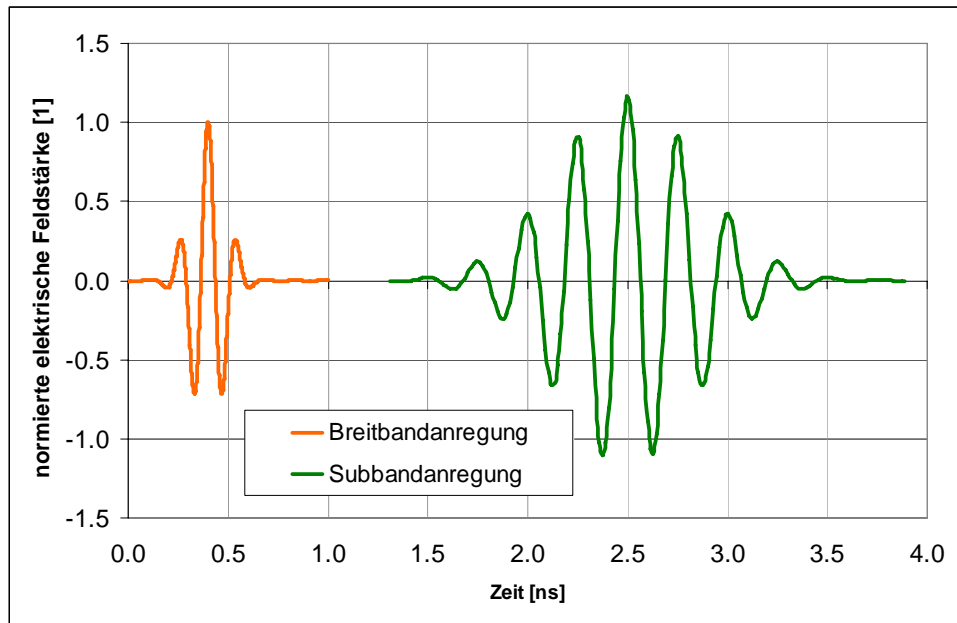


Abbildung 3.8: Zeitverläufe der beiden betrachteten Anregungen (normierte elektrische Feldstärke)

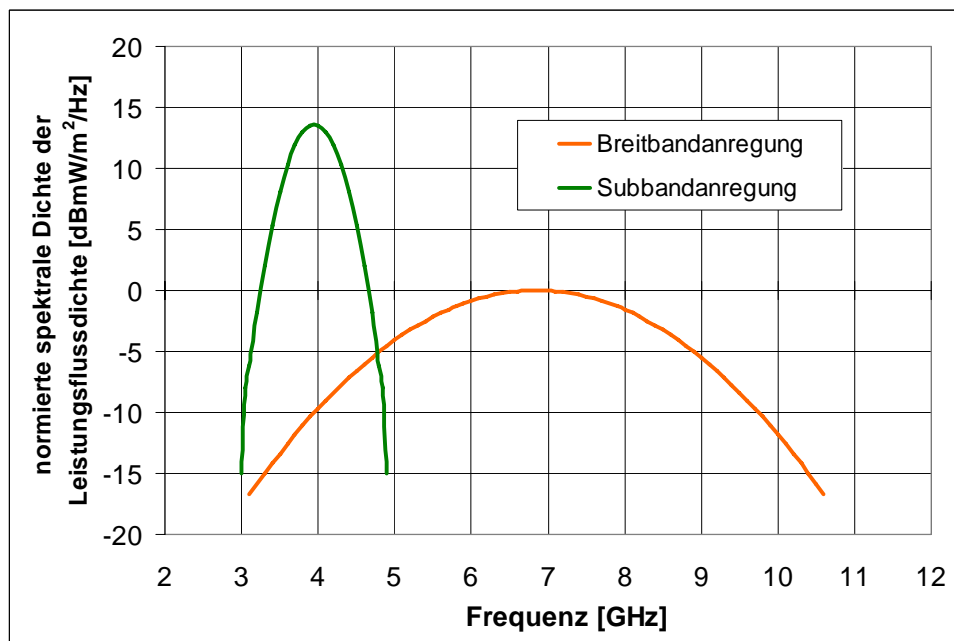


Abbildung 3.9: Normierte spektrale Verteilung der Leistungsflussdichte der einfallenden ebene Welle für das Breitbandsignal und das Subbandsignal

Gemäß der obigen Ausführungen, kann aus einer Berechnung mit der Breitbandanregung die vollständige Frequenzantwort der Absorptionsverteilung im Frequenzbereich 3,1-10,6 GHz ermittelt werden, die als Grundlage für die Umrechnung („Skalierung“) der Ergebnisse auf jede beliebige andere Anregungsform im betrachteten Frequenzbereich dient. Abbildung 3.10 zeigt den Verlauf der Berechnungsergebnisse für die auf den Maximalwert bei Breitbandanregung normierte Absorption entlang der x-Achse (vgl. Abbildung 3.7). Dargestellt sind einerseits die aus unabhängigen FDTD-Berechnungen stammenden Ergebnisse für Breitbandanregung und Subbandanregung und andererseits das Ergebnis der Skalierung der Frequenzantwort auf die Verhältnisse

entsprechend der Subbandanregung auf Grundlage des Verhältnisses der spektralen Verteilung der Anregungssignale.

Bei hinreichend hoher Frequenzauflösung (hier konkret 1 MHz) bleiben die numerischen Unsicherheiten der Skalierungsmethode auf deutlich unter 1% beschränkt.

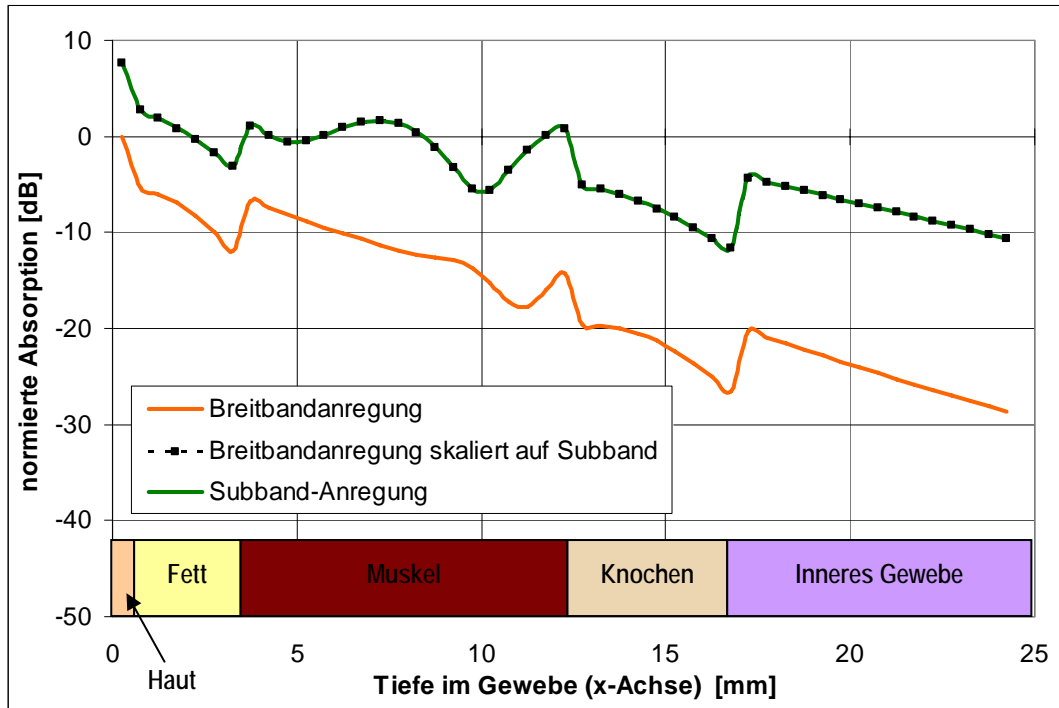


Abbildung 3.10: Vergleich von Berechnungsergebnissen für die normierte Absorption entlang der x-Achse (vgl. Abbildung 3.7). Dargestellt sind die FDTD-Berechnungsergebnisse für Breitbandanregung und Subbandanregung, sowie das Ergebnis der Umrechnung der Breitbandergebnisse (Frequenzantwort) auf Subbandanregung auf Grundlage des Verhältnisses der spektralen Verteilung der Anregungssignale.

3.2.3 Konkret betrachtete spektrale Anregungsformen

Da von den zukünftigen UWB-Anwendungen zu erwarten ist, dass sie produktspezifisch unterschiedliche Sub-Frequenzbänder im zur Verfügung stehenden UWB-Frequenzbereich benutzen werden, wurden auch für die numerischen Absorptionsberechnungen mehrere unterschiedliche spektrale Anregungsformen betrachtet. Neben Anregungsformen mit Gauß-förmigen Impulsen wurden für „worst case“-Abschätzungen auch unterschiedliche „theoretische“ Anregungsformen mit 100%iger Ausnutzung der Spektralmaske der Funkregulierungen [4], [5] bzw. der Sendespektralmaske des WiMedia-Standards [6], [7] berücksichtigt.

Drei unterschiedliche Gauß-Impulsanregungen mit Quellen-Leerlaufspannungen gemäß Gleichung 3.1 wurden betrachtet.

$$U(t) = U_0 * e^{-\left(\frac{t-t_0}{\tau}\right)^2} * \cos(2\pi * f_c * (t - t_0)) \quad (3.1)$$

Für die spezifische Absorptionsrate SAR im Sinne der gegenwärtigen Sicherheitsrichtlinien zum Schutz vor HF-Strahlung ist die zeitlich gemittelte spektrale

Sendeleistungsdichte maßgeblich, die gemäß den Regulierungsvorgaben ([4] [5]) in den nutzbaren Frequenzbereichen mit maximal $-41,3 \text{ dBm/MHz}$ EIRP begrenzt ist. Für Impulsquellen bedeutet dies, dass bei größerer mittlerer Impulswiederholzeit (d.h. bei seltener ausgesendeten Impulsen), die Impulsamplitude größer sein darf als bei kleinerer Impulswiederholzeit (häufiger ausgesendete Impulse). Um elektromagnetische Beeinflussungen zu verhindern, schreibt die UWB-Regulierung jedoch auch eine Grenze für die maximale Impulsamplitude, in Form eines Maximalwertes der spektralen Dichte der Spitzensendeleistung vor. Gemäß [4] und [5] ist diese in den nutzbaren Frequenzbereichen mit maximal 0 dBm/50MHz EIRP begrenzt.

Unter der Annahme einer Quellen- und Lastimpedanz (Antenneneingangsimpedanz) von jeweils 50Ω und einem Antennengewinn von 0 dBi führen die in Tabelle 3.1 zusammengefassten Impulsparameter auf regulierungskonforme mittlere Sendeleistungsdichten von maximal $-41,3 \text{ dBm/MHz}$ EIRP. U_0 bezeichnet dabei die Quellenleerlaufspannungs-Impulsamplitude, t_r die mittlere Impulswiederholzeit, f_c die Mittenfrequenz und τ die, die Impulsbreite bestimmende Zeitkonstante der Gauß-Impulsform (vgl. Gleichung 3.1). Zusätzlich ist in Tabelle 3.1 jeweils die zugehörige mittlere Gesamtleistung P_{tot} (Integral über die spektrale Leistungsdichtefunktion) angegeben, sowie die spektrale Effizienz e bezüglich einer maximalen Ausnutzung (d.h. vollständiges „Ausfüllen“ des Bereiches unterhalb der Spektralmaske der Regulierung). Die Wahl dieser Anregungsformen und deren Bezeichnung erfolgte im Hinblick auf repräsentative Belegungen des Spektrums, wie sie von typischen Geräten, konform zur FCC-Regulierung [5] bzw. zur Regulierung in Deutschland [4], zu erwarten sind.

| Bezeichnung | $U_0 / \sqrt{t_r}$ | f_c | τ | P_{tot} | e |
|------------------------------|-------------------------------|-------|--------|------------------|-----|
| | $[\text{V} / \text{s}^{1/2}]$ | [GHz] | [ns] | $[\mu\text{W}]$ | [%] |
| „FCC 3,1-10,6 typisch“ | 33658 | 6,85 | 0,091 | 323 | 58 |
| „Vfg 1/2008 3,4-4,8 typisch“ | 3686 | 4,10 | 0,830 | 35,3 | 34 |
| „Vfg 1/2008 6,0-8,5 typisch“ | 6945 | 7,31 | 0,440 | 66,5 | 36 |

Tabelle 3.1: Gewählte Impulsparameter für die numerischen SAR-Berechnungen

Abbildung 3.11 und Abbildung 3.12 zeigen jeweils die Impulsformen und die spektrale EIRP Sendeleistungsdichte der in Tabelle 3.1 definierten Anregungsformen. Anzumerken ist, dass die Anregung „Vfg 1/2008 3,4-4,8 typisch“ in dieser Form nach [4] nur für Geräte mit Störminderungstechniken zulässig ist.

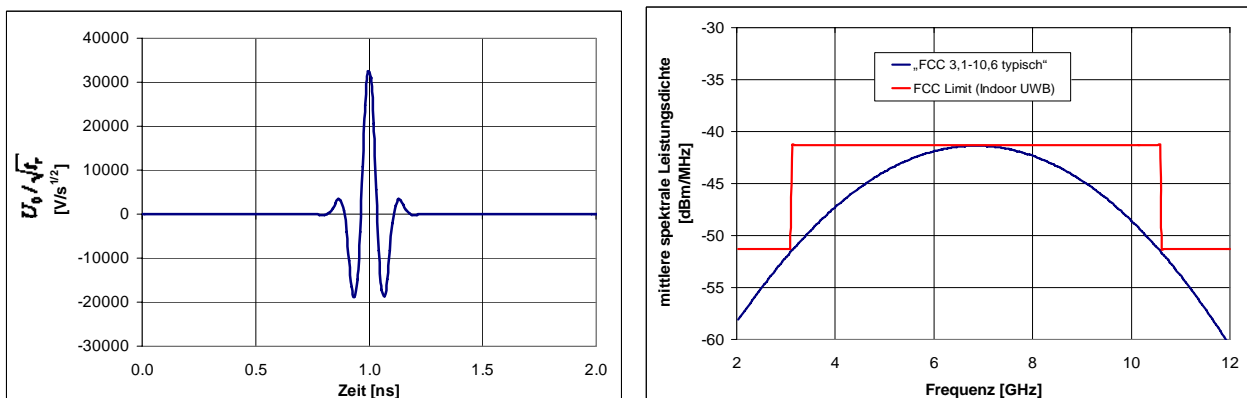


Abbildung 3.11: Impulsform und mittlere spektrale EIRP Sendeleistungsdichte der Anregung „FCC 3,1-10,6 typisch“

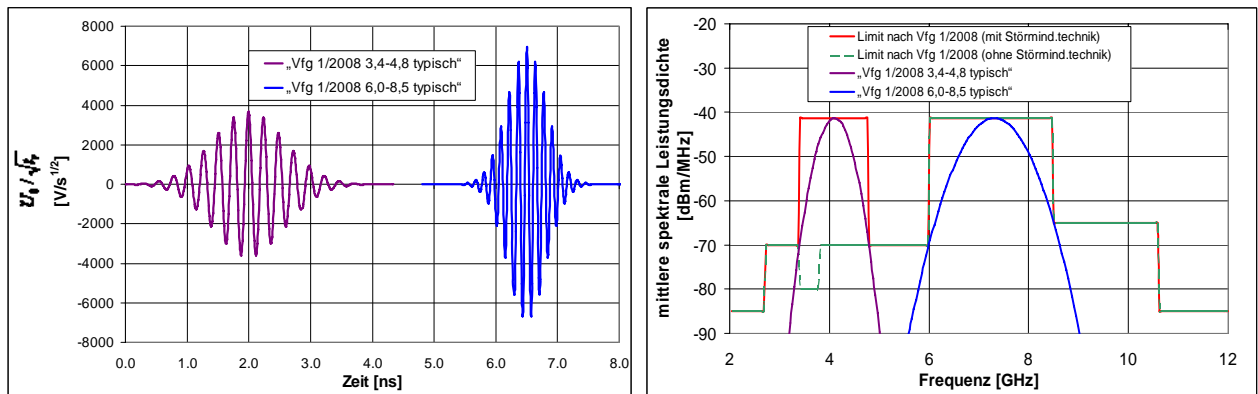


Abbildung 3.12: Impulsform und mittlere spektrale EIRP Sendeleistungsdichte der Anregungen „Vfg 1/2008 3,4-4,8 typisch“ und „Vfg 1/2008 6,0-8,5 typisch“

Im Gegensatz einer SAR-basierten Analyse der Exposition ist als Basis für die Beurteilung von UWB-Immissionen hinsichtlich der spezifischen Absorption SA nicht die zeitlich gemittelte Sendeleistung einer Impulsfolge, sondern der Energieinhalt des Einzelimpulses relevant. Wie bereits oben erläutert, ist die im Hinblick auf die Funkregulierung maximal zulässige Impulsamplitude durch den Maximalwert der spektralen Dichte der Spitzensendeleistung von $0 \text{ dBm}/50\text{MHz}$ EIRP festgelegt. Im Hinblick auf die Emissionen von UWB-Geräten ist dabei zu beachten, dass die spektrale Dichte der Spitzenleistung einer Impulsfolge deutlich oberhalb der Spitzenleistungsdichte des entsprechenden Einzelimpulses liegt, da sich die Leistung im Spektrum an „einzelnen Frequenzpunkten“ im Abstand der Impulswiederholzeit (=Kehrwert der Impulswiederholzeit) konzentriert (vgl. dazu Kapitel 2.3.1 in [1]). Für streng periodische Impulsfolgen (d.h. konstante Impulswiederholzeit) kann dies zu einem Verhältnis von Spitzenleistung zu mittlerer Leistung (Crest-Faktor) von mehreren Zehnerpotenzen führen. Um die mit hohem Crest-Faktor verbundenen Nachteile zu verringern, verwenden UWB-Geräte üblicherweise keine konstante Impulswiederholzeit, sondern senden mit einer um einen bestimmten Mittelwert schwankenden Impulswiederholzeit. Damit lassen sich Crest-Faktoren von unter 10 dB erreichen. Im Sinne einer (aus praktischer Sicht daher mit mehreren dB Sicherheitsabstand behafteten) worst case Abschätzung der maximalen von einem UWB-Gerät verursachten SA kann somit von einem Einzelimpuls ausgegangen werden, dessen Spitzensendeleistungsdichte gerade noch unterhalb von $0 \text{ dBm}/50 \text{ MHz}$ liegt. Für die oben definierten Impulsformen führen die in Tabelle 3.2 angeführten Quellenleerlaufspannungs-Impulsamplituden U_0 auf diese maximal zulässige spektrale EIRP-Spitzensendeleistungsdichte von $0 \text{ dBm}/50\text{MHz}$. Dies gilt in einem 50Ω System, wieder unter der Annahme von 0 dBi Antennengewinn und 100% Antenneneffizienz (keine Verluste in der Antenne). Weiters gibt Tabelle 3.2 jeweils den Gesamtenergieinhalt E_{tot} (Integral über das Energiedichtespektrum) dieser Einzelimpulse an.

| Bezeichnung | U_0 | E_{tot} |
|------------------------------|-------|-----------------------|
| | [V] | [J] |
| „FCC 3,1-10,6 typisch“ | 55,5 | $8,79 \cdot 10^{-10}$ |
| „Vfg 1/2008 3,4-4,8 typisch“ | 7,9 | $1,62 \cdot 10^{-10}$ |
| „Vfg 1/2008 6,0-8,5 typisch“ | 12,7 | $2,22 \cdot 10^{-10}$ |

Tabelle 3.2: Maximal zulässige Leerlauf-Quellenspannungs-Impulsamplituden (in einem 50Ω System) der in Tabelle 3.1 definierten Impulsformen, die auf maximale spektrale EIRP-Spitzensendeleistungsdichten eines Einzelimpulses von $0 \text{ dBm}/50\text{MHz}$ führen.

Die in Kapitel 3.4 zusammengefassten Ergebnisse hinsichtlich der maximal von regulierungskonformen UWB-Geräten verursachten SA im Körper beruhen auf Berechnungen mit den in Tabelle 3.2 definierten Leerlauf-Quellenspannungs-Impulsamplituden.

Zusätzlich zu den Berechnungen basierend auf den oben beschriebenen Anregungsformen wurden SAR und SA Berechnungen für idealisierte Sendeleistungsdichtespektren mit maximaler spektraler Effizienz, d.h. bei kompletter Ausfüllung der Spektralmaske bzw. eines Subbereiches einer Spektralmaske durchgeführt. Tabelle 3.3 zeigt eine Zusammenfassung dieser Spektren und gibt auch den Wert der jeweils damit theoretisch möglichen Gesamtsendeleistung P_{tot} (Integral über die spektrale Leistungsdichtefunktion) an. Zur Abschätzung der Größenordnung der maximalen Impulsenergie E_{tot} wurde auf Basis der spektralen Effizienz der Impulsanregungen (vgl. Tabelle 3.1 und Tabelle 3.2) auf maximale Effizienz ($e=100\%$) hochgerechnet.

| Bezeichnung | mittlere spektrale Sendeleistungsdichte | P_{tot} [μW] | E_{tot} [μW] |
|-------------------------------|---|------------------------------------|------------------------------------|
| „Vfg 1/2008 3,4-8,5 GHz max.“ | | 289 | $1,10 \cdot 10^{-9}$ |
| „Vfg 1/2008 6,0-8,5 GHz max.“ | | 185 | $6,17 \cdot 10^{-10}$ |
| „Vfg 1/2008 3,4-4,8 GHz max.“ | | 104 | $4,76 \cdot 10^{-10}$ |
| „FCC 3,1-10,6 GHz max.“ | | 556 | $1,52 \cdot 10^{-9}$ |

Tabelle 3.3: Theoretisch maximal mögliche mittlere Sendeleistungsdichtespektren von regulierungskonformen UWB-Geräten, wie sie für die Absorptionsberechnungen verwendet wurden.

| Bezeichnung | mittlere spektrale Sendeleistungsdichte | P_{tot} [μW] |
|----------------------|---|------------------------------------|
| „WiMedia_BandNr. 2“ | | 39 |
| „WiMedia_BandNr. 3“ | | 39 |
| „WiMedia_BandNr. 7“ | | 39 |
| „WiMedia_BandNr. 8“ | | 39 |
| „WiMedia_BandNr. 9“ | | 39 |
| „WiMedia_BandNr. 10“ | | 39 |

Tabelle 3.4: Theoretisch maximal mögliche Sendeleistungsdichtespektren von UWB-Geräten nach WiMedia Standard [6],[7] wie sie für die Absorptionsberechnungen verwendet wurden.

Tabelle 3.4 fasst schließlich in ähnlicher Weise die für die Absorptionsberechnungen betrachtete Spektren von MB-OFDM-UWB-Geräten nach WiMedia-Standard [6],[7] zusammen. In diesem Fall wurde die im WiMedia-Standard definierte Sendespektralmaske mit einem Maximalwert von -41,3 dBm/MHz EIRP als Anregungsspektrum verwendet. Pro Frequenzband beträgt die maximale Gesamtsendeleistung ca. 39 μ W EIRP.

3.3 Dielektrische Gewebeparameter

Für die numerischen Berechnungen wurde ein aus dem Datensatz des *Visible Human Project* gewonnenes anatomisches Körpermodell, mit insgesamt mehr als 100 unterscheidbaren Gewebebereichen verwendet. Zur dielektrischen Beschreibung dieser Gewebebereiche stehen in der Literatur 38 unterschiedliche Gewebeparameter-Datensätze, basierend auf der Arbeit von Gabriel et al. [15] zur Verfügung.

| | ϵ_s | ϵ_∞ | σ_0 | A_1 | τ_1 | A_2 | τ_2 | A_3 | τ_3 | A_4 | τ_4 |
|-------------------------------|--------------|-------------------|------------|--------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|
| | [1] | [1] | [S/m] | [1] | [s] | [1] | [s] | [1] | [s] | [1] | [s] |
| Aorta, Blood vessel | 44.71 | 9.30 | 0.636 | 0.968 | 1.06E-11 | 0.880 | 0.987 | 0.880 | 0.987 | 0.880 | 0.987 |
| Bladder | 17.79 | 4.81 | 0.362 | 1.053 | 1.08E-11 | -1.086 | 0.800 | -1.086 | 0.800 | -1.086 | 0.800 |
| Blood | 61.26 | 11.87 | 1.477 | 0.966 | 1.02E-11 | 12.005 | 30.857 | 14.347 | 44.423 | 3.338 | 51.392 |
| Body fluid, vitreous humor | 69.02 | 4.00 | 1.512 | 1.000 | 7.15E-12 | 0.880 | 0.987 | 0.880 | 0.987 | 0.880 | 0.987 |
| Bone cancellous | 20.72 | 5.86 | 0.320 | 0.917 | 1.58E-11 | 0.527 | 0.939 | 0.527 | 0.939 | 0.527 | 0.939 |
| Bone marrow | 5.52 | 3.18 | 0.038 | 0.945 | 1.09E-11 | 10.561 | 30.469 | 12.622 | 43.864 | 2.937 | 50.745 |
| Bonecortical, Nail, Tooth | 12.44 | 4.17 | 0.127 | 0.934 | 1.56E-11 | 0.880 | 0.987 | 0.880 | 0.987 | 0.880 | 0.987 |
| Brain grey matter | 52.45 | 11.62 | 0.894 | 0.945 | 1.05E-11 | 0.464 | 0.927 | 0.464 | 0.927 | 0.464 | 0.927 |
| Brain white matter | 38.71 | 9.57 | 0.562 | 0.946 | 1.05E-11 | 9.291 | 30.086 | 11.104 | 43.312 | 2.584 | 50.107 |
| Breast fat | 5.46 | 2.68 | 0.039 | 0.954 | 1.79E-11 | 0.408 | 0.915 | 0.408 | 0.915 | 0.408 | 0.915 |
| Cartilage | 42.19 | 9.11 | 0.727 | 0.950 | 1.48E-11 | 8.174 | 29.707 | 9.769 | 42.767 | 2.273 | 49.476 |
| Cerebellum | 48.57 | 11.68 | 1.254 | 0.933 | 1.08E-11 | 0.359 | 0.904 | 0.359 | 0.904 | 0.359 | 0.904 |
| Cerebro spinal fluid | 68.63 | 12.61 | 2.371 | 0.975 | 9.14E-12 | 7.191 | 29.334 | 8.595 | 42.229 | 2.000 | 48.854 |
| Colon | 52.09 | 12.14 | 1.049 | 1.075 | 1.02E-11 | -719.140 | 0.293 | -859.460 | 0.422 | -199.960 | 0.489 |
| Cornea | 55.02 | 11.94 | 1.361 | 0.950 | 1.02E-11 | 0.278 | 0.881 | 0.278 | 0.881 | 0.278 | 0.881 |
| Duodenum, Oesophagus, Stomach | 64.99 | 12.54 | 1.113 | 0.971 | 9.76E-12 | 0.774 | 0.975 | 0.774 | 0.975 | 0.774 | 0.975 |
| Dura | 44.34 | 11.71 | 0.933 | 0.957 | 1.05E-11 | -773.270 | 0.290 | -924.150 | 0.417 | -215.010 | 0.482 |
| Sclera, Retina | 55.18 | 11.36 | 1.131 | 0.966 | 9.52E-12 | 0.774 | 0.975 | 0.774 | 0.975 | 0.774 | 0.975 |
| Fat | 1.61 | 3.22 | 0.048 | -1.332 | 1.16E-11 | 8.064 | 44.618 | -19.250 | 54.436 | -17.893 | 17.405 |
| Gall bladder | 58.57 | 8.34 | 1.159 | 1.002 | 8.19E-12 | -831.470 | 0.286 | -993.710 | 0.412 | -231.190 | 0.476 |
| Gall bladder bile | 70.18 | 9.13 | 1.747 | 0.987 | 8.21E-12 | 7.094 | 44.057 | -20.699 | 53.751 | -19.240 | 17.186 |
| Gland, Lymph, Thymus, Thyroid | 59.64 | 11.75 | 0.991 | 0.974 | 9.35E-12 | 0.681 | 0.963 | 0.681 | 0.963 | 0.681 | 0.963 |
| Heart | 59.50 | 13.11 | 1.206 | 0.932 | 1.07E-11 | -894.060 | 0.282 | -1068.500 | 0.407 | -248.590 | 0.470 |
| Kidney | 58.17 | 13.31 | 1.389 | 0.914 | 1.10E-11 | -961.350 | 0.279 | -1148.900 | 0.401 | -267.300 | 0.464 |
| Lens | 46.53 | 9.95 | 0.757 | 0.973 | 9.37E-12 | 0.880 | 0.987 | 0.880 | 0.987 | 0.880 | 0.987 |
| Liver | 46.58 | 10.27 | 0.812 | 0.940 | 1.14E-11 | -35.212 | 42.186 | 84.020 | -0.005 | 76.625 | -0.004 |
| Lung inflated | 21.89 | 5.59 | 0.446 | 0.944 | 1.03E-11 | 0.774 | 0.975 | 0.774 | 0.975 | 0.774 | 0.975 |
| Mucous membrane | 45.86 | 10.65 | 0.808 | 0.947 | 1.05E-11 | -37.862 | 41.655 | 73.918 | -0.005 | 67.412 | -0.005 |
| Muscle | 54.95 | 11.85 | 0.908 | 0.972 | 8.82E-12 | 0.774 | 0.975 | 0.774 | 0.975 | 0.774 | 0.975 |
| Nerve, Spinal cord | 32.36 | 8.60 | 0.553 | 0.942 | 1.05E-11 | 0.681 | 0.963 | 0.681 | 0.963 | 0.681 | 0.963 |
| Pancreas | 59.64 | 11.75 | 0.991 | 0.974 | 9.35E-12 | -40.712 | 41.131 | 65.031 | -0.006 | 59.306 | -0.005 |
| Prostate, Testis | 59.86 | 11.70 | 1.177 | 0.975 | 9.34E-12 | 0.599 | 0.951 | 0.599 | 0.951 | 0.599 | 0.951 |
| Skin dry | 41.05 | 7.52 | 0.834 | 0.936 | 9.06E-12 | 0.681 | 0.963 | 0.681 | 0.963 | 0.681 | 0.963 |
| Small intestine | 59.08 | 13.01 | 2.160 | 0.929 | 1.05E-11 | -43.776 | 40.614 | 57.212 | -0.006 | 52.176 | -0.006 |
| Spleen | 56.81 | 12.72 | 1.249 | 0.934 | 1.06E-11 | 0.599 | 0.951 | 0.599 | 0.951 | 0.599 | 0.951 |
| Tendon | 45.89 | 7.99 | 0.623 | 0.972 | 1.34E-11 | 0.527 | 0.939 | 0.527 | 0.939 | 0.527 | 0.939 |
| Tongue | 55.18 | 11.35 | 0.895 | 0.968 | 9.52E-12 | -47.071 | 40.103 | 50.333 | -0.007 | 45.902 | -0.006 |
| Trachea | 41.91 | 8.33 | 0.743 | 0.962 | 9.69E-12 | 0.464 | 0.927 | 0.464 | 0.927 | 0.464 | 0.927 |

Tabelle 3.5: Debye-Parameter für die Gewebe des verwendeten anatomischen Körpermodells.

Für diese Gewebeparameterdatensätze wurde ein 4-Pol Debye Modell zur Modellierung der dispersiven Gewebeeigenschaften verwendet. Mit den in Tabelle 3.5 zusammengefassten Dispersionsparametern lagen die Abweichungen von den Zielwerten nach Gabriel [15] innerhalb des interessierenden Frequenzbereichen von 3,1-10,6 GHz bei weniger als $\pm 5\%$.

3.4 Berechnungsergebnisse

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der numerischen Berechnungen für die einzelnen betrachteten Szenarien in Form der maximalen, jeweils über 10g würfelförmiges Gewebe gemittelten Werte der spezifischen Absorptionsrate (SAR_{10g}) und der spezifischen Absorption SA_{10g} zusammengefasst. Der Algorithmus zur SAR_{10g} bzw. zur SA_{10g} Maximalwertsuche entspricht jenem in IEEE-1529 [16] beschriebenen.

3.4.1 Szenario 1: Notebook mit UWB-Sendemodul auf Oberschenkel

Dieses Szenario wurde repräsentativ für die Situation eines Notebook-Benützers mit einem externen UWB-Funkmodul, z.B. in Form eines USB-Sticks, ausgewählt. Abbildung 3.13 zeigt das Modell. Die kürzeste Distanz zwischen Antenne und Körperoberfläche beträgt ca. 8 mm. Als maximale FDTD-Gitterschrittweite im Gewebe wurde zur Erfüllung des $\lambda/10$ -Kriteriums 0,4 mm gewählt. Für die Berechnungen wurde das breitbandige Antennenmodell 1 verwendet. Die Anregung der Antenne erfolgte gemäß Kapitel 3.2.3. Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse wurden unter der Annahme der Ausschöpfung der Sendeleistungslimits der Regulierungen [4] und [5], bei Berücksichtigung eines mittleren Antennengewinns von 3 dBi berechnet. Dieser Wert für den Antennengewinn liegt zwar etwas unterhalb des tatsächlichen Mittelwertes des für das verwendete Antennenmodell ermittelten Gewinns (2,7-5,2 dBi), wurde aber bewusst niedrig im Hinblick auf konservative Berechnungsergebnisse gewählt.

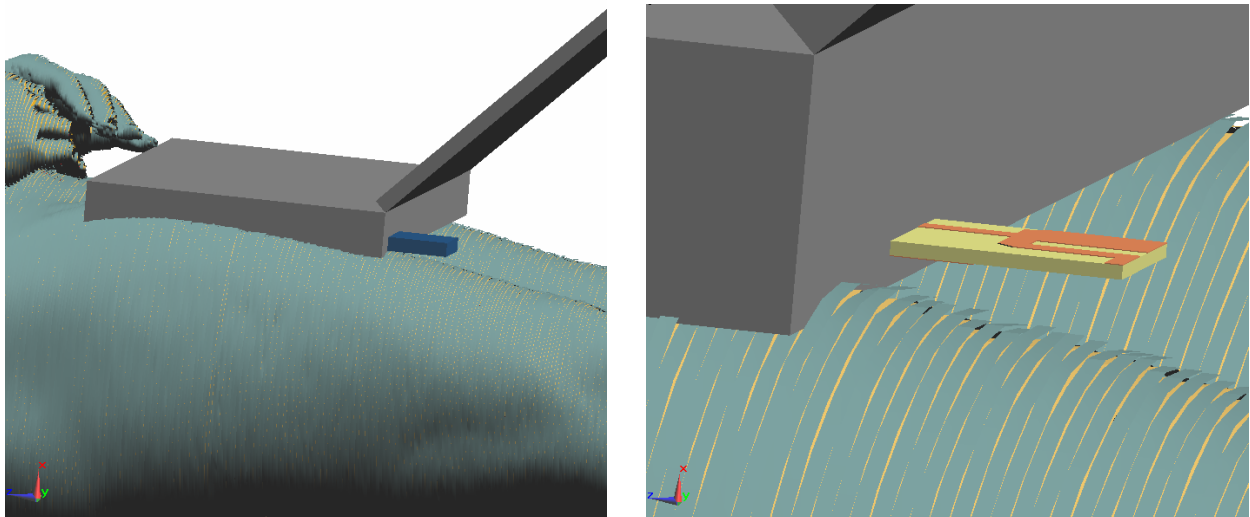


Abbildung 3.13: SEMCAD X Modell des Szenarios 1: Notebook mit externem UWB-Funkmodul auf Oberschenkel

Abbildung 3.14 und Abbildung 3.15 zeigen die Berechnungsergebnisse in Form der maximalen über 10g Gewebe gemittelten Werte der SAR und der SA für die unterschiedlichen betrachteten spektralen Anregungsformen. Da WiMedia-Signalisierung definitionsgemäß nur zu HF-Abstrahlung in Form von MB-OFDM-Bursts (mit Burstlängen im Mikrosekundenbereich) führt, wurden dafür keine Berechnungen der SA angestellt.

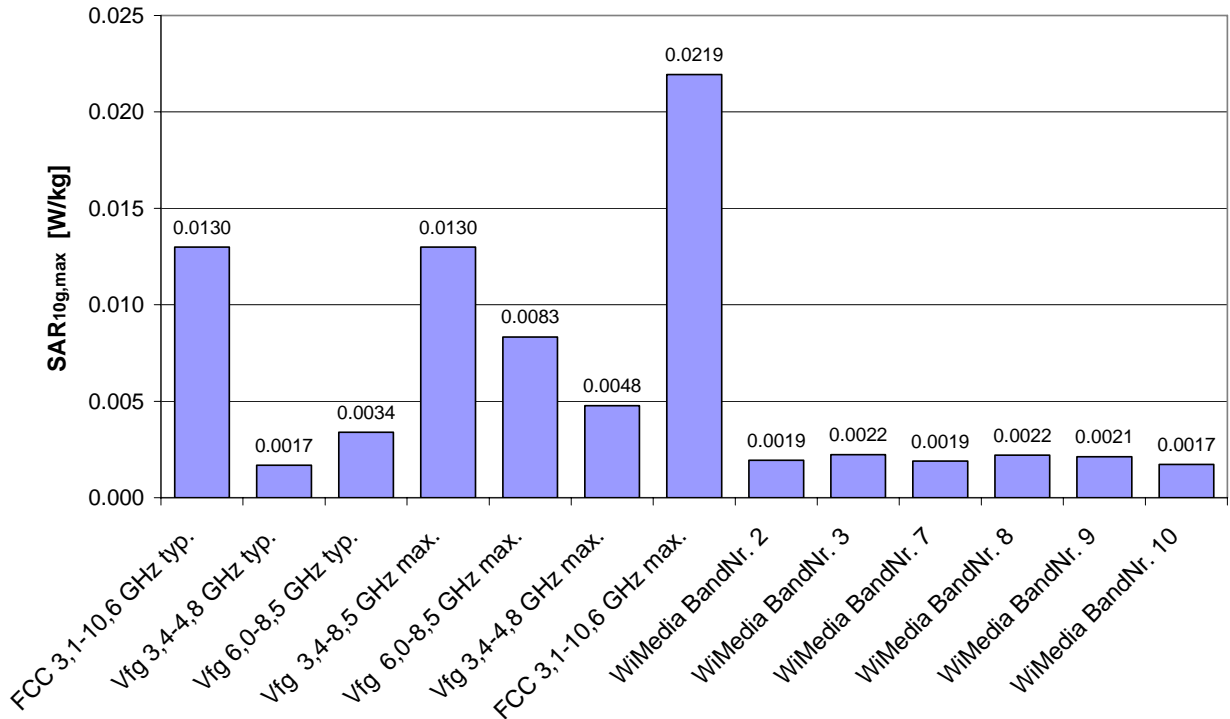


Abbildung 3.14: Maximale über 10g Gewebe gemittelte SAR in Szenario 1 für die unterschiedlichen betrachteten spektralen Anregungsformen (vgl. Kapitel 3.2.3)

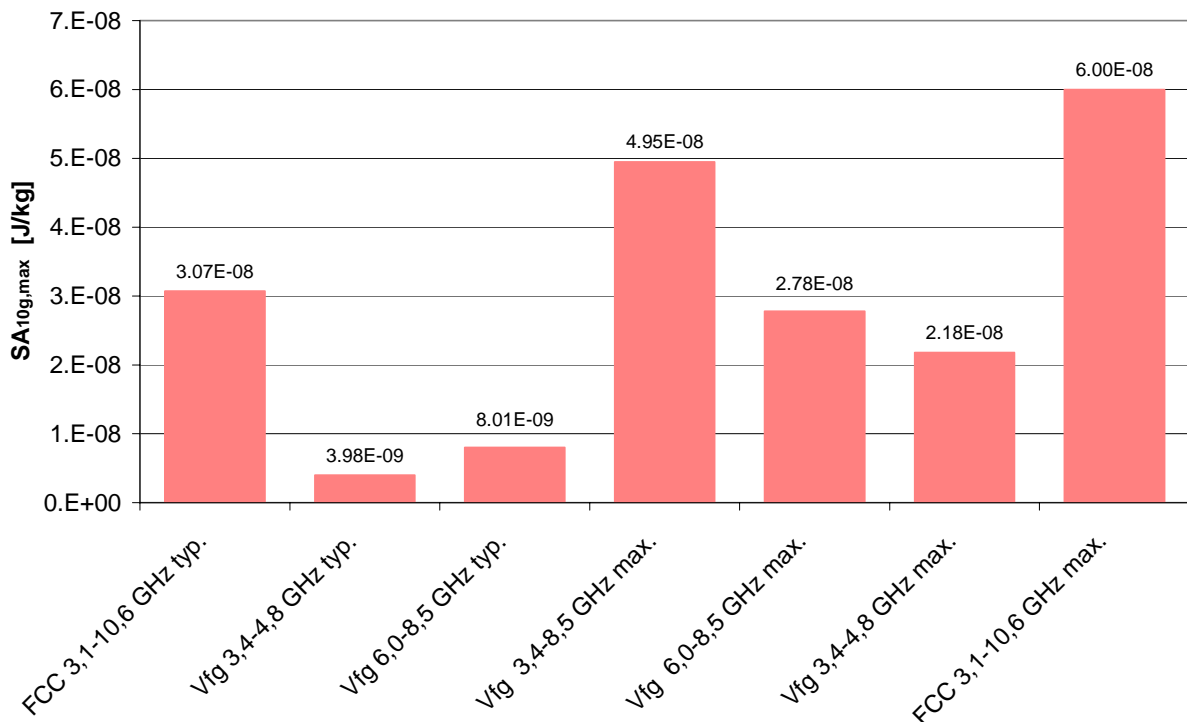


Abbildung 3.15: Maximale über 10g Gewebe gemittelte SA in Szenario 1 für die unterschiedlichen betrachteten spektralen Anregungsformen (vgl. Kapitel 3.2.3)

Die Berechnungsergebnisse zeigen erwartungsgemäß sehr geringe SAR_{10g} und SA_{10g} Werte. Speziell für die zu Vfg 1/2008 [4] konformen Anregungsformen ergeben sich selbst bei Annahme von 100% spektraler Effizienz maximale SAR_{10g} Werte von deutlich weniger als 0,5% des Basiswertes nach ICNIRP [13] von 4 W/kg (Allgemeinbevölkerung,

Gliedmaßen). Das Verhältnis der maximalen SA_{10g} zum entsprechenden Basiswert nach ICNIRP (streng genommen nur für Exposition des Kopfes definiert) beträgt sogar weniger als 0,0025%.

Abbildung 3.16 zeigt graphisch die SAR-Verteilung (räumlich ungemittelt) in einem Querschnitt durch den Oberschenkel auf Höhe der Antenne für die beiden Anregungsfälle „Vfg 1/2008 3,4-4,8 GHz, typ.“ und „Vfg 1/2008 6,0-8,5 GHz, typ.“.

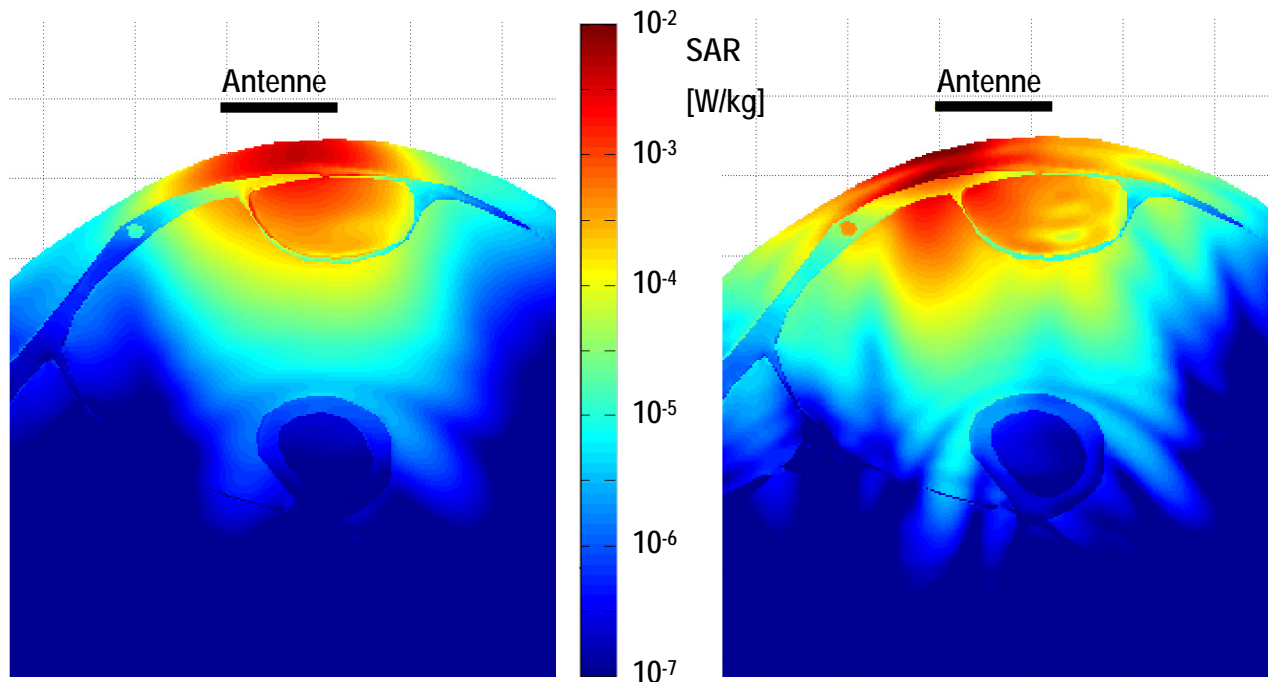


Abbildung 3.16: SAR-Verteilung in einem Querschnitt des Oberschenkels unterhalb der Antenne für die Anregungsformen „Vfg 1/2008 3,4-4,8 GHz, typ.“ (links) und „Vfg 1/2008 6,0-8,5 GHz, typ.“ (rechts)

3.4.2 Szenario 2: UWB-Funkmodul am Hinterkopf für EEG-Übertragung

Dieses Szenario stellt eine in naher Zukunft absehbare UWB-Anwendung dar. Prototypen drahtloser EEG-Systeme sind von einigen Firmen bereits verfügbar bzw. angekündigt (siehe z.B. [17], [18]). Zuweilen werden bei diesen Systemen herkömmliche Funktechnologien (zumeist im Frequenzbereich um 2,45 GHz, z.B. Bluetooth) verwendet. Aufgrund der größeren Datenbandbreite (z.B. erforderlich bei entsprechend großer Anzahl an Ableitungen) und des zu erwartenden geringeren elektromagnetischen Störpotenzials der UWB-Technologie, ist der Vorstoß der UWB-Technik auch in dieses Segment als wahrscheinlich einzustufen. Der Patient trägt dabei ein Headset, das für die Fixierung der EEG-Elektroden am Kopf sorgt (ähnlich den auch heute verwendeten EEG-Elektrodenhauben). Die Elektrodenleitungen werden zu einer z.B. im Hinterkopfbereich am Headset befestigten Elektronik geführt in der einerseits die Vorverstärkung der EEG-Signale erfolgt und andererseits auch das UWB-Funkmodul untergebracht ist. Abbildung 3.17 zeigt das in SEMCAD X erstellte Modell einer derartigen Anwendung unter Verwendung des breitbandigen Antennenmodells 1. Zusätzlich zur Antenne, wurden auch zwei ideal elektrisch leitende EEG-Elektroden nahe dem Funkmodul modelliert. Der ebenfalls in Abbildung 3.17, links erkennbare Befestigungsgurt für die EEG-Elektroden (zwischen Antenne und Kopf) wurde als verlustloser Kunststoffteil ($\epsilon_r=3$) definiert. Die kürzeste Distanz zwischen Antenne und Körperoberfläche beträgt ca. 11 mm. Als maximale FDTD-Gitterschrittweite im Gewebe wurde zur Erfüllung des $\lambda/10$ -Kriteriums 0,4 mm gewählt. Die Anregung der Antenne

erfolgte wieder gemäß Kapitel 3.2.3. Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse wurden unter der Annahme der Ausschöpfung der Sendeleistungslimits der Regulierungen [4] und [5], bei Berücksichtigung eines mittleren Antennengewinns von 3 dBi berechnet. Dieser Wert für den Antennengewinn liegt zwar etwas unterhalb des Mittelwertes des tatsächlichen für das verwendete Antennenmodell ermittelten Gewinns (2,7-5,2 dBi), wurde aber bewusst niedrig im Hinblick auf konservative Berechnungsergebnisse gewählt.

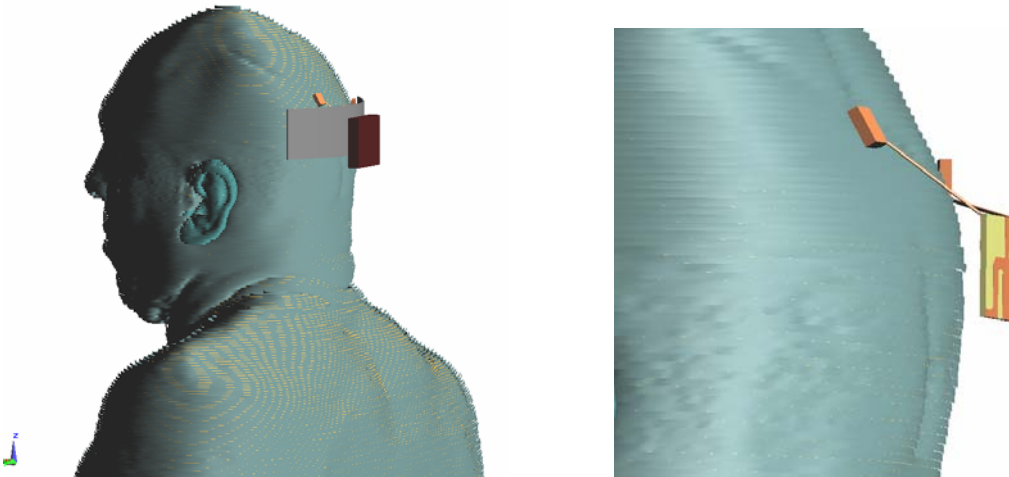


Abbildung 3.17: SEMCAD X Modell des Szenarios 2: EEG-System mit UWB-Funkmodul im Hinterkopfbereich

Abbildung 3.18 und Abbildung 3.19 zeigen die Berechnungsergebnisse in Form der maximalen über 10g Gewebe gemittelten Werte der SAR und der SA für die unterschiedlichen betrachteten spektralen Anregungsformen. Da WiMedia-Signalisierung definitionsgemäß nur zu HF-Abstrahlung in Form von MB-OFDM-Bursts (mit Burstlängen im Mikrosekundenbereich) führt, wurden dafür keine Berechnungen der SA angestellt.

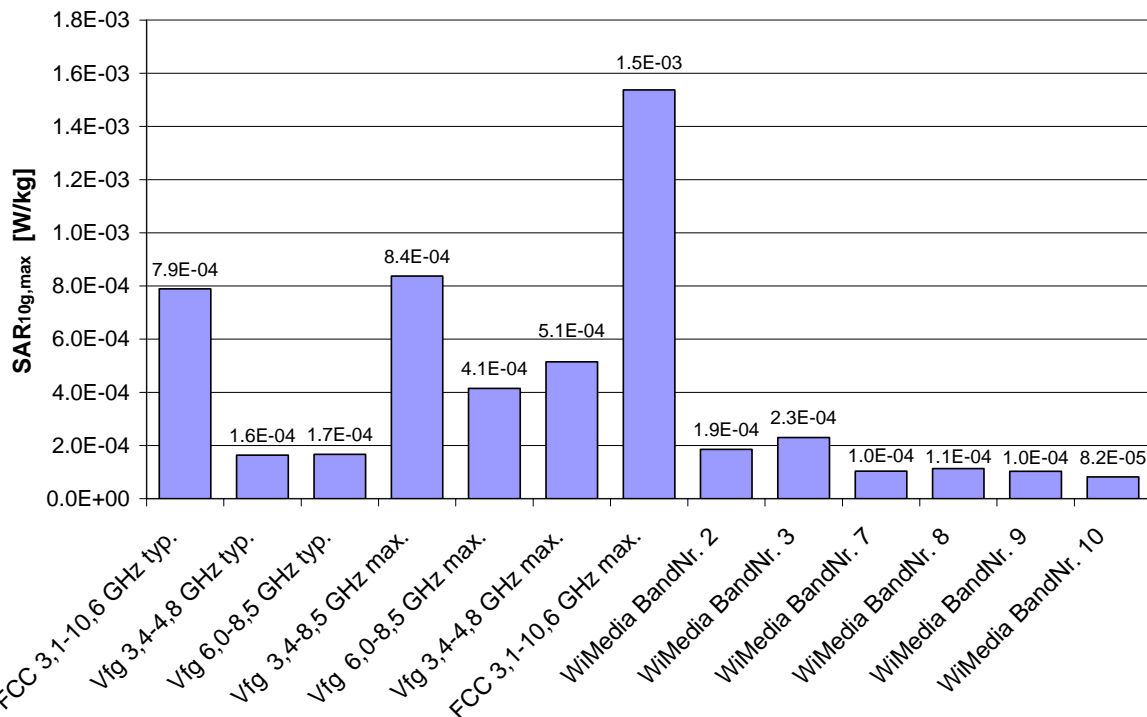


Abbildung 3.18: Maximale über 10g Gewebe gemittelte SAR in Szenario 2 für die unterschiedlichen betrachteten spektralen Anregungsformen (vgl. Kapitel 3.2.3)

Die Berechnungsergebnisse zeigen wieder sehr geringe SAR_{10g} und SA_{10g} Werte. Speziell für die zu VfG 1/2008 [4] konformen Anregungsformen ergeben sich selbst bei Annahme von 100% spektraler Effizienz maximale SAR_{10g} Werte von deutlich weniger als 0,05% des Basiswertes nach ICNIRP [13] von 2 W/kg (Allgemeinbevölkerung, Kopf). Das Verhältnis der maximalen SA_{10g} zum entsprechenden Basiswert nach ICNIRP beträgt sogar weniger als 0,0002%.

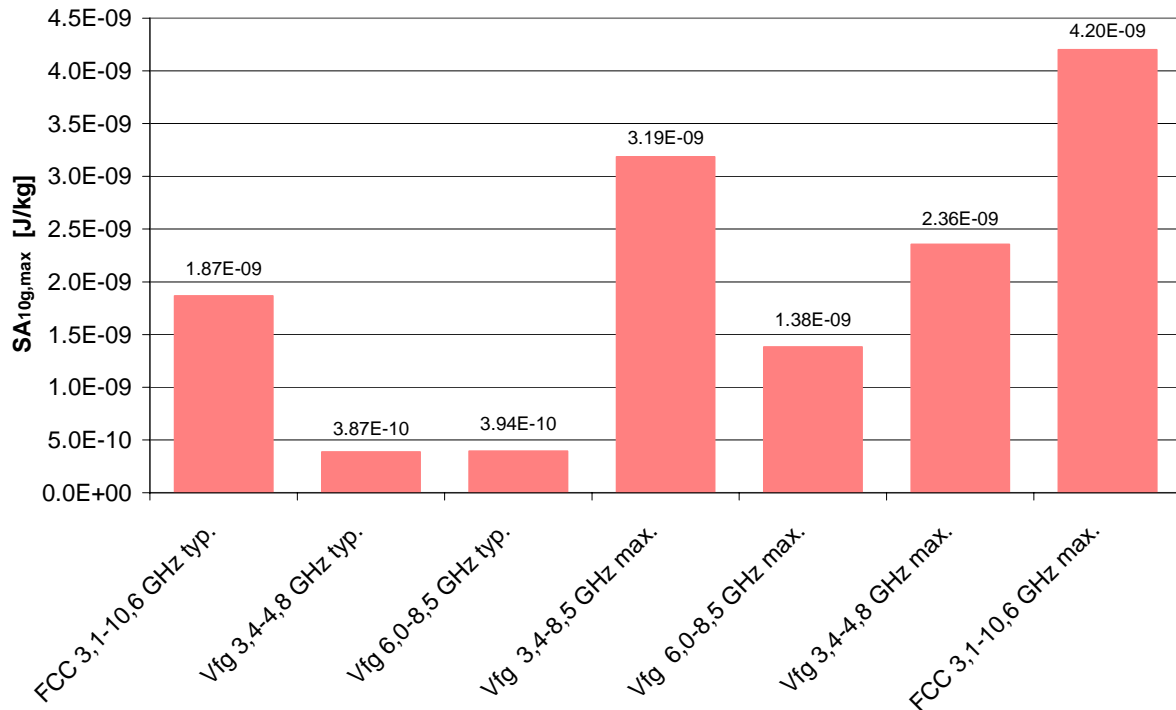


Abbildung 3.19: Maximale über 10g Gewebe gemittelte SA in Szenario 2 für die unterschiedlichen betrachteten spektralen Anregungsformen (vgl. Kapitel 3.2.3)

Abbildung 3.20 zeigt graphisch die SAR-Verteilung (ungemittelt) in einem Horizontalschnitt durch den Kopf auf Höhe der Antennenmitte für die beiden Anregungsfälle „VfG 1/2008 3,4-4,8 GHz, typ.“ und „VfG 1/2008 6,0-8,5 GHz, typ.“.

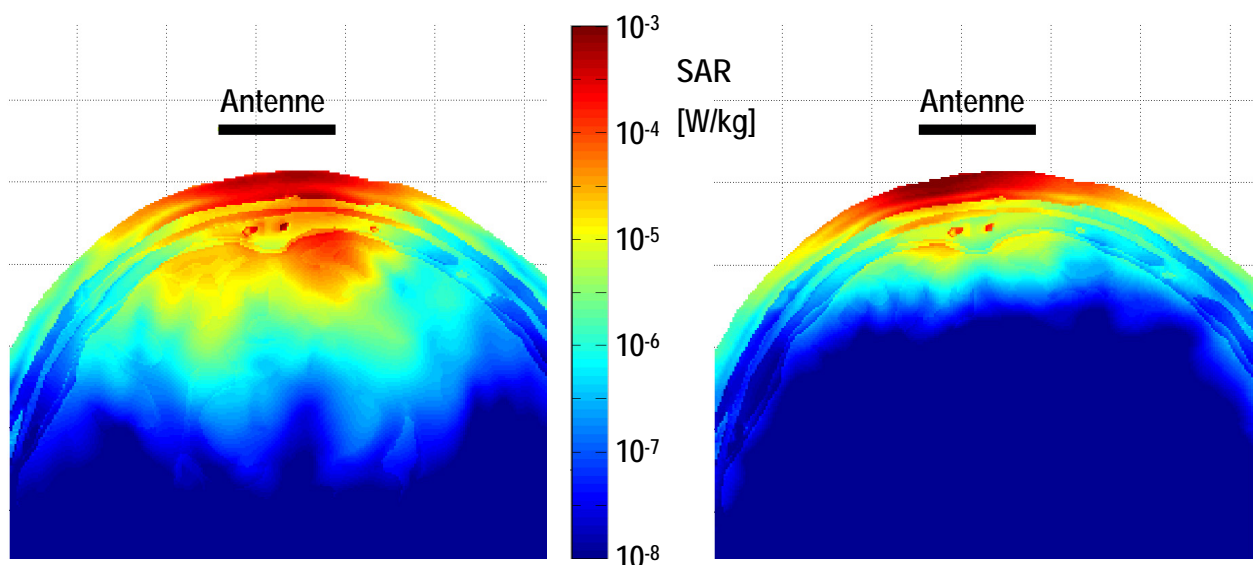


Abbildung 3.20: SAR-Verteilung in einem Horizontalschnitt durch den Kopf auf Höhe der Antennenmitte für die Anregungsformen „VfG 1/2008 3,4-4,8 GHz, typ.“ (links) und „VfG 1/2008 6,0-8,5 GHz, typ.“ (rechts)

3.4.3 Szenario 3: UWB-Funkmodul in Augennähe (Videobrille)

Bei diesem Szenario wurde versucht eine in Zukunft denkbare Situation mit UWB-Exposition des Auges nachzustellen. So genannte „Videobrillen“ projizieren Bilder oder Videos direkt auf die Brillengläser (siehe z.B. [19]). Damit ist es möglich den Träger der Brille mit für ihn relevanten Informationen zu versorgen. Im militärischen Bereich (z.B. bei Piloten) sind solche Systeme (allerdings noch drahtgebunden) bereits heute in Verwendung. In Zukunft könnten solche Systeme mittels UWB auch drahtlos realisiert werden. Auch im Bereich der Unterhaltungselektronik (Video-Spiele, Cyber Games) und in allen Bereichen, in denen 3D Animationen realisiert werden müssen, sind ähnliche Szenarien denkbar.

Abbildung 3.21 zeigt das in SEMCAD X erstellte Modell einer derartigen Anwendung unter Verwendung des breitbandigen Antennenmodells 1. Die Antenne wurde im Bereich des Brillenbügels seitlich neben dem linken Auge positioniert. Das Brillengestell wurde als elektrisch ideal leitend definiert. Die kürzeste Distanz zwischen Antenne und Körperoberfläche beträgt ca. 8 mm. Als maximale FDTD-Gitterschrittweite im Gewebe wurde zur Erfüllung des $\lambda/10$ -Kriteriums 0,4 mm gewählt. Die Anregung der Antenne erfolgte wieder gemäß Kapitel 3.2.3. Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse wurden unter der Annahme der Ausschöpfung der Sendeleistungslimits der Regulierungen [4] und [5], bei Berücksichtigung eines mittleren Antennengewinns von 3 dBi berechnet. Dieser Wert für den Antennengewinn liegt zwar etwas unterhalb des Mittelwertes des tatsächlichen für das verwendete Antennenmodell ermittelten Gewinns (2,7-5,2 dBi), wurde aber bewusst niedrig im Hinblick auf konservative Berechnungsergebnisse gewählt.

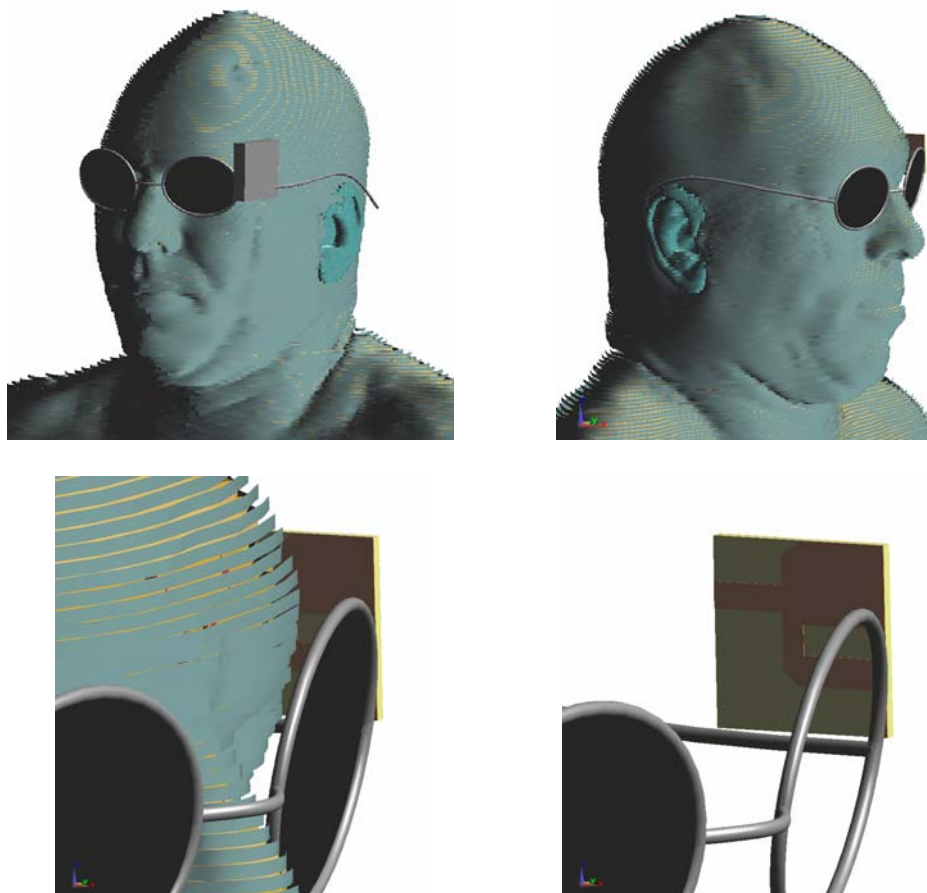


Abbildung 3.21: SEMCAD X Modell des Szenarios 3: Videobrille mit UWB-Funkmodul

Abbildung 3.22 und Abbildung 3.23 zeigen die Berechnungsergebnisse in Form der maximalen über 10g Gewebe gemittelten Werte der SAR und der SA für die unterschiedlichen betrachteten spektralen Anregungsformen. Da WiMedia-Signalisierung definitionsgemäß nur zu HF-Abstrahlung in Form von MB-OFDM-Bursts (mit Burstlängen im Mikrosekundenbereich) führt, wurden dafür keine Berechnungen der SA angestellt.

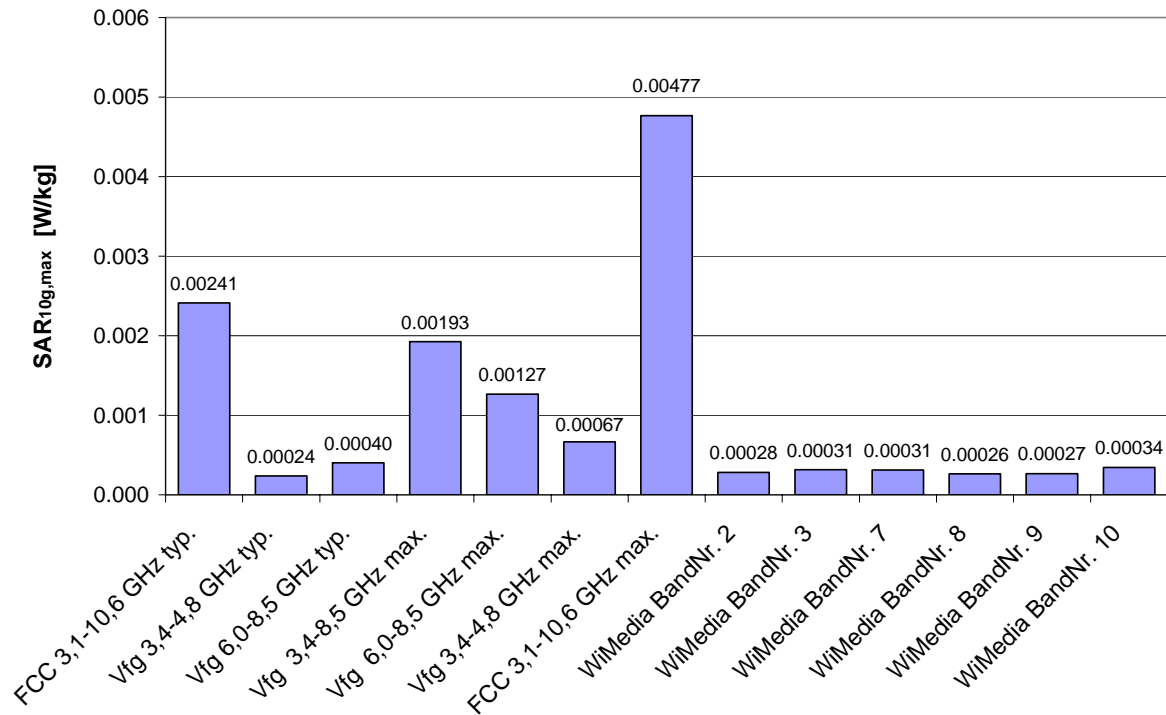


Abbildung 3.22: Maximale über 10g Gewebe gemittelte SAR in Szenario 3 für die unterschiedlichen betrachteten spektralen Anregungsformen (vgl. Kapitel 3.2.3)



Abbildung 3.23: Maximale über 10g Gewebe gemittelte SA in Szenario 3 für die unterschiedlichen betrachteten spektralen Anregungsformen (vgl. Kapitel 3.2.3)

Die Berechnungsergebnisse zeigen wieder sehr geringe SAR_{10g} und SA_{10g} Werte. Speziell für die zu VfG 1/2008 [4] konformen Anregungsformen ergeben sich selbst bei Annahme von 100% spektraler Effizienz maximale SAR_{10g} Werte von deutlich weniger als 0,1% des Basiswertes nach ICNIRP [13] von 2 W/kg (Allgemeinbevölkerung, Kopf). Das Verhältnis der maximalen SA_{10g} zum entsprechenden Basiswert nach ICNIRP beträgt sogar weniger als 0,0004%.

Abbildung 3.24 zeigt graphisch die SAR-Verteilung (räumlich ungemittelt) in einem Horizontalschnitt durch den Kopf auf Höhe der Antennenmitte für die beiden Anregungsfälle „Vfg 1/2008 3,4-4,8 GHz, typ.“ und „Vfg 1/2008 6,0-8,5 GHz, typ.“.

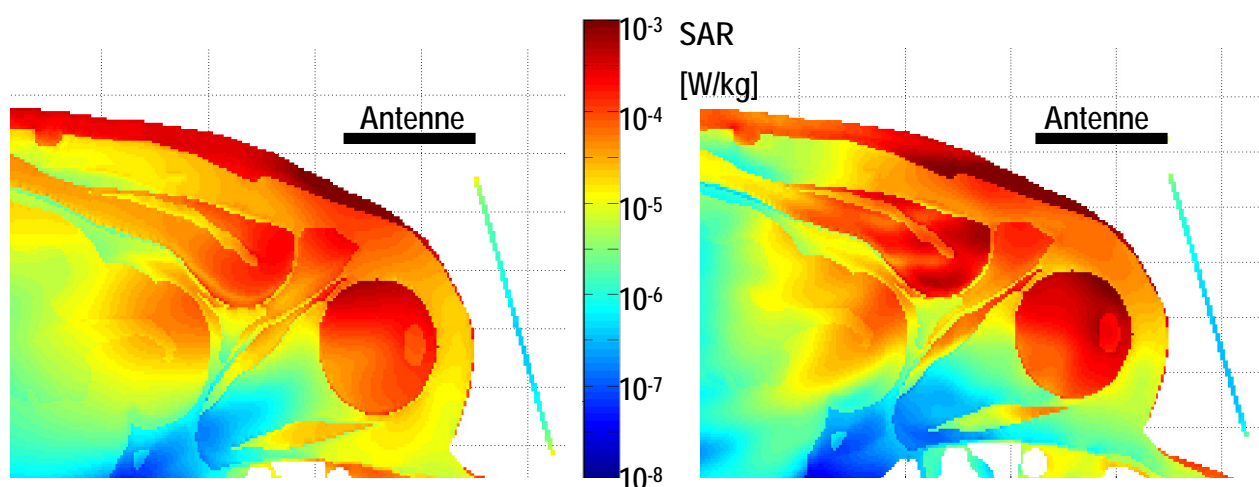


Abbildung 3.24: SAR-Verteilung in einem Horizontalschnitt durch den Kopf im Bereich des linken Auges auf Höhe der Antennenmitte für die Anregungsformen „Vfg 1/2008 3,4-4,8 GHz, typ.“ (links) und „Vfg 1/2008 6,0-8,5 GHz, typ.“ (rechts)

3.4.4 Szenario 4: UWB-Funkmodul am Brustkorb (z.B. EKG-Übertragung)

Bei diesem Szenario wurde von einer UWB-basierten Funkübertragung von physiologischen Daten, wie z.B. EKG ausgegangen. EKG-Ableitung während körperlicher Aktivität (Belastungs-EKG) gehört zu medizinischen Standarduntersuchungen. Durch kabellose Übertragung der Daten ergäbe sich größere Bewegungsfreiheit des Patienten, was eventuell von Vorteil sein könnte (z.B. in der Sportmedizin). Natürlich kann dieses Szenario auch repräsentativ für alle anderen Anwendungen mit UWB-Sendern im Brustbereich gesehen werden (z.B. beliebige WBAN³-Anwendungen).

Abbildung 3.25 zeigt das in SEMCAD X erstellte Modell dieses Szenarios, wobei hier 2 unterschiedliche Varianten unter Verwendung beider Antennenmodelle aus Kapitel 3.2.1 untersucht wurden.

Die mittlere Distanz zwischen Antenne und Körperoberfläche beträgt für beide Antennenmodelle ca. 8 mm. Als maximale FDTD-Gitterschrittweite im Gewebe wurde zur Erfüllung des $\lambda/10$ -Kriteriums 0,4 mm gewählt. Die Anregung der Antenne erfolgte wieder gemäß Kapitel 3.2.3, wobei bei den Berechnungen mit Antennenmodell 2 naturgemäß nur spektrale Anregungen im Frequenzbereich zwischen 3,1 GHz und 4,8 GHz betrachtet wurden.

³ WBAN... Wireless Body Area Networks

Zusätzlich zur Antenne und einem als verlustlos ($\epsilon_r=3$) angenommenen Kunststoffgehäuse wurden auch drei EKG-Elektrodenleitungen (ideal leitend) modelliert.

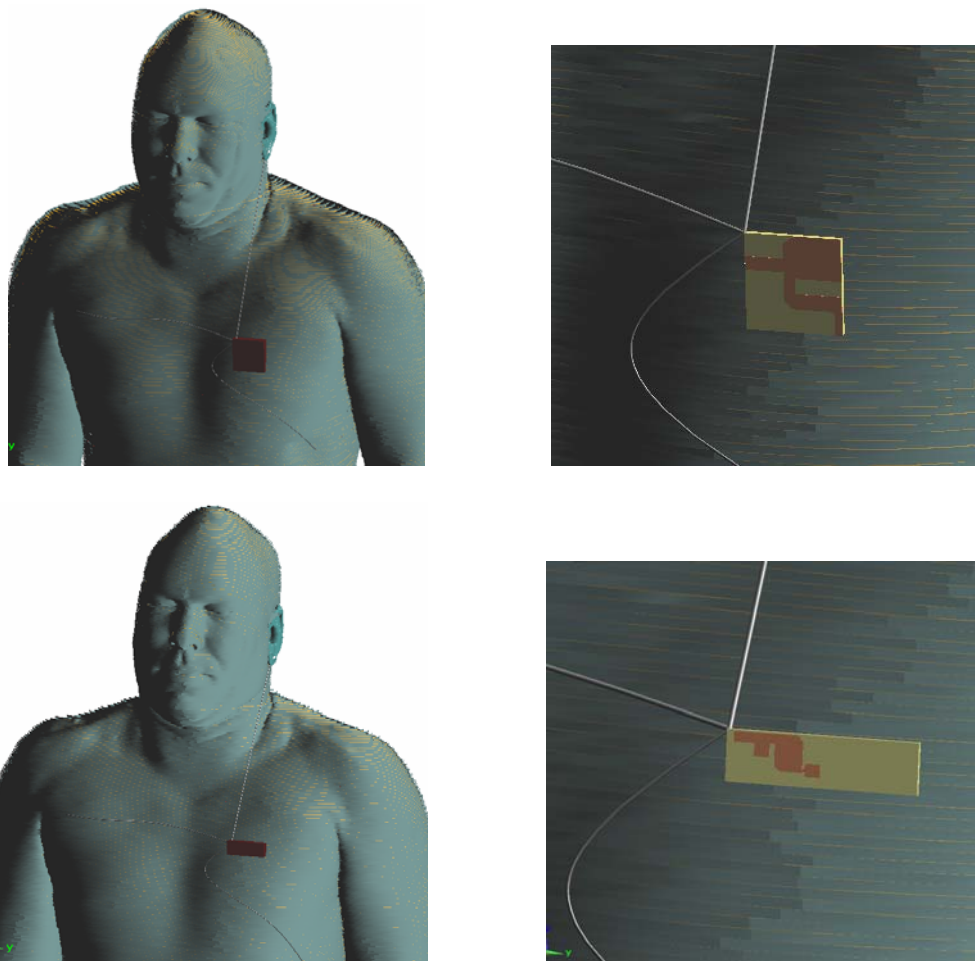


Abbildung 3.25: SEMCAD X Modell des Szenarios 4: UWB-Funkmodul im Brustbereich, oben: Variante mit breitbandigem Antennenmodell 1, unten: Variante mit Antennenmodell 2

Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse wurden unter der Annahme der Ausschöpfung der Sendeleistungslimits der Regulierungen [4] und [5], bei Berücksichtigung eines mittleren Antennengewinns von 3 dBi (Antennenmodell 1) bzw. 2,5 dBi (Antennenmodell 2) berechnet. Diese Werte für den Antennengewinn liegen etwas unterhalb der Mittelwerte der tatsächlichen für die verwendeten Antennenmodelle ermittelten mittleren Gewinns (2,7-5,2 dBi für Antennenmodell 1 bzw. 2,2-3,3 dBi für Antennenmodell 2), wurden aber bewusst niedrig im Hinblick auf konservative Berechnungsergebnisse gewählt.

Abbildung 3.26 und Abbildung 3.27 zeigen zunächst die Ergebnisse der Berechnungen mit Antennenmodell 1 in Form der maximalen über 10g Gewebe gemittelten Werte der SAR und der SA für die unterschiedlichen betrachteten spektralen Anregungsformen. Abbildung 3.28 zeigt im Vergleich dazu die Berechnungsergebnisse für die maximale über 10g Gewebe gemittelte SAR bei Verwendung des Antennenmodells 2 für die unterschiedlichen im Nutzfrequenzbereich der Antenne liegenden Anregungsformen. Da WiMedia-Signalisierung definitionsgemäß nur zu HF-Abstrahlung in Form von MB-OFDM-Bursts (mit Burstlängen im Mikrosekundenbereich) führt, wurden dafür keine Berechnungen der SA angestellt.

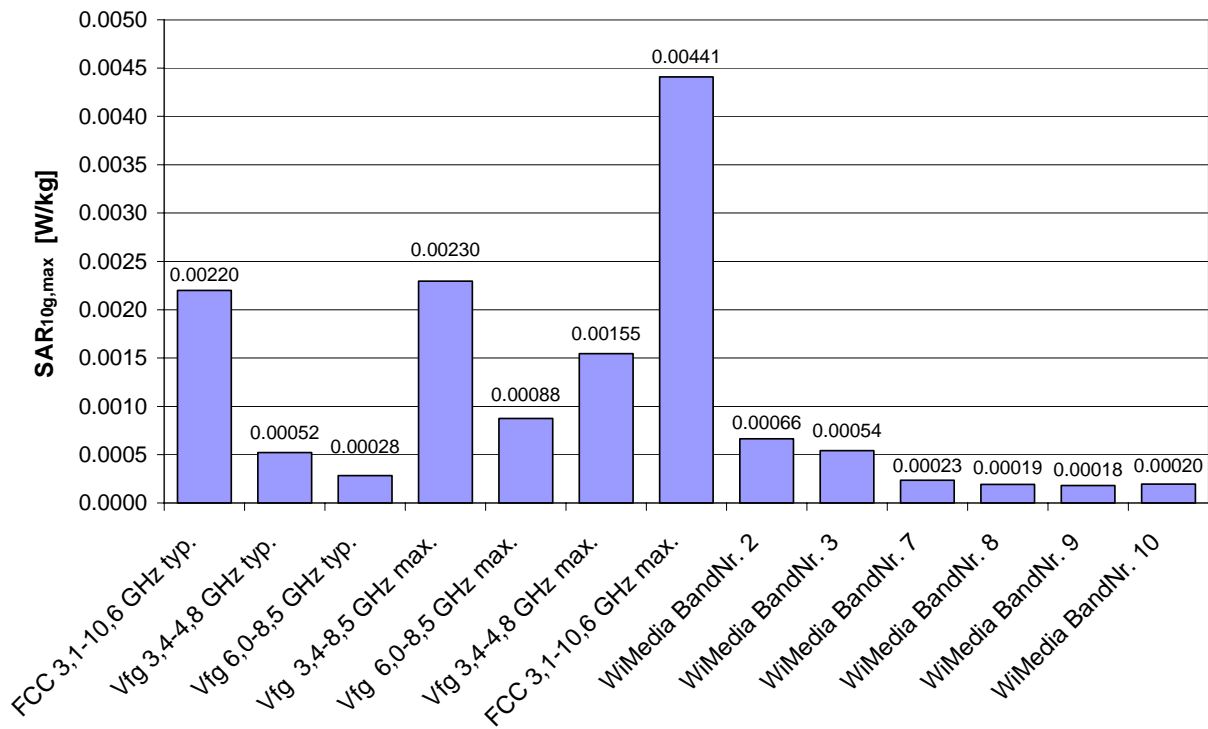


Abbildung 3.26: Maximale über 10g Gewebe gemittelte SAR in Szenario 4 bei Verwendung des breitbandigen Antennenmodells 1 für die unterschiedlichen betrachteten spektralen Anregungsformen (vgl. Kapitel 3.2.3)

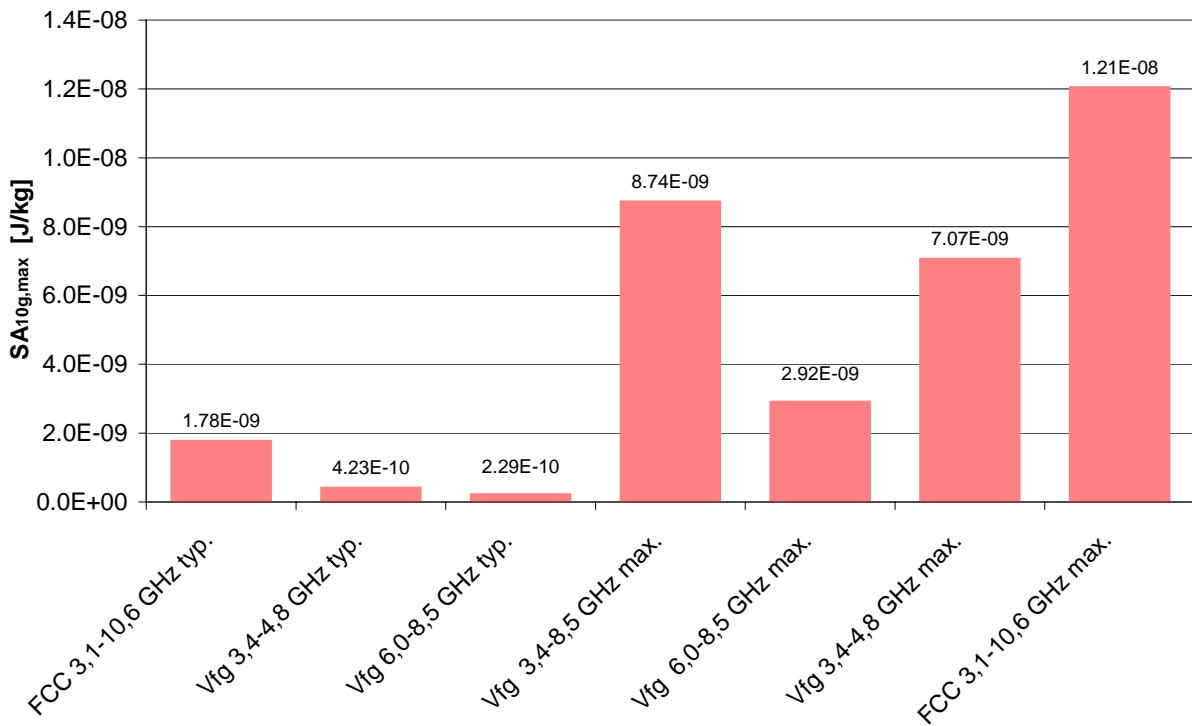


Abbildung 3.27: Maximale über 10g Gewebe gemittelte SA in Szenario 4 bei Verwendung des breitbandigen Antennenmodells 1 für die unterschiedlichen betrachteten spektralen Anregungsformen (vgl. Kapitel 3.2.3)

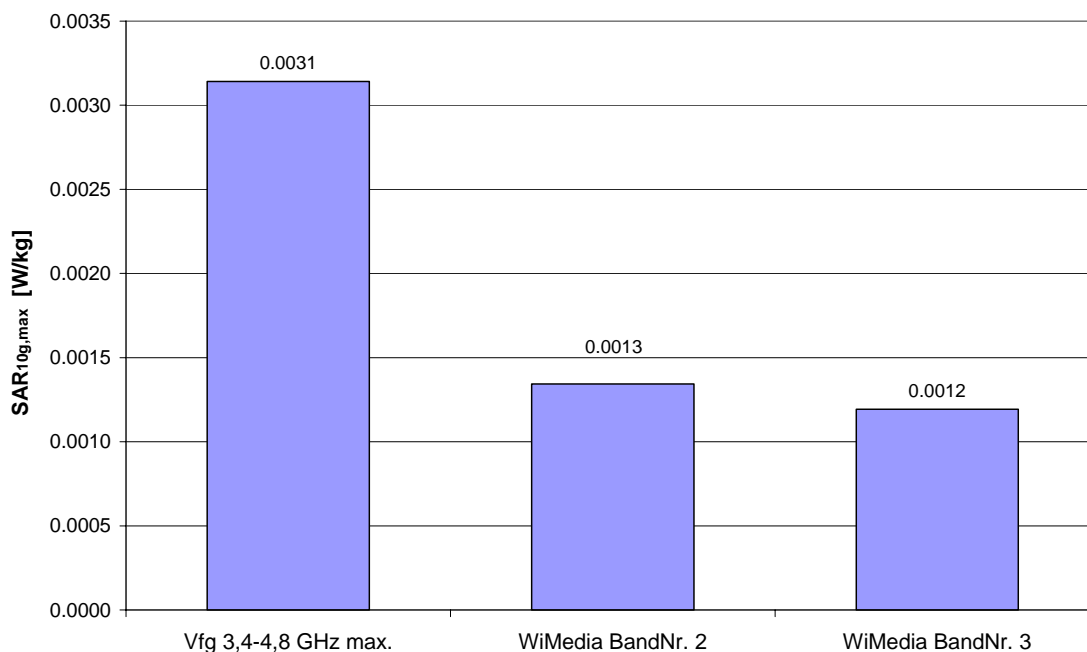


Abbildung 3.28: Maximale über 10g Gewebe gemittelte SAR in Szenario 4 bei Verwendung des Antennenmodells 2 für die unterschiedlichen betrachteten spektralen Anregungsformen im Nutzfrequenzbereich des Antennenmodells (vgl. Kapitel 3.2.3)

Die maximale über 10g Gewebe gemittelte SA bei Verwendung von Antennenmodell 2 und Anregung „VfG 1/2008 3,4-4,8 GHz max.“ beträgt $1,44 \cdot 10^{-8}$ J/kg.

Die Berechnungsergebnisse zeigen wieder sehr geringe SAR_{10g} und SA_{10g} Werte. Speziell für die zu VfG 1/2008 [4] konformen Anregungsformen ergeben sich selbst bei Annahme von 100% spektraler Effizienz maximale SAR_{10g} Werte von weniger als 0,12% des Basiswertes nach ICNIRP [13] von 2 W/kg (Allgemeinbevölkerung, Kopf und Rumpf). Das Verhältnis der maximalen SA_{10g} zum entsprechenden Basiswert nach ICNIRP beträgt sogar weniger als 0,00045%.

Der Vergleich der beiden unterschiedlichen Antennenformen anhand der Anregungsformen „VfG 1/2008 3,4-4,8 GHz max.“, „WiMedia Band Nr. 2“ und „WiMedia Band Nr. 3“ zeigt geringfügige Abweichungen bezüglich der maximalen über 10g Gewebe gemittelten SAR im Bereich von 1,3 – 3,5 dB, wobei das Antennenmodell 2 unter den getroffenen Annahmen zu höheren SAR-Werten führt.

Abbildung 3.29 zeigt einen Vergleich der SAR-Verteilungen (räumlich ungemittelt), verursacht durch die beiden Antennentypen in einem Horizontalschnitt durch den Brustkorb auf Höhe der Antennenmitte für den Anregungsfall „VfG 1/2008 3,4-4,8 GHz, max.“. Der dabei zutage tretende, augenscheinlich große Unterschied in der SAR-Verteilung ist insofern zu relativieren, als es sich bei den in Abbildung 3.29 dargestellten Schnittbildern um die (anatomisch) gleiche Schnittebene handelt. Im Bereich dieser Ebene führt Antennenmodell 2 offensichtlich wesentlich höhere Ströme als Antennenmodell 1.

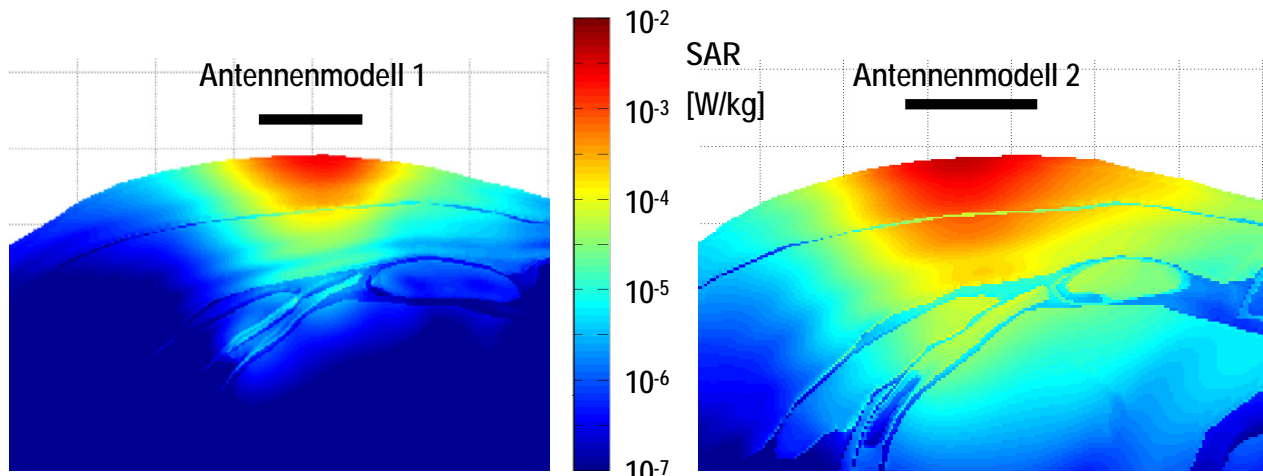


Abbildung 3.29: SAR-Verteilungen in einem Horizontalschnitt durch den Brustkorb im Bereich des Herzens auf Höhe der Antennenmitte für die Anregungsform „Vfg 1/2008 3,4-4,8 GHz, max.“, links: Befeldung mit Antennenmodell 1, rechts: Befeldung mit Antennenmodell 2

3.4.5 Szenario 5: Modell mit 3 simultan betriebenen Quellen

Dieses Szenario stellt einen Fall der simultanen Exposition durch drei Quellen im Kopfbereich dar. Konkret wurde die Situation eines Infoterminals mit Computer und Bildschirm modelliert, wobei eine UWB-Quelle am Computer (z.B. als USB-Stick) und 2 UWB-Quellen am oberen Rahmen des Bildschirms (z.B. drahtlose Webcams) positioniert sind. Das Computergehäuse und der Bildschirm wurden als ideal metallisch leitfähig angenommen. Für alle drei Quellen wurde Antennenmodell 1 verwendet, wobei die FDTD-Berechnungen allerdings nur im Frequenzbereich 3,1-4,8 GHz durchgeführt wurden. Diese Einschränkung wurde notwendig, um die maximale FDTD-Gitterschrittweite im Gewebe, unter Einhaltung des $\lambda/10$ -Kriteriums, auf 0,7 mm erhöhen und damit trotz des relativ großen Rechenraumes mit den vorhandenen Computerressourcen das Auslangen finden zu können. Die jeweils kleinste Distanz der drei Quellen zum Kopf betrug 8,5 cm, 5 cm und 10 cm. Abbildung 3.30 zeigt das in SEMCAD X erstellte Modell.

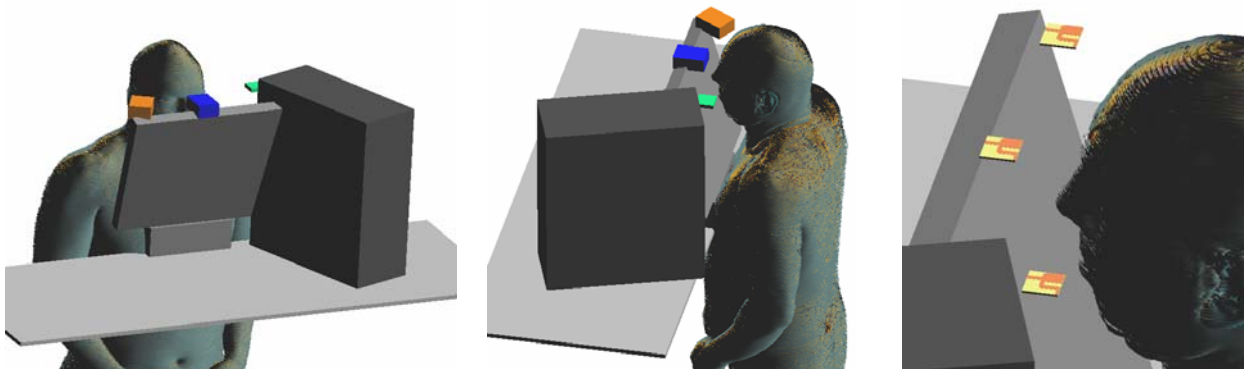


Abbildung 3.30: SEMCAD X Modell des Szenarios 5: Exposition des Kopfes mit 3 gleichzeitig aktiven UWB-Quellen.

Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse wurden unter der Annahme der Ausschöpfung der Sendeleistungslimits der Regulierungen [4] und [5], bei Berücksichtigung eines mittleren Antennengewinns von 3 dBi berechnet.

Abbildung 3.31 zeigt zur Illustration eine Sequenz von Momentaufnahmen der elektrischen Feldstärkeverteilung in einer Horizontalebene durch den Kopf in Zeitschritten von 0,5 ns.

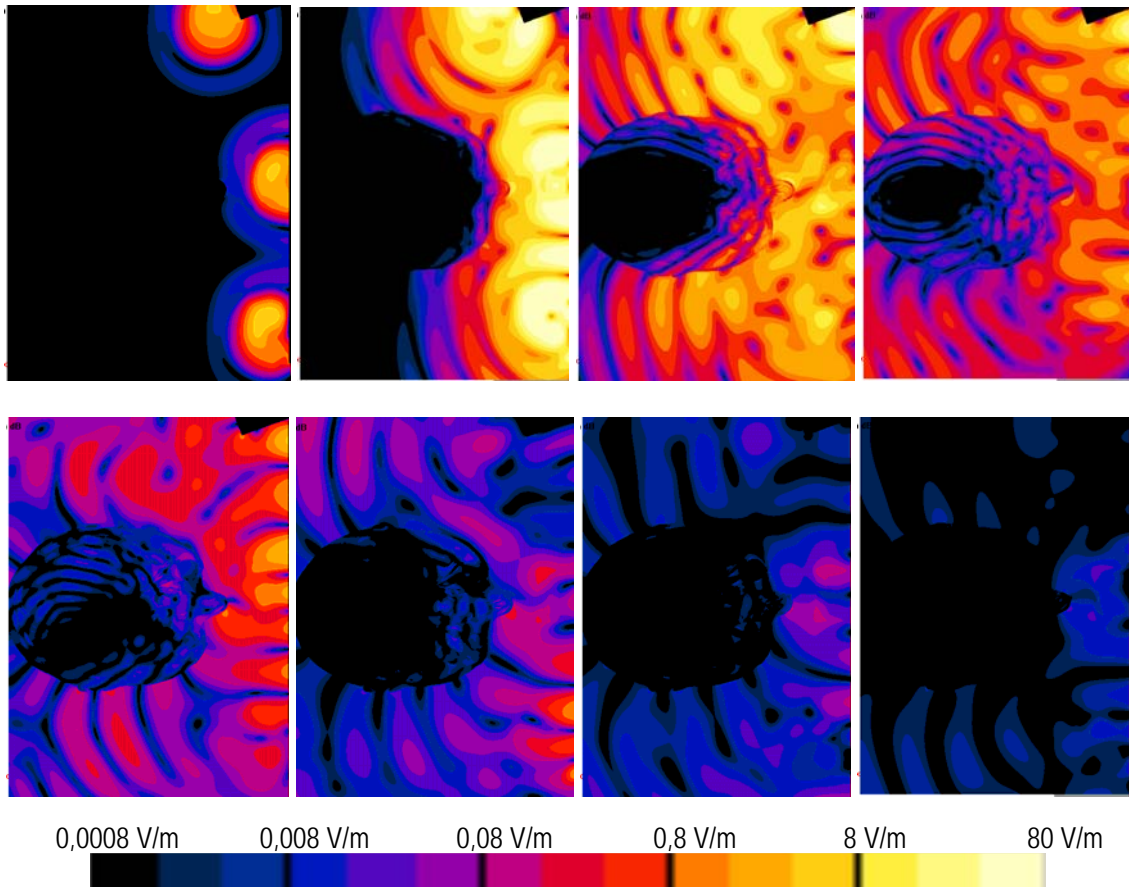


Abbildung 3.31: Sequenz von Momentaufnahmen (Zeitschritt 0,5 ns) der elektrischen Feldstärke in einer Horizontalebene durch den Kopf (Quellen-Leerlaufspannungsamplitude 7,9 V pro Quelle)

Die maximale über 10g Gewebe gemittelte SAR trat in dieser Situation im Bereich der Nasenspitze auf. Abbildung 3.32 zeigt die Berechnungsergebnisse für die maximale über 10g Gewebe gemittelte SAR für die betrachteten Anregungsformen.

Die maximale über 10g Gewebe gemittelte SA bei Anregung „Vfg 1/2008 3,4-4,8 GHz max.“ beträgt $2,14 \cdot 10^{-10}$ J/kg.

Aufgrund der, im Vergleich zu Szenarien 1-4 wesentlich größeren Distanz der Quellen zum Körper sind die SAR_{10g} und SA_{10g} Werte erwartungsgemäß (trotz simultaner Exposition durch drei Quellen) vergleichsweise sehr gering. Konkret liegt der maximale SAR_{10g} Wert unter den betrachteten Bedingungen bei weniger als 0,0025% des Basiswertes nach ICNIRP [13] von 2 W/kg (Allgemeinbevölkerung, Kopf). Das Verhältnis der maximalen SA_{10g} zum entsprechenden Basiswert nach ICNIRP (2 mJ/kg) beträgt sogar weniger als 0,000011%.

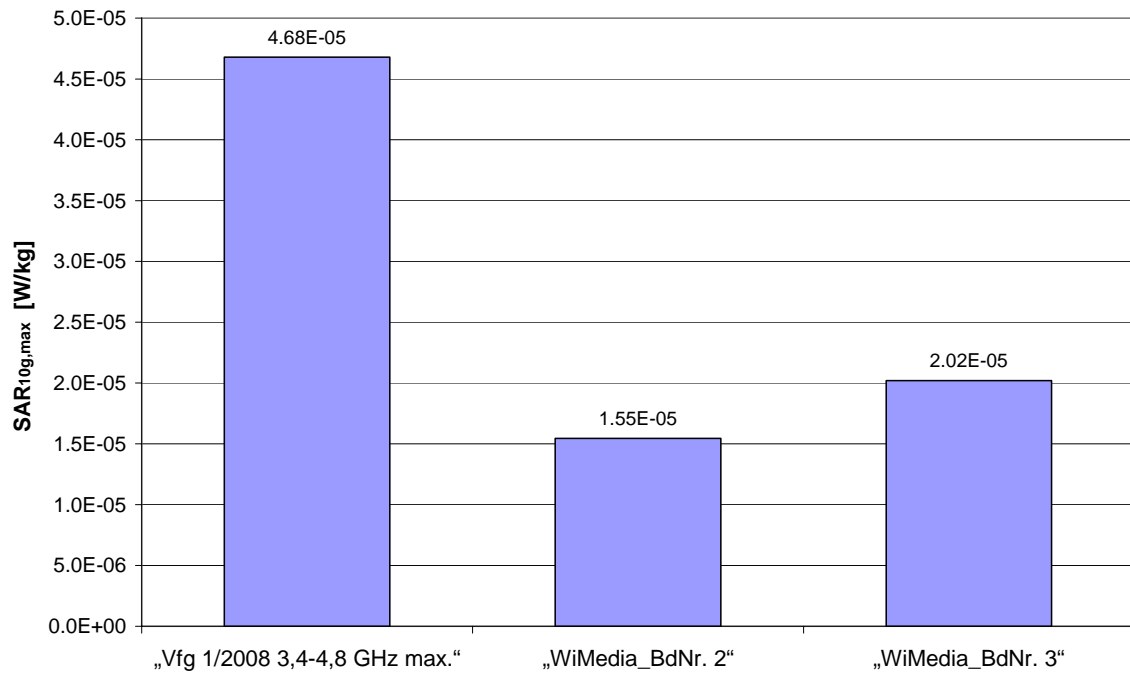


Abbildung 3.32: Maximale über 10g Gewebe gemittelte SAR in Szenario 3 für die unterschiedlichen betrachteten spektralen Anregungsformen (vgl. Kapitel 3.2.3)

Abbildung 3.33 zeigt die SAR-Verteilungen (räumlich ungemittelt) in einem Horizontalschnitt durch den Kopf auf Höhe der Antennen für die beiden Anregungsfälle „Vfg 1/2008 3,4-4,8 GHz, typ.“ und „WiMedia Band 2.“.

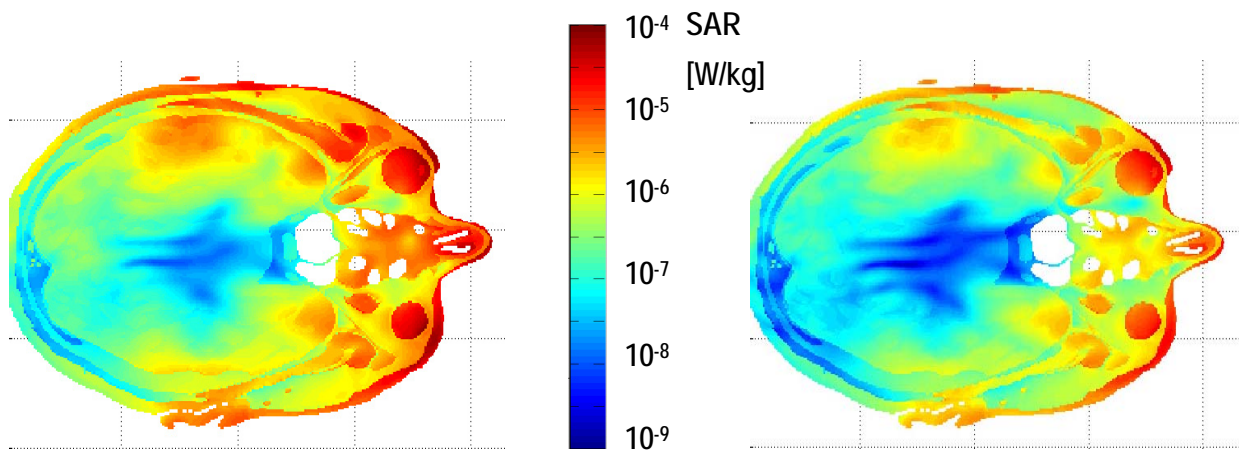


Abbildung 3.33: SAR-Verteilung in einem Horizontalschnitt durch den Kopf auf Höhe der Antennen für die Anregungsformen „Vfg 1/2008 3,4-4,8 GHz, typ.“ (links) und „WiMedia Band 2.“ (rechts)

4 BEURTEILUNG DER MESS- UND BERECHNUNGSERGEBNISSE

4.1 Exposition im Fernfeld von UWB-Geräten

Die durchgeführten Messungen und numerischen Berechnungen bestätigen die bereits auf Basis theoretischer Überlegungen ableitbare Erkenntnis (vgl. Kapitel 2.1 in [2]), dass zur Funkregulierung (nach [3],[4],[5]) konforme UWB-Geräte im Frequenzbereich von 3,1-10,6 GHz Hochfrequenzimmissionen verursachen, die mehrere Größenordnungen unterhalb den derzeit anerkannten Referenzwerten für die Allgemeinbevölkerung (z.B. nach ICNIRP [13]) liegen. Die in 15 cm Abstand zu einer Auswahl von derzeit bereits verfügbaren UWB-Geräten gemessenen, zeitlich gemittelten äquivalenten Strahlungsleistungsdichten waren in keinem der untersuchten Fälle größer als $0,33 \text{ mW/m}^2$. Dies entspricht $0,0033\%$ des von ICNIRP [13] für die Allgemeinbevölkerung festgelegten Referenzwertes von 10 W/m^2 . Selbst bei Hochrechnung dieser Messergebnisse auf den Fall theoretisch idealer spektraler Effizienz der Aussendungen, werden die zeitlich gemittelten Strahlungsleistungsdichten in Abständen $>15 \text{ cm}$ zu einzelnen in Europa zugelassenen UWB-Geräten noch immer unterhalb von 1 mW/m^2 (also bei weniger als $0,01\%$ des genannten Referenzwertes) zu liegen kommen. In größeren Abständen (z.B. $> 1 \text{ m}$) werden die von derartigen UWB-Geräten verursachten Immissionswerte typischerweise so gering sein ($<0,025 \text{ mW/m}^2$, bzw. $<0,00025\%$ des ICNIRP-Referenzwertes [13] für die Allgemeinbevölkerung), dass sie sich im Allgemeinen einer messtechnischen Erfassung mit Standard-Messgeräten entziehen werden.

Die maximalen, zeitlich ungemittelten Maximalimmissionen (Burst-Effektivwert bei MB-OFDM basierten UWB-Geräten bzw. Impulsspitzenwerte bei Impuls UWB-Geräten) in 15 cm Abstand zu den Geräten lagen bei den untersuchten Geräten unterhalb von $0,52 \text{ mW/m}^2$ bzw. $2,5 \text{ mW/m}^2$ äquivalenter Strahlungsleistungsdichte. Dies entspricht weniger als $0,0052\%$ bzw. weniger als $0,025\%$ des Referenzwertes für Impulsbelastung nach ICNIRP [13].

Zum Vergleich der von UWB-Geräten zu erwartenden Immissionen mit anderen „Short Range“ Übertragungsverfahren fasst Tabelle 4.1 in der Literatur berichtete typische Immissionswerte von WLAN, DECT und Bluetooth-Geräten, sowie drahtloser Computerperipherie und drahtloser Audioübertragungssysteme in 15 cm und 1 m Distanz zu den Quellen zusammen.

Verglichen mit den Ergebnissen der Untersuchungen in der Nähe von UWB-Geräten liegen die Immissionen aller dieser Short Range Anwendungen deutlich über jenen von UWB-Geräten zu erwartenden. Dies gilt insbesondere dann, wenn man nicht nur die Absolutwerte der äquivalenten Strahlungsleistungsdichte vergleicht, sondern die auf den jeweiligen Referenzwert bezogenen Relativwerte der Strahlenbelastung.

Ein weiterer anschaulicher Vergleich der zu erwartenden UWB-Immissionen kann beispielsweise mit den Immissionen zufolge des digitalen Fernsehrundfunks DVB-T gezogen werden. Wie oben erwähnt, werden die in Europa betreibbaren UWB-Geräte in 1 m Abstand Immissionen im Ausmaß von weniger als $<0,025 \text{ mW/m}^2$, bzw. $<0,00025\%$ des ICNIRP-Referenzwertes verursachen, wobei dieser Wert als Obergrenze unter der Annahme optimaler spektraler Effizienz des Gerätes angesehen werden kann. Die Immissionen im Abstand von ca. 1 m zu realen UWB-Geräte werden demnach deutlich

unterhalb dieses Wertes, typischerweise im Bereich von ca. 0,005-0,05 mW/m² liegen (vgl. Messergebnisse in Kapitel 2.4). Dies entspricht 0,00005-0,0005% des Referenzwertes. Aus einer ausführlichen Arbeit zum Thema der DVB-T Immissionen in Deutschland [26], [27] wurde das 50. Perzentil (p50) der DVB-T-Immissionen zu ca. 0,0015 mW/m² bestimmt (basierend auf der Auswertung von 200 Immissionspunkten in Deutschland). Unter der Annahme eines mittleren Referenzwertes ([13]) im DVB-T Frequenzbereich von ca. 3 W/m², entspricht der ermittelte p50 Wert daher ca. 0,00005% des Referenzwertes, also in etwa der gleichen Größenordnung, wie die von einem UWB-Gerät in 1 m Abstand zu erwartenden Immissionen.

| Gerätetyp | S _{15cm} | S _{100cm} | S _{max,ICNIRP} | Quelle |
|--------------------------------|--|----------------------|-------------------------|---------------------|
| | [mW/m ²] | [mW/m ²] | [mW/m ²] | |
| DECT Mobilteil | - | 4-10 | 9700 | [20],[21] |
| DECT Basisstation (1 Gespräch) | 10-65 | 0,24-17 | 9700 | [20],[21],[24],[25] |
| WLAN Access Point | 4-183 | 2,7-6 | 10000 | [22][23],[24],[25] |
| WLAN Einsteckkarten | 12-150 | 0,06-8 | 10000 | [25] |
| Bluetooth Klasse 1 | 40 | 0,54 | 10000 | [24] |
| Bluetooth Klasse 2 | 0,42 | 0,06 | 10000 | [24] |
| Drahtlose Kopfhörer (Sender) | - | 0,05-0,33 | 4320 | [20],[21] |
| Drahtlose Maus/Tastatur | < 6 | << 6 | 2000 | [24] |
| MB-OFDM-UWB (Belkin) | 0,034-0,085 | - | 10000 | diese Arbeit |
| MB-OFDM-UWB (IOGEAR) | 0,060-0,075 | - | 10000 | diese Arbeit |
| Impuls-UWB (PulsON) | 0,22-0,32 | - | 10000 | diese Arbeit |
| Impuls-UWB (Ubisense) | 0,008 ^a -0,030 ^b | - | 10000 | diese Arbeit |

^a minimal gemessener Wert, nur UWB-Immissionen

^b maximal gemessener Wert, UWB- plus Kontrollkanal-Immissionen

Tabelle 4.1: Typische Immissionen unterschiedlicher Funkanwendungen in 20 cm und 1m Abstand zu den Quellen

Ein weiterer Punkt, der in Zusammenhang mit UWB-Technologien in strahlenschutztechnischer Sicht zu Diskussionen Anlass gibt, ist die Tatsache der Emission von sehr kurzen Impulsen, die, wie vom Phänomen des Mikrowellenhörens bekannt, grundsätzlich auch anders als auf die klassische „thermische“ Weise wirksam werden können.

Dazu ist zunächst festzuhalten, dass dies nicht für UWB-Geräte nach WiMedia-Standard anwendbar ist, da diese Geräte keine kurzen UWB-Impulse in obigem Sinne abstrahlen. WiMedia-UWB-Geräte setzen HF-Bursts mit Burstlängen im Bereich von Mikrosekunden und darüber ab und unterscheiden sich in dieser Hinsicht daher nicht wesentlich (abgesehen von Frequenzbereich, Bandbreite und viel geringerer Sendeleistung) von anderen, bereits etablierten Technologien, wie z.B. WLAN IEEE 802.11g.

Aber auch für „echte“, d.h. Impuls-basierte UWB-Geräte, die der aktuellen Regulierung im Frequenzbereich von 3,1-10,6 GHz (nach [3],[4],[5]) genügen, besteht auf Basis der Ergebnisse dieses Vorhabens und elementarer theoretischer Betrachtungen keine Möglichkeit relevanter „nicht thermischer“ Wirkungen in oben genanntem Sinn. Selbst unter der theoretischen Annahme einer Vollausschöpfung der Spektralmaske für die Spitzenleistung (0 dBm/50 MHz) gleichmäßig über den gesamten Frequenzbereich von 3,1-10,6 GHz, ergibt sich die maximale EIRP Impulsspitzenleistung zu

$$P_{peak,max} = \frac{7500MHz}{50MHz} * 10^{-3} W = 0,15W \quad (4.1)$$

was im Abstand von z.B. 15 cm zur Quelle auf einen Spitzenwert der Leistungsflussdichte von nicht mehr als

$$S_{peak,max} = \frac{0,15W}{4\pi * 0,15^2} = 0,53W / m^2 \quad (4.2)$$

führen kann.

Für Impuls-Spitzenbelastungen sieht ICNIRP derzeit ein Limit entsprechend des 32-fachen Referenzwertes der Feldstärke bzw. 1000-fachen Referenzwertes der Leistungsflussdichte vor, d.h. der errechnete Maximalwert liegt bei nur etwa einem halben Promille des Referenzwertes hinsichtlich der Leistungsflussdichte.

Für reale Geräte, mit geringerer Ausschöpfung des zur Verfügung stehenden Spektrums werden diese Maximalwerte deutlich geringer ausfallen. Dies bestätigen auch die im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführten Messungen mit zwei Impuls-basierten UWB-Geräten. Die in 15 cm Abstand gemessenen Feldstärkespitzenwerte betragen 0,89 V/m (PulsON) bzw. 0,96 V/m (Ubisense), entsprechend 2,1 mW/m² (PulsON) und 2,4 mW/m² (Ubisense) äquivalenter Strahlungsleistungsdichte. Hinsichtlich des Referenzwertes für den Spitzenwert der Leistungsflussdichte bedeutet dies daher relative Belastungen von nicht mehr als 0,000021% bzw. 0,000024% des ICNIRP-Limits. Dabei ist jedoch noch zu berücksichtigen, dass gemäß dem Wortlaut in [13] für die Impulsspitzenbewertung streng genommen die über die Impulsdauer gemittelte Amplitude zu verwenden ist. Im Sinne eines konservativen Vergleichs wurde hier jedoch die tatsächliche Feldstärkeamplitude (Spitzenwert) verwendet, d.h. die, nach den Definitionen in [13] beurteilte tatsächliche relative Impuls-Belastung wird sogar noch geringer sein.

4.2 Exposition bei körpernah betriebenen UWB-Geräten

Die Befunde der sehr geringen Immissionen aus den durchgeführten Messungen werden auch durch die numerischen Berechnungen bestätigt. Soweit vergleichbar, stehen die Berechnungsergebnisse physikalisch im Einklang mit der bisher zum Thema der Absorption von UWB-Feldern im Gewebe verfügbaren wissenschaftlichen Literatur ([28]-[34]), wenngleich sich bisher in der Literatur hauptsächlich grundlegende Arbeiten zur Absorption von UWB-Feldern finden und noch keine Arbeiten hinsichtlich der Exposition durch UWB-Geräte mit spezifischen, praktisch relevanten Sendespektren. Die maximale, über 10g Gewebe gemittelte SAR in den untersuchten und als repräsentativ anzusehenden Szenarien, mit Abständen zwischen UWB-Quelle und Körper im Bereich von 8-12 mm, errechnete sich für das theoretisch maximal nach europäischer [3], bzw. deutscher [4] UWB-Regulierung zulässige Sendespektrum zu 0,013 W/kg. Bei Zugrundelegung des Basiswertes für lokale Befeldung von Kopf und Rumpf nach [13] entspricht dies 0,65% des Basiswertes. Für reale, den erlaubten Spektralbereich nicht voll ausnützende Geräte, bzw. Geräte, die nur Subbereiche des gesamten zur Verfügung stehenden Spektrums ausnützen, sind entsprechend geringere maximale SAR_{10g}-Werte zu erwarten, typischer Weise im Bereich von maximal 0,001-0,008 W/kg. Die numerischen Berechnungen der über 10g gemittelten spezifischen Absorption SA_{10g} führten ebenfalls auf nur sehr geringe Belastungen in Relation zum Basiswert von 2 mJ/kg. In jenem Szenario, das zu einer maximalen SAR_{10g} führte, betrug die, bereits unter der konservativen Annahme eines Einzelimpulses berechnete über 10g gemittelte SA_{10g} 8,74*10⁻⁹J/kg, was bezogen auf das ICNIRP-Limit für Allgemeinbevölkerung (2mJ/kg) einer Belastung von nur 0,00044% des Limits entspricht.

Einen Vergleich mit anderen direkt am Körper betreibbaren Funkanwendungen, wie z.B. DECT-Telefone, WLAN und Bluetooth zeigt Tabelle 4.2. Die Daten für die Exposition durch UWB basieren auf den in diesem Vorhaben durchgeführten numerischen Berechnungen (Annahme typischer Sendespektren). Alle anderen Expositionsdaten stammen aus SAR-Messungen an konkreten Produkten. Die durch UWB-Geräte verursachte lokale Exposition ist um mindestens 1-2 Größenordnungen geringer einzustufen, als die typische Exposition durch die anderen angeführten Technologien. Die von realen UWB-Geräten in Europa zu erwartenden maximalen SAR_{10g} Werte werden daher maximal in der Größenordnung jener von Bluetooth Klasse 3 Geräten bekannten Werten liegen.

| Gerätetyp | max. SAR _{10g} | Quelle |
|--------------------------------------|-------------------------|--------------|
| | [W/kg] | |
| DECT Mobilteil ^a | 0,011-0,052 | [24] |
| WLAN Access Point ^a | 0,1-0,81 | [24],[25] |
| WLAN Einsteckkarten ^a | 0,05-0,43 | [20],[25] |
| Bluetooth Class 1 ^a | 0,09-0,47 | [20],[24] |
| Bluetooth Class 2 ^a | 0,0092 | [24] |
| Bluetooth Class 3 ^a | 0,001-0,003 | [24] |
| Drahtlose Maus/Tastatur ^a | ≤ 0,005 | [24] |
| MB-OFDM-UWB ^b | 0,0002-0,002 | diese Arbeit |
| Impuls-UWB (FCC) ^b | 0,0008-0,013 | diese Arbeit |
| Impuls-UWB (Europa) ^b | 0,0002-0,0034 | diese Arbeit |

^a Messungen in homogenen Körperphantomen mit konkreten Produkten

^b Numerische Berechnungen mit vereinfachten Quellen und einem anatomischem Körpermodell

Tabelle 4.2: Typische maximale SAR_{10g} Werte unterschiedlicher in unmittelbarer Körpernähe betriebene Funkanwendungen

4.3 Erhöhung des Immissionshintergrundes durch UWB-Geräte

In einer kürzlich erschienenen Publikation [35] wird schließlich die potenzielle Erhöhung des elektromagnetischen Immissionshintergrundes bei intensiver lokaler Konzentration von UWB-Anwendungen angedeutet. In [35] wird dies konkret in Zusammenhang mit innerstädtischen Situationen mit einer Konzentration von Fahrzeugen, ausgerüstet mit UWB-basierten Fahrerassistenzsystemen angesprochen. Obwohl derartige UWB-Systeme wesentlich höhere Frequenzen (21,65-26,65 GHz) nutzen werden, als die hier behandelten UWB-Systeme, sind die hier gewonnenen Erkenntnisse über die Größenordnung der zu erwartenden Immissionen näherungsweise übertragbar, nicht zuletzt deshalb, weil hinsichtlich der spektralen EIRP-Sendeleistungsdichtelimits (sowohl für die mittlere, als auch für die Spitzenleistungsdichte) in der Funkregulierung [36],[37] die gleichen Grenzwerte definiert sind. Ausgehend von der Obergrenze der mittleren spektralen EIRP-Sendeleistungsdichte von -41,3 dBm/MHz liegt die theoretisch, maximal mögliche EIRP-Gesamtsendeleistung bei 0,375 mW (bei Annahme von 5 GHz Bandbreite im 21,65-26,65 GHz Frequenzband) bzw. bei maximal 0,289 mW (bei Annahme von 3,9 GHz Gesamt-Bandbreite in den Frequenzbändern 3,4-4,8 GHz und 6,0-8,5 GHz). Für die folgenden Betrachtungen wird daher mit einer theoretisch maximalen mittleren Sendeleistung eines UWB-Gerätes von ca. 0,35 mW gerechnet, wengleich zu erwähnen ist, dass reale Geräte teilweise weit hinter diesen Werten zurückbleiben werden. Geht man, entsprechend dem Gedanken in [35] davon aus, dass die lokale Konzentration von UWB-Geräten mit einer lokalen Konzentration von Personen korreliert (Lenker der Fahrzeuge, bzw. User von anderen UWB-

Anwendungen), kann vermutet werden, dass die Anhebung des Immissionshintergrundes durch die UWB-Geräte, gemessen am Immissionshintergrund verursacht durch etablierte Technologien, eher gering sein wird. Alltäglichen Beobachtungen im urbanen Bereich zufolge, erscheint es nicht übertrieben davon auszugehen, dass von 30 Personen (z.B. Fahrzeuglenkern) zumindest 1 Person gerade ihr Mobiltelefon benützt. Geht man von guter Versorgung und damit ca. 10 mW mittlerer Sendeleistung des Mobiltelefons aus, kann jede der 30 Personen ein UWB-System betreiben, ohne dass der Immissionshintergrund der UWB-Aussendungen höher liegt als der von dem einen aktiven Mobiltelefon verursachte Anteil.

Ein weiterer in [35] angeführter Aspekt ist die Frage in wie weit die Präsenz von UWB andere, mit adaptiven Sendeleistungsmechanismen ausgestattete Funkssysteme dazu veranlassen kann das Sendeleistungsniveau und damit die Exposition der Bevölkerung indirekt zu erhöhen. Wenngleich konkret aus gegenwärtiger Sicht nicht abschätzbar, so erscheint dieser Aspekt für Europa eher von untergeordneter Bedeutung, da die europäische UWB-Regulierung (im Vergleich zu den US-amerikanischen Festlegungen der FCC) mehr Rücksicht auf etablierte Funkdienste nimmt. So ist gegenwärtig in Europa der Frequenzbereich unterhalb von 3,4 GHz und zwischen 4,8 und 6,0 GHz überhaupt nicht und der WiMAX Frequenzbereich von 3,4-3,8 GHz nur für UWB-Systeme mit Störminderungstechniken nutzbar.

Zusammenfassend kann daher gesagt werden, dass die sich wahrscheinlich in naher Zukunft am Markt verbreitende UWB-Technologie, im Vergleich mit anderen bereits etablierten Funkanwendungen zu äußerst geringer Exposition von Personen führen wird.

5 LITERATUR

- [1] Schmid G, Neubauer G. Bestimmung der Exposition durch Ultra-Wideband Technologien. Teil 1(Arbeitspaket 1): Bestandsaufnahme. 1. Zwischenbericht zum gegenständlichen Forschungsvorhaben, ARC-IT-0212, Juli 2007
- [2] Schmid G, Perez LA. Bestimmung der Exposition durch Ultra-Wideband Technologien. Teil 2(Arbeitspaket 2): Mess- und Berechnungsverfahren. 2. Zwischenbericht zum gegenständlichen Forschungsvorhaben, ARC-IT-0223, Februar 2008
- [3] Entscheidung der Europäischen Kommission über die Gestattung der harmonisierten Funkfrequenznutzung für Ultrabreitbandgeräte in der Gemeinschaft 2007/131/EG, Amtsblatt der Europäischen Union, 21. Februar 2007.
- [4] Deutsche Bundesnetzagentur. Verfügung Vfg 1/2008, Allgemeinzuteilung der Frequenzen 30 MHz bis 10,6 GHz für die Nutzung durch Anwendungen geringer Leistung der Ultra-Wideband (UWB) Technologie
- [5] FCC 02 48A1 Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding Ultra-Wideband Transmission Systems, February 2002, Version vom 4. Mai 2007
<http://www.fcc.gov/oet/info/rules/part15/part15-5-4-07.pdf>
- [6] ISO/IEC 26907:2007: Information technology -- Telecommunications and information exchange between systems -- High Rate Ultra Wideband PHY and MAC Standard, March 2007
- [7] ISO/IEC 26908:2007: Information technology -- Telecommunications and information exchange between systems -- MAC-PHY Interface for ISO/IEC 26907, January 2007
- [8] Belkin, Inc.: Cable-Free USB Hub, User manual:
http://www.belkin.com/support/dl/P75325_F5U301_manual.pdf
- [9] IOGEAR, Inc.: Wireless USB Hub and Adapter
<http://www.iogear.com/product/GUWH104KIT/>
- [10] Time Domain, Inc.: PulsON P210 Reference Design Kit
http://www.timedomain.com/product_p210.html
- [11] Fa. Ubisense AG: <http://www.ubisense.de/>
- [12] Bornkessel C, Schubert M, Wuschek M. 2008. Bestimmung der Exposition durch WiMAX, Zwischenbericht „Entwicklung geeigneter Verfahren“ http://www.emf-forschungsprogramm.de/akt_emf_forschung.html/dosi_HF_001_ZwB_02.pdf
- [13] ICNIRP. Guidelines for limiting exposure to time varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). Health Physics, Vol. 74, pp.494-522, 1998
- [14] Chen ZN. 2007. Antennas for portable devices. England: John Wiley & Sons Ltd., ISBN:0470030739

- [15] Gabriel, S., Lau, R. W. and Gabriel, C. The dielectric properties of biological tissues: III. Parametric models for the dielectric spectrum of tissues. Phys. Med. Biol. 41, 2271–2293 (1996)
- [16] IEEE P1529/D0.0 Recommended Practice for Determining the Spatial-Peak Specific Absorption Rate (SAR) Associated with the Use of Wireless Handsets- Computational Techniques, 2003
- [17] http://www.imec.be/wwwinter/mediacenter/en/SSI_2008.shtml
- [18] ABM (Advanced Brain Monitoring, Inc.), 2005, EEG Technology Review: Wireless Sensor Headset B-Alert® Software Alertness and Memory Profiler (AMP) http://www.b-alert.com/resources/EEG_Tech_Pack_v3_no_appendix.pdf
- [19] <http://www.heise.de/tp/r4/artikel/24/24285/1.html>
- [20] Schmid G, Lager D, Preiner P, Überbacher R, Neubauer G, Cecil S. 2005. Bestimmung der Exposition bei Verwendung kabelloser Übermittlungsverfahren in Haushalt und Büro. Abschlussbericht ARC-IT-0126, http://www.emf-forschungsprogramm.de/forschung/dosimetrie/dosimetrie_abges/dosi_030_AB.pdf
- [21] Schmid G, Lager D, Preiner P, Überbacher R, Cecil S. 2007. Exposure caused by wireless technologies used for short-range indoor communication in homes and offices, Radiation Protection Dosimetry, Vol.124, No.1, pp.58-62.
- [22] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit BMU (Hrsg.): Bestimmung der realen Feldverteilung von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern in der Umgebung von Wireless LAN-Einrichtungen (WLAN) in innerstädtischen Gebieten. Schriftenreihe BMU-2007-702, http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/schriftenreihe_rs702.pdf
- [23] Schmid G, Preiner P, Lager D, Überbacher R, Georg R. 2007. Exposure of the general public due to wireless LAN applications in public places, Radiation Protection Dosimetry, Vol.124, No.1, pp.48-52.
- [24] Kramer A, Kühn S, Lott U, Kuster N. 2005. Development of Procedures for the Assessment of Human Exposure to EMF from Wireless Devices in Home and Office Environments. Beziehbar unter: http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/00053/00921/00922/index.html?lang=de#sprungmarke0_4
- [25] Kühn S, Kuster N. 2006. Development of Procedures for the Assessment of Human Exposure to EMF from Wireless Devices in Home and Office Environments. Supplement 1: Close-to-Body and base Station Wireless Data Communication Devices. Beziehbar unter : http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/00053/00921/00922/index.html?lang=de#sprungmarke0_4
- [26] Schubert M, Bornkessel C, Wuschek M, Schmidt P. 2007. Exposure of the general public to digital broadcast transmitters compared to analogue ones, Radiation Protection Dosimetry, Vol.124, No.1, pp.53-57.
- [27] Bornkessel C, Schubert M, Wuschek M, Schmidt P. 2006. Bestimmung der Exposition der Bevölkerung in der Umgebung von digitalen Rundfunk- und Fernsehsendern, Abschlussbericht (Teil1-3) http://www.emf-forschungsprogramm.de/forschung/dosimetrie/dosimetrie_abges/dosi_085.html

- [28] Filonenko E, Hand J, Vilches T, Toumazou C, Propagation of ultrawideband pulses and specific absorption rate within the human head, 23rd Annual Review of Progress in Applied Computational Electromagnetics, March 19-23, 2007 Verona. Italy, Conference Proceedings (CD) pp. 799-804.
- [29] Lim HB, Tan HX, FDTD analysis of UWB pulse interaction with biological tissues, 17th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2006, Conference Proceedings (CD) pp. 117-120
- [30] Converse M, Bond E, Van Veen BD, Hagness SC, A computational study of ultra-wideband versus narrow band microwave hyperthermia for breast cancer treatment, IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques, Vol. 54(5), 2006
- [31] Simicevic N, Exposure of biological material to ultra-wideband electromagnetic pulses: dosimetric implications, Health Physics. The Radiation Safety Journal. 92(6):574-583, June 2007
- [32] Simicevic N, Three-dimensional FDTD simulation of biomaterial exposure to electromagnetic nanopulses. Physics in Medicine and Biology, Vol. 50, pp.5041-5053, 2005
- [33] Simicevic N, Haynie DT, FDTD simulation of exposure of biological material to electromagnetic nanopulses, Physics in Medicine and Biology, Vol. 50, pp.347-360, 2005
- [34] Simicevic N, FDTD computation of human eye exposure to ultra-wideband electromagnetic pulses, published online arXiv:0711.0932v1 [physics.med-ph], 2007
- [35] ICNIRP. 2008. ICNIRP Statement on EMF-emitting new technologies, Health Physics Vol. 94, No.4, pp.376-392
- [36] Entscheidung der Europäischen Kommission zur Harmonisierung der befristeten Nutzung des Frequenzbandes um 24 GHz durch Kfz-Kurzstreckenradargeräte in der Gemeinschaft 2005/50/EG, Amtsblatt der Europäischen Union, 17. Januar 2005.
- [37] Deutsche Bundesnetzagentur. Verfügung Vfg 40/2005, Allgemeinzuteilung von Frequenzen für die Benützung durch die Allgemeinheit für Kraftfahrzeug-Kurzstreckenradare im Frequenzbereich 21,65 -26,65 GHz