



R E P O R T

Forschungsvorhaben

*Bestimmung der Exposition durch Ultra-
Wideband Technologien*

Abschlussbericht

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

Juni 2008
Exemplar 1
ARC-IT-0237

Verteiler:

- 1-4 Bundesamt für Strahlenschutz
- 5 DI. Lamedschwandner
- 6 DI. Schmid
- 7 DI Cecil
- 8 Ing. Petric
- 9 Dr. Neubauer
- 10 Hr. Pérez, BSc.
- 11 Sekretariat ARCS/IT

Bestimmung der Exposition durch Ultra Wideband Technologien

Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben

im Auftrag des

**Bundesamtes für Strahlenschutz
38201 Salzburg, Deutschland**

Gernot Schmid, Stefan Cecil, Benjamin Petric, Georg Neubauer, 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

Dr. Georg Neubauer
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

KURZZUSAMMENFASSUNG

Um das Ausmaß der Exposition durch Geräte der in naher Zukunft auf dem Europäischen Markt erwarteten Ultra-Wideband (UWB) Technologie abschätzen zu können wurden Immissionsmessungen in der Nähe bereits verfügbarer UWB-Geräte, sowie numerische Berechnungen der spezifischen Absorptionsrate SAR und der spezifischen Absorption (SA) durchgeführt. Die messtechnischen Untersuchungen erfolgten mittels direkter Messantenne und Spektrumanalysator. Die numerischen Berechnungen erfolgten unter Verwendung der FDTD-Methode und eines anatomischen Körpermodells mit dispersiven dielektrischen Gewebeparametern, wobei unterschiedliche realistische Expositionsszenarien mit der UWB-Quelle in unmittelbarer Nähe zum Körper (Oberschenkel, Hinterkopf, Brust, Auge) und bei unterschiedlichen spektralen Anregungsformen betrachtet wurden.

Die durchgeführten Messungen ergaben in 15 cm Abstand maximale, zeitlich gemittelte Werte der äquivalenten Strahlungsleistungsdichte von nicht mehr als ca. 0,32 mW/m². Zeitliche Spitzenwerte der äquivalenten Strahlungsleistungsdichte lagen in 15 cm Abstand zu den Geräten bei weniger als 2,4 mW/m².

Die Ergebnisse der numerischen Berechnungen führten auf maximale über 10g Gewebe gemittelte SAR-Werte von bis zu maximal 0,013 W/kg, bei Zugrundelegung einer 100% Ausnutzung des in Europa zulässigen Sendespektrums. Für reale Geräte ist davon auszugehen, dass die maximalen SAR_{10g}-Werte noch 1-2 Größenordnungen geringer sein werden. Die von regulierungskonformen Geräten in Europa zu erwartenden Werte der maximalen über 10g gemittelten spezifischen Absorption SA_{10g} werden ebenfalls deutlich unterhalb des entsprechenden Limits liegen, typischerweise im Bereich von deutlich weniger als 10⁻⁸ J/kg, also deutlich weniger als 0,0005% des Basiswertes.

ABSTRACT

In order to assess the extent of personal exposure caused by Ultra-Wideband (UWB) devices to be expected on the European market in near future, field strengths measurements close to already available devices as well as numerical computations of specific absorption rate SAR and specific absorption SA were carried out. The measurements were performed using a directive antenna in combination with a spectrum analyzer. The numerical computations, based on the FDTD method, were carried out using an anatomical body model considering dispersive dielectric tissue properties. The exposure of different body areas (upper leg, back head, thorax, eye) and different spectral compositions of the excitation signals were considered for the computations.

The measurements yielded maximum average equivalent power flux densities at 15 cm distance of not more than approximately 0.32 mW/m². Temporal peak values of the equivalent power flux density at 15 cm distance were found to be less than 2.4 mW/m².

The results of the numerical computations yielded a maximum 10g averaged spatial peak SAR of up to 0.013 W/kg, if a 100% spectral efficiency of the source with respect to the European UWB regulation was assumed. For real devices it can be assumed that the maximum SAR_{10g}-values will be 1-2 orders of magnitude lower than this value. Values of 10g averaged spatial peak specific absorption SA_{10g} will also be significantly less than the corresponding limit, typically less than 10⁻⁸ J/kg, corresponding to less than 0.0005% of the basic restriction.

INHALT

1	EINLEITUNG	5
2	GRUNDLAGEN DER „ULTRA-WIDEBAND“ TECHNOLOGIE	7
2.1	Definition des Begriffes „Ultra-Wideband“	7
2.2	Allgemeine physikalische Eigenschaften von UWB-Signalen	7
2.2.1	Möglichkeit hoher erzielbarer Datenraten	7
2.2.2	Robustheit gegenüber Effekten zufolge Mehrwegeausbreitung	9
2.2.3	Durchdringung von Objekten	10
2.2.4	Möglichkeit präziser Ortung	10
2.3	Spezielle UWB-Übertragungsverfahren	11
2.3.1	Das Impulsradio-Verfahren	11
2.3.2	Direct Sequence UWB (DS-UWB)	15
2.3.3	Multiband-OFDM UWB (MB-OFDM-UWB)	16
3	DIE FUNKREGULIERUNG FÜR UWB	19
3.1	Situation in den USA	19
3.1.1	Indoor UWB-Systeme	19
3.1.2	Hand held UWB-Systeme	21
3.1.3	Weitere UWB-Systeme nach FCC Regulierung	22
3.2	Situation in Europa bzw. Deutschland	23
4	UWB-STANDARDISIERUNG	26
4.1	Allgemeines	26
4.1.1	Das UWB-Forum	26
4.1.2	Die WiMedia Alliance	26
4.1.3	Die Arbeitsgruppe IEEE 802.15a	27
4.1.4	ETSI-Standards für unterschiedliche Produktgruppen	27
5	UWB-ANWENDUNGEN	29
5.1	UWB-Anwendungen zu Kommunikationszwecken	29
5.1.1	Bereits kommerziell verfügbare Anwendungen	29
5.1.2	Absehbare UWB-Anwendungen in der Kommunikationstechnik	29
5.2	UWB-Anwendungen für Ortungs- und Identifikationszwecke	30
5.2.1	Bereits kommerziell verfügbare Anwendungen	30
5.2.2	Absehbare Anwendungen für Ortungs- und Identifikationszwecke	31
6	VERFAHREN ZUR MESSTECHNISCHEN EXPOSITIONSERFASSUNG IN UWB-FELDERN	32
6.1	Größenordnung der zu erwartenden Immissionen	32
6.1.1	Vorgaben durch die Funkregulierung	32
6.1.2	Einfache Abschätzung der Größenordnungen der Immissionen	34
6.2	Tauglichkeit unterschiedlicher Messverfahren für die Expositionsbestimmung in UWB-Feldern	38
6.2.1	Breitbandmessungen (Feldsonden)	38
6.2.2	Messungen im Zeitbereich (mit Digital-Oszilloskop)	38
6.2.3	Frequenzselektive Messungen (mit Spektrumanalysator)	39
6.2.4	SAR-Messungen bei körpernahen UWB-Sendern	40

6.3 Ermittlung praxistauglicher Messparameter anhand von Messungen unter Laborbedingungen	43
6.3.1 Messungen an einer Multiband-OFDM-UWB Quelle nach dem WiMedia Standard	43
6.3.2 Messungen an einer Impuls-UWB-Quelle	50
7 NUMERISCHE VERFAHREN FÜR DIE EXPOSITIONSERFASSUNG IN UWB-FELDERN	58
7.1 FDTD-Methode für UWB-Berechnungen.....	58
7.1.1 Implementierung dispersiver Gewebeparameter in FDTD	58
7.2 UWB-Absorption in biologischen Geweben.....	60
7.2.1 Modell eines homogenen Gewebblocks	62
7.2.2 Modell eines geschichteten Halbraumes	65
7.3 SAR, SA oder E als Bewertungsgröße der Exposition	70
8 MESSTECHNISCHE EXPOSITIONSERFASSUNG IN DER UMGEBUNG VON UWB-GERÄTEN	73
8.1 Gegenwärtig verfügbare UWB-Geräte.....	73
8.2 Messtechnisch untersuchte UWB-Geräte.....	74
8.2.1 Gerät 1: Cable Free USB Hub und Adapter (Belkin, Inc.) [16]	74
8.2.2 Gerät 2: Wireless USB Hub und Adapter (IOGEAR, Inc.) [17]	75
8.2.3 Gerät 3: PulsON Reference Design (Time Domain, Inc.) [38]	75
8.2.4 Gerät 4: Ubisense Serie 7000 (Ubisense AG) [14].....	76
8.3 Messmethoden.....	77
8.3.1 Unsicherheiten zufolge Messungen im Nahfeld der Messantenne.....	79
8.4 Messergebnisse	81
8.4.1 Gerät 1: Cable Free USB Hub und Adapter (Belkin, Inc.)	81
8.4.2 Gerät 2: Wireless USB Hub und Adapter (IOGEAR, Inc.)	82
8.4.3 Gerät 3: PulsON Reference Design (Time Domain, Inc.)	83
8.4.4 Gerät 4: Ubisense Serie 7000 (Ubisense AG).....	84
9 NUMERISCHE ABSORPTIONSSBERECHNUNGEN IN TYPISCHEN UWB-ANWENDUNGSFÄLLEN	88
9.1 Betrachtete Szenarien	88
9.2 Berechnungsmethode	88
9.2.1 Feldquellen-Modelle	88
9.2.2 Berechnungsmethode für unterschiedliche spektrale Anregungen	92
9.2.3 Konkret betrachtete spektrale Anregungsformen	94
9.3 Dielektrische Gewebeparameter	99
9.4 Berechnungsergebnisse	100
9.4.1 Szenario 1: Notebook mit UWB-Sendemodul auf Oberschenkel	100
9.4.2 Szenario 2: UWB-Funkmodul am Hinterkopf für EEG-Übertragung.....	102
9.4.3 Szenario 3: UWB-Funkmodul in Augennähe (Videobrille).....	105
9.4.4 Szenario 4: UWB-Funkmodul am Brustkorb (z.B. EKG-Übertragung).....	107
9.4.5 Szenario 5: Modell mit 3 simultan betriebenen Quellen	111
10BEURTEILUNG DER MESS- UND BERECHNUNGSERGEBNISSE	114
10.1 Exposition im Fernfeld von UWB-Geräten.....	114
10.2 Exposition bei körpernah betriebenen UWB-Geräten	116

10.3 Erhöhung des Immissionshintergrundes durch UWB-Geräte	117
11 ZUSAMMENFASSUNG	119
12 SUMMARY	122
13 LITERATUR	125

1 EINLEITUNG

„Ultra Wideband“ (UWB) ist in den vergangenen Jahren zu einem der prominentesten Schlagworte auf dem Gebiet der modernen Drahtloskommunikation geworden. Obwohl der Begriff relativ neu erscheint, ist die physikalische Grundidee der UWB-Technologie schon eine relativ alte, die in unterschiedlichen Ausprägungen seit mehr als 40 Jahren (vor allem im militärischen Bereich) Anwendung findet. Hinzugefügt muss natürlich werden, dass der gegenwärtig im Zusammenhang mit neuen und künftigen Anwendungen in der Kommunikationstechnik verwendete „UWB“-Begriff natürlich (zumindest größtenteils) auf gänzlich andere Anwendungen abzielt als es jene aus der Zeit der Anfänge der UWB-Technologie waren. Ursprünglich für militärische Zwecke, vor allem für die abhörsichere (weil schwer bzw. nicht detektierbare) Funk-Kommunikation in den USA entwickelt, kamen nach und nach auch Anwendungen im Bereich der Objekt-Ortung (UWB-Radar) und Identifikation dazu. Die künftigen Anwendungen der modernen UWB-Technologie werden jedenfalls sehr vielfältig sein. Das größte Marktpotenzial wird von der UWB-basierten Breitbandkommunikation erwartet, nach deren Einführung Kurzstrecken-Datenkabelverbindungen (im Bereich bis zu ca. 10 m) schon bald der Vergangenheit angehören könnten. Daten-, Audio-, und Videoübertragung zwischen nicht allzu weit (einige Meter) voneinander entfernten Geräten (z.B. Computer und Beamer, Komponenten von Heimkinosystemen, Computer und zugehörige Peripherie, wie z.B. externe Speichermedien) werden durch erzielbare Übertragungsraten von mehreren hundert MBit/s (teilweise bis in den GBit/s-Bereich) in nicht allzu ferner Zukunft auch drahtlos möglich sein. Aber nicht nur auf dem Gebiet der Drahtloskommunikation wird die moderne UWB-Technik neue Anwendungen ermöglichen. Vielversprechend sind auch UWB-Radaranwendungen im Verkehrstechnik-Sektor mit deren Hilfe Kollisionsvermeidung und Kommunikation von verkehrstechnisch relevanten Informationen gleichzeitig erfolgen kann. Aufgrund der besonderen Eigenschaften von UWB-Signalen ist auch die Objektdetektion und Identifikation ein viel versprechendes Anwendungsfeld. Hierzu zählen Systeme im Bereich der Personenkontrolle (z.B. Detektion von gefährlichen Gegenständen), im Bereich der Medizintechnik (z.B. Detektion von Tumoren), sowie im RFID-Bereich. Das Zukunftspotenzial der UWB-Technologie erscheint jedenfalls beeindruckend.

Gleichzeitig mit der Ankündigung bzw. Einführung einer neuen Funktechnologie ergibt sich jedoch auch die Frage nach der Exposition von Personen durch die elektromagnetischen Emissionen dieser Technologie.

Im Rahmen dieses Berichts wird zunächst eine kurze, allgemeinverständliche Einführung in die UWB-Technologie und deren physikalische Grundlagen gegeben, soweit sie aus strahlenschutztechnischer Sicht relevant erscheinen. Daran anschließend wird der gegenwärtige Stand der Funkregulierung für UWB-Geräte, sowie die Situation im Hinblick auf die Standardisierung von UWB-Übertragungsverfahren zusammengefasst und eine Übersicht über konkrete, bereits absehbare UWB-Anwendungen gegeben, wobei der Schwerpunkt auf jene Applikationen gelegt wurde, bei denen eine relevante Exposition von Personen gegenüber den elektromagnetischen Feldern der UWB-Geräte nicht ausgeschlossen werden kann.

In weiterer Folge wird ein Überblick über verfügbare messtechnische und numerische Methoden zur Beurteilung der Exposition von Personen in den elektromagnetischen Feldern von UWB-Geräten gegeben und konkrete Verfahren für die im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführten Messungen und Berechnungen evaluiert bzw. optimiert.

Unter Verwendung dieser Mess- und Berechnungsverfahren werden Beurteilungen der Immissionen in der Nähe bereits verfügbarer UWB-Geräte, sowie Berechnungen der Strahlungsabsorption bei körpernahe Betrieb von UWB Geräten durchgeführt. Die Mess- und Berechnungsergebnisse werden im Hinblick auf die aktuellen Grenz- bzw. Referenzwerte diskutiert und mit den elektromagnetischen Immissionen anderer, bereits etablierter Funkanwendungen verglichen.

2 GRUNDLAGEN DER „ULTRA-WIDEBAND“ TECHNOLOGIE

2.1 Definition des Begriffes „Ultra-Wideband“

Bezüglich des Begriffes "Ultra Wideband" bestehen teilweise Auffassungsunterschiede. Aus technischer Sicht haben die ersten UWB-spezifischen funkregulatorischen Festlegungen durch die US-amerikanische *Federal Communications Commission (FCC)* im Jahr 2002 [1] diese Begriffsunsicherheit zunächst geklärt. Dieses Dokument definiert die relative Mindestbandbreite b_{min} bzw. die absolute Mindestbandbreite B_{min} von "Ultra Wideband" Systemen als

$$b_{min} = 2 \frac{f_o - f_u}{f_o + f_u} \geq 0.2 \quad \text{bzw.} \quad B_{min} = f_o - f_u \geq 500 \text{MHz},$$

wobei f_o bzw. f_u die obere bzw. untere Grenzfrequenz (als 10dB-Grenzfrequenz festgelegt) des Sendespektrums sind (Abbildung 2.1). Dies bedeutet, dass gemäß dieser Definition nur solche Systeme zur UWB-Technologie gezählt werden, deren relative Bandbreite mindestens 20% oder deren absolute Bandbreite mindestens 500 MHz beträgt.

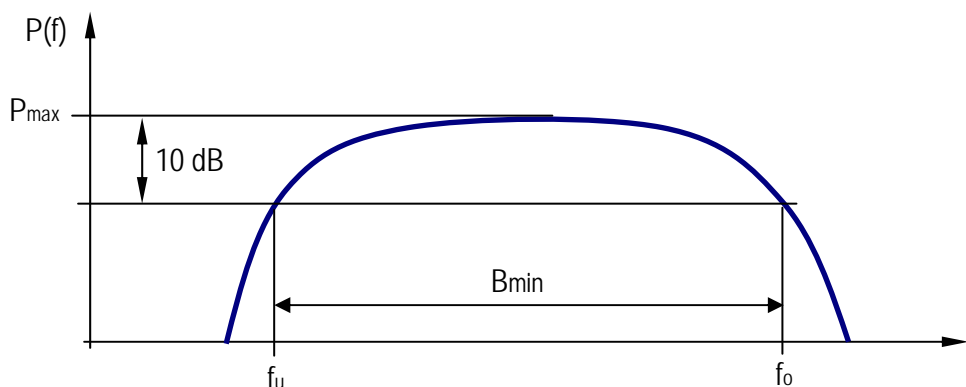


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung eines Sendespektrums zur Definition des Begriffes "Ultra Wideband" gemäß [1].

Diese Definition von „Ultra Wideband“ findet sich heute in praktisch der gesamten einschlägigen Literatur und wurde auch für die europäische bzw. deutsche Funkregulierung übernommen [2],[3].¹

2.2 Allgemeine physikalische Eigenschaften von UWB-Signalen

Der Grund warum die UWB-Technologie große Attraktivität für eine Reihe von Anwendungen besitzt, liegt an den folgenden für die UWB-Technologie charakteristischen Eigenschaften.

2.2.1 Möglichkeit hoher erzielbarer Datenraten

Eine der größten Herausforderungen für die moderne Drahtlos-Kommunikation ist die Befriedigung des ständig steigenden Bedarfs an Übertragungsgeschwindigkeit bei gleichzeitig naturgemäß begrenzten spektralen Ressourcen. Der fundamentale

¹ In der Entscheidung der Europäische Kommission 2007/131/EG vom 21. Februar 2007 wird für UWB-Geräte eine Mindestbandbreite von 50 MHz genannt. Es handelt sich dabei offensichtlich um einen Druckfehler.

Zusammenhang zwischen theoretisch erzielbarer Übertragungsrate und den Eigenschaften des Übertragungskanals wird durch die von Shannon gefundene, berühmte Beziehung für die Kanalkapazität C beschrieben:

$$C = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (2.1)$$

wobei B die Bandbreite und der Term S/N das Verhältnis der Signalleistung S zur Rauschleistung N angibt (im Englischen meist als *Signal to Noise Ratio SNR* bezeichnet). Geht man davon aus, dass die Rausch- bzw. Störleistung üblicherweise fremdbestimmt ist und nicht, bzw. nur schwer beeinflusst werden kann, ist aus dieser einfachen Beziehung leicht abzulesen, dass nur mehr zwei Möglichkeiten bleiben die Übertragungskapazität zu steigern. Nämlich entweder durch Erhöhung der Signalleistung oder durch Erhöhung der Bandbreite. Allerdings zeigt Gleichung (2.1) auch, dass die Kanalkapazität C linear mit der Bandbreite B, aber nur logarithmisch mit dem SNR ansteigt. D.h., die Erhöhung der Bandbreite ist die wesentlich effizientere Maßnahme zur Erreichung einer Kanalkapazitätserhöhung im Vergleich zur Erhöhung der Signalleistung. Auch aus praktischen Gesichtspunkten im Hinblick auf die oft batterie- bzw. akkubetriebenen Endgeräte der modernen Kommunikationstechnik wäre eine Erhöhung der Signalleistung die weniger vorteilhafte Option.

In der Vergangenheit wurde auf Basis konventioneller Funktechnologien dem steigenden Bedarf an Übertragungskapazität und spektraler Bandbreite vor allem durch das Vorrücken zu immer höheren Frequenzen Rechnung getragen². Das Ergebnis dieser Entwicklung ist der gegenwärtige Zustand eines dicht besetzten Spektrums, in dem den unterschiedlichen Funkdiensten separate, relative schmale Frequenzbereiche zugeordnet sind, in denen sie mit relativ großer spektraler Sendeleistungsdichte operieren.

Der Ansatz der UWB-Technologie ist dagegen gänzlich anders. Angesichts des in allen sinnvoll nutzbaren Frequenzbereichen bereits dicht mit schmalbandigen Funkdiensten belegten Spektrums wird mit UWB versucht die Ressource des elektromagnetischen Spektrums "parallel" zu nutzen, indem man mit extrem großen Bandbreiten bei gleichzeitig sehr niedriger spektraler Leistungsdichte operiert. UWB-Anwendungen nutzen daher Spektralbereiche, die eigentlich (zumeist sogar durch Lizenzen) einer ganzen Reihe anderer Funkdienste zugeordnet sind. Durch die sehr geringe spektrale Leistungsdichte von UWB-Anwendungen wirken diese für die parallel dazu betriebenen Schmalbandanwendungen praktisch nur als Rauschen und sollten daher zu keinen Interferenzen führen (Abbildung 2.2).

Die Tatsache, dass die Betreiber der herkömmlichen Schmalbandfunkdienste teilweise enorme Summen für Lizenzen zur exklusiven Nutzung des ihnen zugeordneten Frequenzbereiches bezahlt haben, und künftig UWB-Anteile in ihren Frequenzbereichen dulden müssen, ist zwar physikalisch irrelevant, hatte aber Auswirkungen auf den Regulierungsprozess. Naturgemäß argumentieren die Betreiber lizenzierter Funkdienste dahingehend, dass UWB-Immissionen in ihren Frequenzbereichen zu Störungen Anlass geben könnten, weshalb die funkregulatorischen Festlegungen hinsichtlich der maximal erlaubten Sendeleistung von UWB-geräten sehr restriktiv sind (siehe Kapitel 3).

² Das Vorrücken zu immer höheren Frequenzen bringt auch praktische Probleme mit sich, da sich die Wellenausbreitung mit steigender Frequenz immer mehr optischen Gesetzmäßigkeiten annähert. Dies bringt bei Frequenzen größer ca. 2-3 GHz immer mehr Probleme hinsichtlich der Durchdringung von Wänden und in *Non-Line-of-Sight* Situationen.

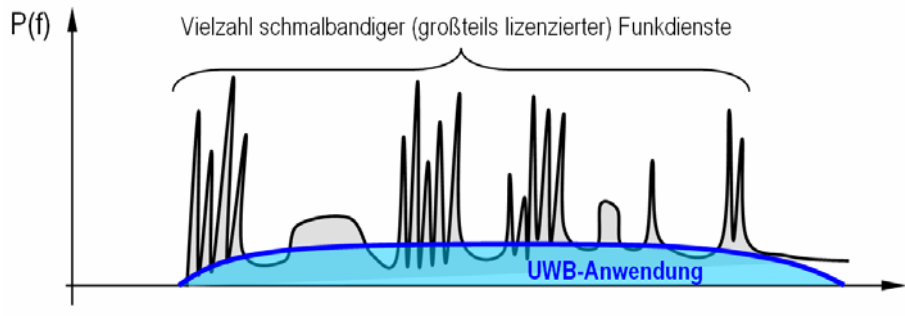


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung der "parallelen" Nutzung des Spektrums von Schmalbandfunkdiensten und UWB-Anwendungen

Die Tatsache der enorm großen spektralen Bandbreite ist jedenfalls die Basis für das Potenzial von UWB-Anwendungen in den Übertragungsgeschwindigkeitsbereich von mehreren hundert Mbit/s bis einige Gbit/s vorzustoßen. Die Tatsache, dass die spektralen Sendeleistungsdichten zur Vermeidung von Interferenzen mit anderen Funkdiensten auf sehr geringe Werte beschränkt bleiben müssen, legt aber gleichzeitig auch den relativ eingeschränkten Aktionsradius von UWB-Datenverbindungen auf typische Indoor- bzw. Handheld-Bereiche fest (typisch 10 m).

2.2.2 Robustheit gegenüber Effekten zufolge Mehrwegeausbreitung

Neben der oben behandelten fundamentalen Erhöhung der Übertragungskapazität bietet die große Sendebandbreite von UWB aber auch noch weitere Vorteile. Einer dieser Vorteile ist die Robustheit gegenüber nachteiligen Effekten der Mehrwegeausbreitung. Mehrwegeausbreitung von elektromagnetischen Wellen verursacht zwei wesentliche funktechnische Probleme. Einerseits führt die Mehrwegeausbreitung zu konstruktiver und destruktiver Interferenz, wobei letztere zu so genannten "Funklöchern" führt, d.h., Raumbereiche mit sehr geringer (zu geringer) Empfangsfeldstärke. Dieser als *Fading* bekannte Effekt führt bei schmalbandigen Funkdiensten zu Problemen, die, wenn überhaupt, nur durch aufwändige spezielle Maßnahmen (z.B. Diversity-Antennen) bekämpft werden können. Da Wellenausbreitungsphänomene grundsätzlich stark frequenzabhängig sind, besteht für sehr breitbandige Übertragungssysteme wie UWB eine inhärente Robustheit gegenüber Fading-Problemen, da davon ausgegangen werden kann, dass in jedem Raumpunkt zumindest ein bestimmter Teilbereich des gesamten Sendespektrums in ausreichender Empfangsfeldstärke vorliegt. Sehr anschaulich dargestellt wurde dies beispielsweise in [4], einer Arbeit die sich allgemein mit der Kanalcharakterisierung und Modellierung von MIMO (Multiple Input Multiple Output) und UWB-Systemen befasste. Anhand einer zweidimensionalen Wellenausbreitungsberechnung wurden dabei die Vorteile von sehr breitbandigen Systemen wie UWB gegenüber schmalbandigen wie z.B. WLAN im Hinblick auf die Empfangsfeldstärkeverteilung gezeigt (Abbildung 2.3). Es wurde ein Szenario mit zwei Ausbreitungspfaden in einer Fläche von 2 x 1 Meter untersucht. Der Sender ist an der Position (0/0) außerhalb des in Abbildung 2.3 dargestellten Bereichs positioniert, 1,5 m unterhalb des untersuchten Szenarios befindet sich eine perfekt leitende Ebene. Während beim WLAN Signal infolge der destruktiven Interferenz lokale Unterschiede der Signalstärke von bis zu 22 dB beobachtet wurden, sind die Verhältnisse bei UWB wesentlich günstiger.

Das zweite durch Mehrwegeausbreitung verursachte Problem ist die so genannte Intersymbolinterferenz (ISI). Dies ist der Effekt, dass zeitlich schnell aufeinander folgend gesendete Symbole durch Laufzeitunterschiede (zufolge Mehrwegeausbreitung) am

Empfangsort zeitlich überlappen. Bei Schmalbandsystemen führt dies zwangsläufig zur Verzerrung der empfangenen Symbole, die durch aufwändige Entzerrer (Equalizer) wieder wettgemacht werden muss. Die bei UWB-Anwendungen üblichen, gleichzeitig auch die große Bandbreite bewirkenden, extrem kurzen ausgesendeten Impulse (Symbole) mit Längen teilweise im Sub-Nanosekundenbereich, erlauben relativ lange Pausen zwischen den einzelnen aufeinander folgenden Impulsen (Symbolen), selbst bei sehr hohen Symbolraten von mehreren hundert Megasymbolen pro Sekunde. Dies bedeutet naturgemäß große Robustheit im Hinblick auf ISI.

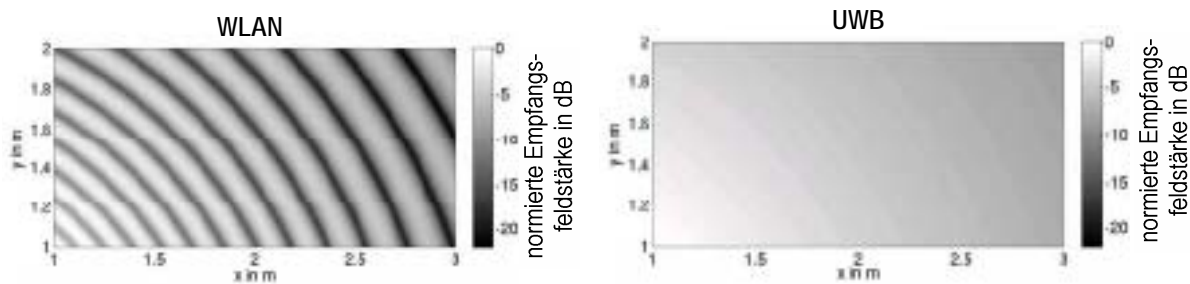


Abbildung 2.3: Vergleich der Interferenzen zufolge Mehrwegeausbreitung bei einem WLAN (links) und einem UWB Signal (rechts) aus [4]

2.2.3 Durchdringung von Objekten

Die elektromagnetische Durchdringung von Objekten ist ebenfalls stark frequenzabhängig, wobei grundsätzlich tiefe Frequenzen Objekte besser durchdringen als hohe Frequenzen. Aufgrund der großen Bandbreite und der damit verbundenen relativ niederfrequenten Spektralanteile von UWB-Systemen ergeben sich daher für ein UWB-System im Allgemeinen wesentlich bessere Durchdringungseigenschaften als für ein Schmalbandsystem mit gleicher Mittenfrequenz. Besonders vorteilhaft kann dies beispielsweise in Anwendungen zur Ortung von Objekten im Boden oder Wänden oder zur Ortung verschütteter Personen eingesetzt werden. Praktische Voraussetzung dafür ist jedoch ein UWB-Spektrum, das noch genügend niederfrequente Spektralanteile besitzt (im Hinblick auf die frequenzabhängigen Eigenschaften des zu durchdringenden Materials). Zur Ortung von Objekten im Boden bzw. verschütteter Personen werden aus praktischen Gründen Spektralanteile deutlich kleiner als 3 GHz erforderlich sein. Da auf Basis der derzeitigen Regulierungssituation (siehe Kapitel [3]) für die erste Generation von UWB-Datenkommunikationssystemen nur Systeme im Frequenzbereich oberhalb von 3 GHz zu erwarten sind, werden diese UWB-Systeme keinen Vorteil hinsichtlich der Durchdringung von Wänden im Vergleich zu den derzeitigen Datenfunkdiensten (wie z.B. WLAN) besitzen.

2.2.4 Möglichkeit präziser Ortung

Ein weiteres Potenzial der UWB-Technologie liegt in der Möglichkeit einer sehr präzisen Objektortung. Aufgrund der von einem UWB-Sender ausgesendeten extrem kurzen Impulse ergibt sich eine sehr hohe erreichbare Laufzeit-Auflösung in entsprechend positionierten Empfängern. Mit UWB-Systemen im Frequenzbereich 3,1-10,6 GHz sind erreichbare Auflösungen im Bereich von Zentimetern und darunter denkbar [5]. Die Kombination von präziser Ortung (und in weiterer Folge natürlich auch Verfolgung) und gleichzeitiger Datenübertragung ist eine der besonderen Attraktivitäten der UWB-Technologie, die für eine Vielzahl von Anwendungen besonders wertvoll erscheint.

2.3 Spezielle UWB-Übertragungsverfahren

Der Begriff "UWB-Technologie" ist ein relativ allgemeiner und umfasst nicht nur Anwendungen auf dem Gebiet der Datenkommunikation, sondern auch viele andere, bereits weiter oben erwähnte und in Kapitel 5 näher beschriebene Applikationen. Dementsprechend sind von den künftigen UWB-Anwendungen auch unterschiedliche Übertragungsverfahren bzw. unterschiedliche Sendecharakteristiken zu erwarten. Im Folgenden sollen drei unterschiedliche Übertragungsverfahren näher erläutert werden. Zunächst werden anhand des *Impulsradio-Verfahrens* die Grundzüge der UWB-Sendetechnik erläutert, deren Prinzip für viele, nicht unmittelbar der Datenkommunikationstechnik zuzuordnende UWB-Anwendungen Gültigkeit besitzt. In weiterer Folge wird dann konkret auf die beiden speziell für die UWB-Datenkommunikation entwickelten Übertragungsverfahren *Direct Sequence UWB* und *Multiband-OFDM UWB* eingegangen.

2.3.1 Das Impulsradio-Verfahren

Beim so genannten Impulsradio wird Information mittels sehr kurzer Impulse direkt im Basisband, d.h., ohne klassische Modulation (im Sinne einer Verschiebung zu einer speziellen Trägerfrequenz) übertragen. Vom Sender werden zumeist Gauß-förmige Impulse direkt der Sendeantenne zugeführt (Abbildung 2.4a). Die frequenzabhängigen Eigenschaften der Sende- und Empfangsantenne bewirken eine zweimalige Differenzierung des vom Sender erzeugten Gauß-förmigen Zeitsignals, so dass am Empfänger die gesendeten Impulse als so genannte „Gauß-Doublets“ ankommen (Abbildung 2.4c).

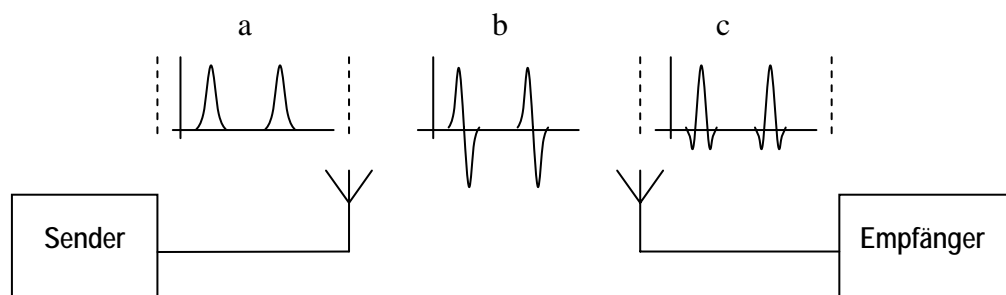


Abbildung 2.4: Vereinfachte schematische Darstellung des Impulsradio-Prinzips

Aufgrund der extrem kurzen Dauer der gesendeten Impulse im Bereich von Nanosekunden bzw. teilweise auch darunter, ergibt sich ein sehr breites „Ultra Wideband“-Spektrum. Abbildung 2.5 zeigt typische Spektren eines einzelnen Gauß-Doublets (links) und einer Reihe in konstantem Zeitabstand wiederkehrender Gauß-Doublets (rechts).

Eine Informationsübertragung kann basierend auf diesem einfachen Prinzip beispielsweise durch die so genannte Pulse Position Modulation (PPM) erfolgen, bei der je nach zu übertragendem binären Wert „0“ oder „1“ der gesendete Impuls zeitlich etwas versetzt zu einem festgelegten Nominalzeitpunkt erfolgt (exakte Synchronisation von Sender und Empfänger vorausgesetzt). Eine andere Möglichkeit stellt die so genannte Bi-Phasen Modulation (BPM) dar, bei der nicht der Zeitpunkt, sondern die Phasenlage des gesendeten Impulses zwischen zwei Werten, je nach zu übertragendem Binär-Wert, hin- und hergeschaltet wird. Abbildung 2.6 illustriert das Prinzip von PPM und BPM anhand einer einfachen beliebigen Binärfolge.

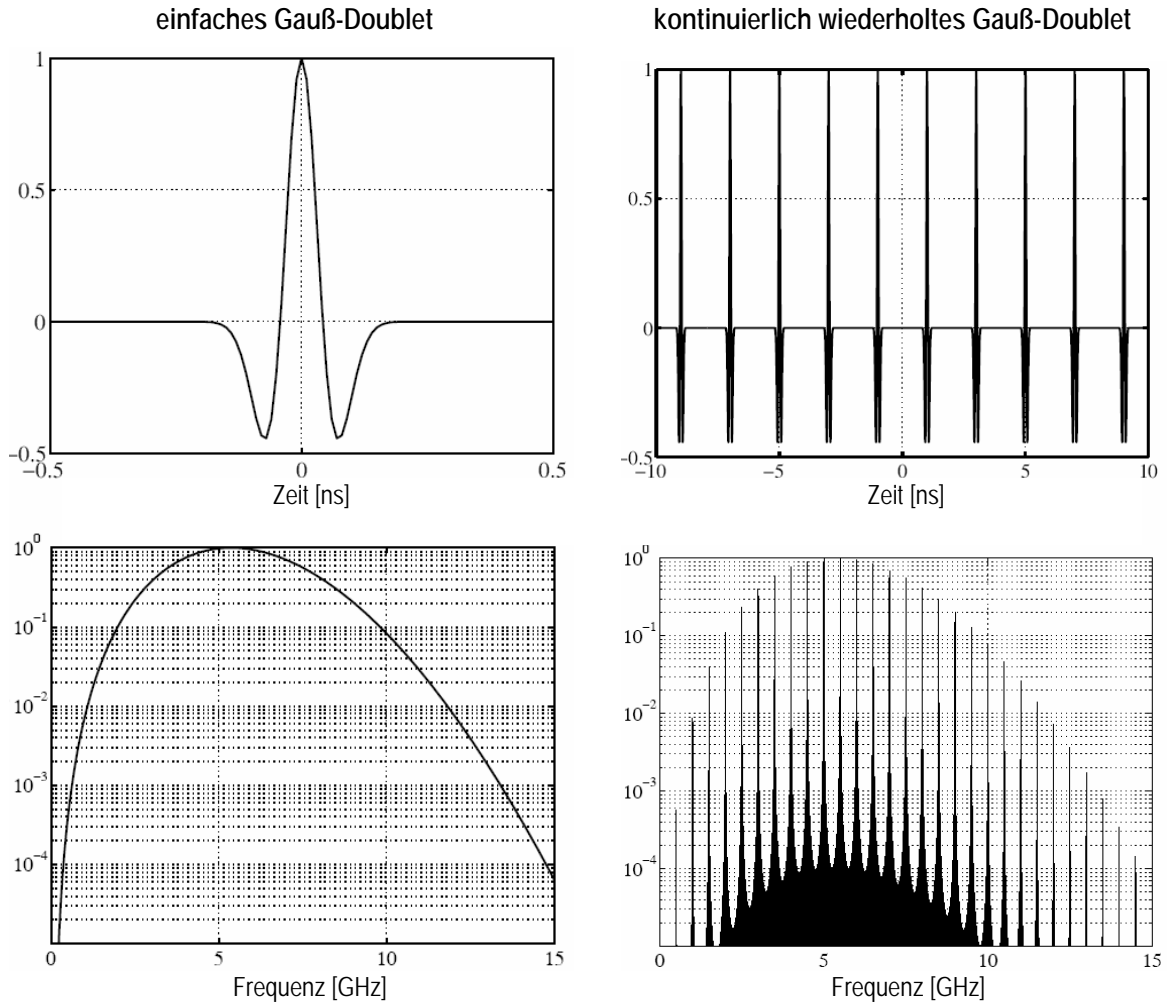


Abbildung 2.5: Zeitverläufe (oben) und Frequenzspektrum (unten) eines einzelnen Gauß-Doublets (links) und einer periodisch wiederholten Abfolge von Gauß-Doublets

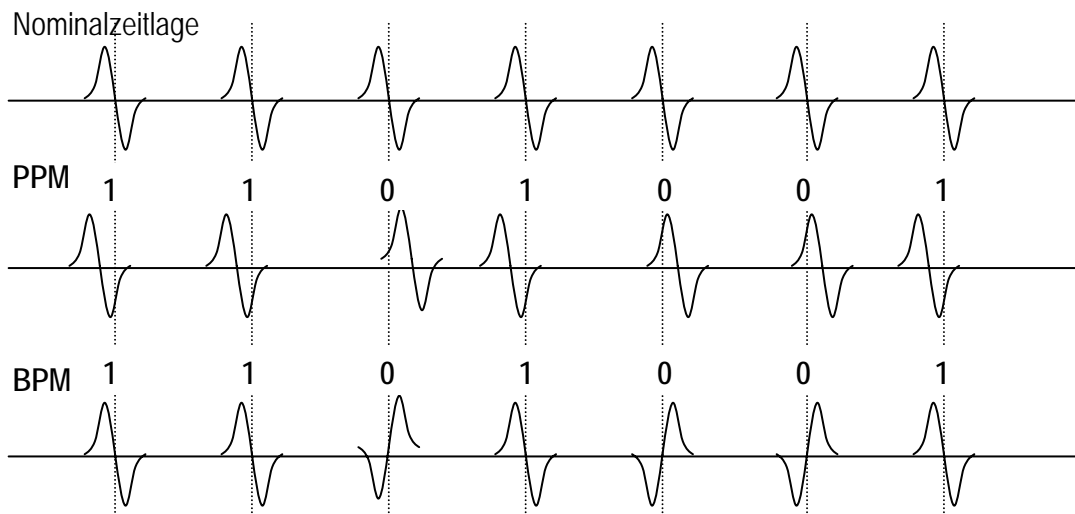


Abbildung 2.6: Zur Illustration von PPM und BPM

Diese Art der Modulation wirkt sich gleichzeitig auch positiv auf das Spektrum im Sinne eines deutlich reduzierten *Peak to Average* Verhältnisses aus, was einerseits die spektrale Effizienz erhöht und das Potenzial für Interferenzen mit anderen Funkdiensten reduziert. Im Falle der PPM ist dies eine direkte Auswirkung der nicht mehr exakt konstanten Impulswiederholzeit, was zu einer deutlichen Reduzierung der spektralen Spitzen im Verhältnis zur mittleren Signalenergie führt (Abbildung 2.7). Eine weitere Verbesserung der Situation kann auch mit einer bewussten, zwischen Sender und Empfänger vereinbarten pseudozufälligen Variation der Nominalzeitpunkte erreicht werden.

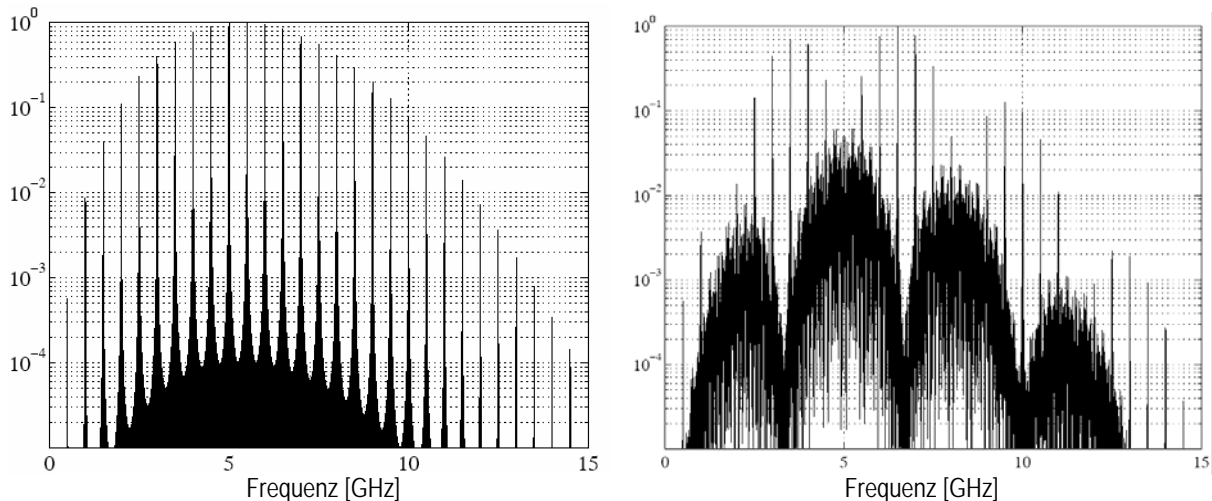


Abbildung 2.7: Veranschaulichung der Veränderung des Spektrums zufolge nicht-konstanter Impulswiederholzeit; links: konstante Impulswiederholzeit, rechts: zufällige Variation der Impulswiederholzeit um etwa eine halbe Impulsdauer. Dargestellt ist jeweils das auf den gleichen Maximalwert normierte Spektrum.

Hinsichtlich spektraler Effizienz ist die BPM (bereits in ihrer einfachsten Form) wesentlich vorteilhafter als die PPM [5]. Für weitere, in der Literatur beschriebene UWB-Modulationsformen im Zusammenhang mit dem Impulsradio wird auf die einschlägige Literatur verwiesen (z.B. [5],[6],[7]).

Grundsätzlich kann das oben beschriebene Impulsradio-Verfahren auch durch die Verwendung spezieller Impulsformen erweitert werden, um die Form des Sendespektrums gezielt zu beeinflussen, bzw. einzelne Frequenzbereiche „auszulassen“. Dies kann in der Praxis sinnvoll bzw. erforderlich sein, um beispielsweise Interferenzen mit anderen Funkdiensten zu vermeiden, bzw. kann diese Technik theoretisch auch dazu verwendet werden um ein Frequenz-Vielfach-Zugriffsverfahren zu realisieren (Aufteilung eines UWB-Frequenzbereiches in mehrere Sub-Bänder). Dies führt zur einfachsten Form des so genannten *Multiband-UWB* (siehe auch [5],[6]). Abbildung 2.8 zeigt zunächst den Zusammenhang zwischen unterschiedlichen Gauß'schen Impulsen und deren Spektrum und Abbildung 2.9 zeigt als Beispiel eine spezielle Impulsform, die einen schmalen Frequenzbereich im UWB-Spektrum ausspart.

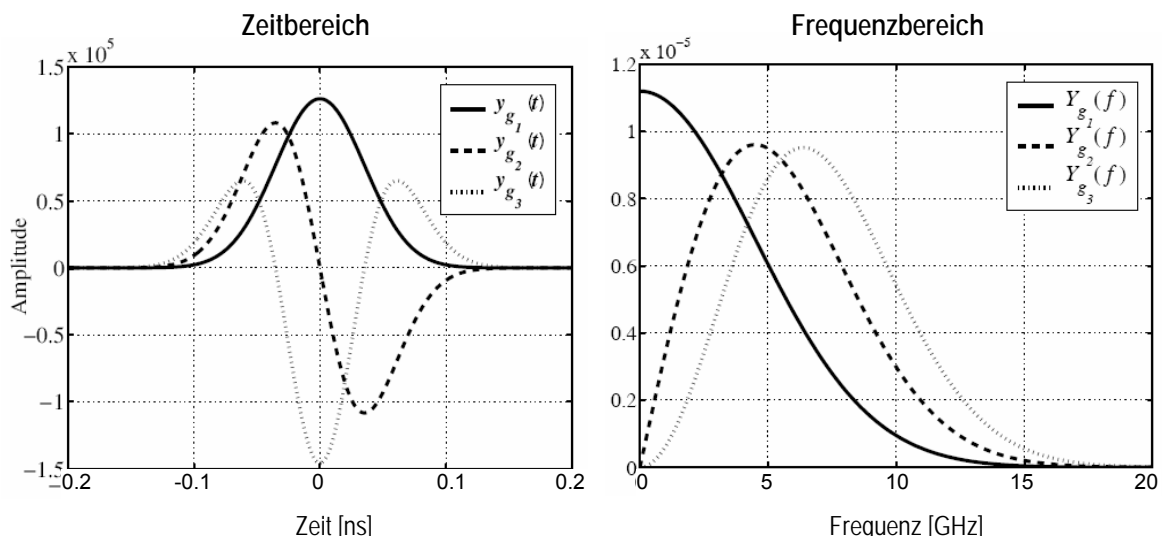


Abbildung 2.8: Prinzip des Zusammenhangs zwischen Impulsform (im Zeitbereich) und zugehörigem Spektrum für unterschiedliche Gauß-Ableitungen

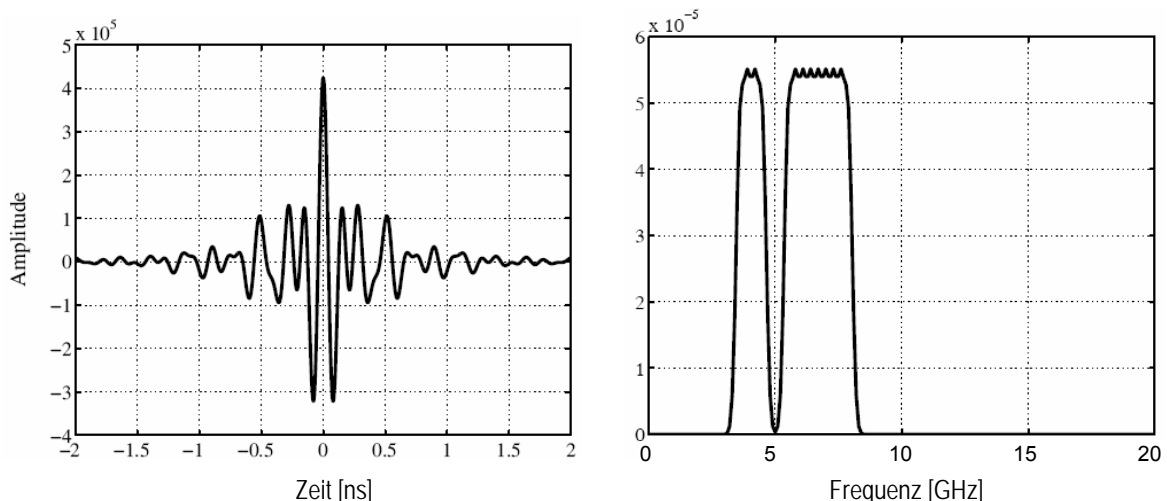


Abbildung 2.9: Spezielle Impulsform zur Ausparung eines schmalen Frequenzbereiches aus dem UWB-Spektrum. Dies kann vorteilhaft genutzt werden, um Interferenzen mit speziellen Funkdiensten zu vermeiden.

Mehrfach-Zugriffsverfahren beim Impulsradio

Um die (koordinierte) Kommunikation mehrere UWB-Geräte im gleichen Frequenzband zu ermöglichen benutzen einfache Geräte nach dem Impulsradio-Prinzip zumeist ein Zeitvielfachverfahren (*Time Division Multiple Access TDMA*), d.h. jedem Gerät ist ein definierter Zeitschlitz zugeordnet, in dem es senden kann. Zur Erhöhung der Robustheit kann die Zuordnung der Zeitslitze zu den einzelnen Geräten auch pseudozufällig variiert werden. In jedem Fall ist eine Synchronisation aller Geräte die Voraussetzung für ein funktionierendes TDMA-Verfahren.

Das beschriebene Impulsradio-Verfahren veranschaulicht das Grundprinzip der UWB-Kommunikation, bzw. der UWB-Sendetechnik. Im Vergleich zur konventionellen (schmalbandigen) Funktechnik entfallen beim Impulsradio-Verfahren sämtliche mit Frequenzumsetzung in Verbindung stehenden, teilweise aufwändigen bzw. kostspieligen HF schaltungstechnische Maßnahmen. Vor allem diese technische Einfachheit des Impulsradio-Prinzips und die unmittelbar damit zusammenhängende billige Realisierungsmöglichkeit von Endgeräten wird häufig als eine der Attraktivitäten der

UWB-Technologie im Hinblick auf den Einsatz im Massenmarkt gesehen. Allerdings sind für zukünftige UWB-Datenkommunikationsgeräte aus praktischer Sicht einige Zusatzfunktionen erforderlich (z.B. im Hinblick auf Interferenzvermeidung, Synchronisation und Organisation des Datenverkehrs in Netzwerken, usw.), die diesen Preisvorteil (abhängig von der jeweiligen Anwendung) teilweise wieder wettmachen. Gemäß [5] ist daher derzeit noch nicht abzusehen, ob die zukünftigen UWB-Geräte tatsächlich auch kostengünstige Alternativen zu den gegenwärtigen Technologien wie z.B. WLAN werden.

Zwei konkrete UWB-Übertragungsverfahren, wie sie für zukünftige Geräte der Breitband-Kommunikationstechnik geplant sind, werden in den folgenden beiden Kapiteln behandelt.

2.3.2 Direct Sequence UWB (DS-UWB)

Das so genannte *Direct Sequence UWB* kann in einfacher Weise als Erweiterung des Impulsradios gesehen werden. Es basiert, wie das Impulsradio, auf der Aussendung kurzer Impulse. Allerdings wird nicht nur ein Impuls pro Informationsbit übertragen, sondern eine Impulsfolge, deren Zusammensetzung durch die Multiplikation der Originaldaten mit einem Spreizcode bestimmt ist. Unter „Originaldaten“ wird hier der bereits einer Reihe von Codiervorgängen (Scrambling, Fehlerkorrektur, Interleaving, usw.) unterworfenen Rohdatenstrom verstanden.

Abbildung 2.10 illustriert in vereinfachter Weise das Prinzip der Spreizung bei DS-UWB (zwecks Einfachheit der Abbildung mit willkürlich gewähltem Spreizcode der Länge 4 Bit). Durch unterschiedliche Code-Längen, Chip-Raten und Mittenfrequenzen kann ein Vielfach-Zugriff bei DS-UWB realisiert werden.

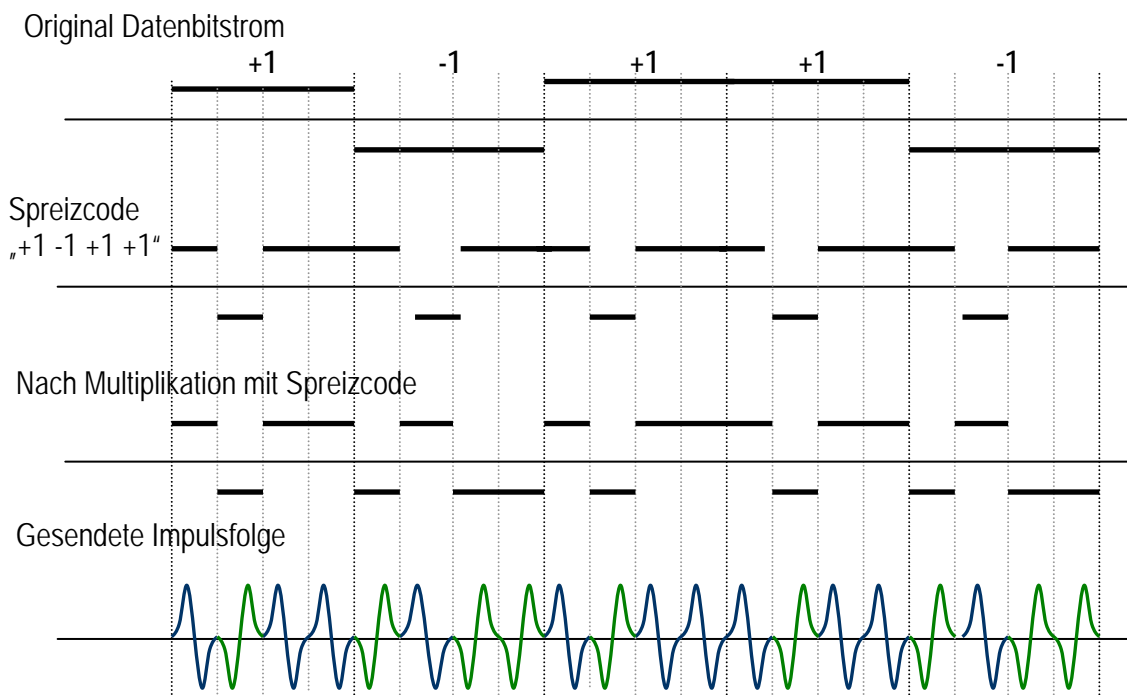


Abbildung 2.10: Illustration des DS-UWB Prinzips

DS-UWB ist jenes UWB-Übertragungsverfahren, das vom *UWB-Forum*, einem Zusammenschluss von mehr als 50 Industriefirmen vorgeschlagen wurde (siehe Kapitel 4). Im Vorschlag des *UWB-Forums* wird das Frequenzband von 3,1 GHz bis 9,7 GHz in zwei Sub-Bänder von 3,1 GHz bis 4,9 GHz und von 6,2 GHz bis 9,7 GHz unterteilt (Abbildung 2.11). Der dazwischen liegende Bereich wird mit Rücksicht auf die zwischen 5 und 6 GHz angesiedelten WLAN Applikationen (IEEE 802.11a) frei gehalten. Gemäß diesem Vorschlag ist im Frequenzbereich von 3,1 GHz bis 4,9 GHz der gleichzeitige Betrieb von 6 unterschiedlichen Piconetzen mit einer Brutto-Datenrate von jeweils 110 Mbit/s möglich. Das obere Subband von 6,2 GHz bis 9,7 GHz wurde für zukünftige Entwicklungen vorgesehen.

Als Vorteil des DS-UWB wird von dessen Proponenten vor allem die Tatsache angeführt, dass „echte“ UWB-Prinzipien (d.h. Aussendung von kurzen Impulsen ohne Frequenzumsetzung) zur Anwendung kommen und damit die Vorteile der klassischen UWB-Technologie in vollem Umfang wirksam werden (Robustheit gegenüber Mehrwegeausbreitung aufgrund großer Bandbreite).

Aufgrund der Entwicklungen der letzten Jahre (Details, siehe Kapitel 4) gibt es bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt leider keinen Standard für DS-UWB, so dass dieses Übertragungsverfahren (zumindest für die erste Generation von UWB-Datenkommunikationsgeräten) nur eine untergeordnete Rolle spielen wird.

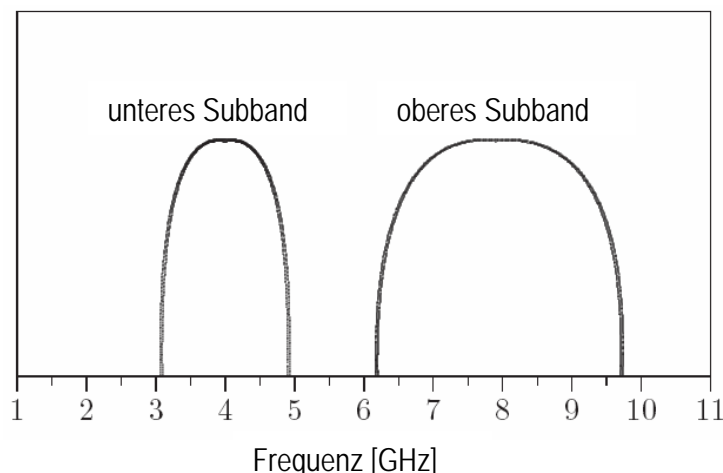


Abbildung 2.11: Schematische Darstellung der Frequenznutzung des vom UWB-Forum vorgeschlagenen DS-UWB

2.3.3 Multiband-OFDM UWB (MB-OFDM-UWB)

Multiband OFDM (MB-OFDM) ist ein Übertragungsverfahren, das in seiner Konzeption die Grundidee des Impulsradios zwar verlässt, durch die speziellen Vorzüge der über einen breiten Frequenzbereich eingesetzten Methode des *Orthogonal Frequency Division Multiplex (OFDM)* in seinen Eigenschaften den klassischen UWB-Vorzügen aber größtenteils gerecht wird. Dieses Verfahren wurde von der *WiMedia Alliance*, einem offenen Industriekonsortium bestehend aus mehr als 150 namhaften Firmen vorgeschlagen und ist das erste UWB-Übertragungsverfahren, das in Form von ISO-Standards [8],[9] festgeschrieben ist (näheres dazu in Kapitel 4). Ausgehend von der UWB-Regulierung der FCC ([1]) wird beim MB-OFDM UWB der gesamte UWB-Frequenzbereich von 3,1–

10,6 GHz in insgesamt 14 jeweils 528 MHz breite Subbänder unterteilt, wobei die unteren 12 Subbänder in Bandgruppen zu jeweils 3 aufeinander folgende Bänder zusammengefasst werden (Bandgruppen 1-4). Die oberen beiden Subbänder (Band 13 und 14) werden zur 5. Bandgruppe zusammengefasst (Abbildung 2.12).

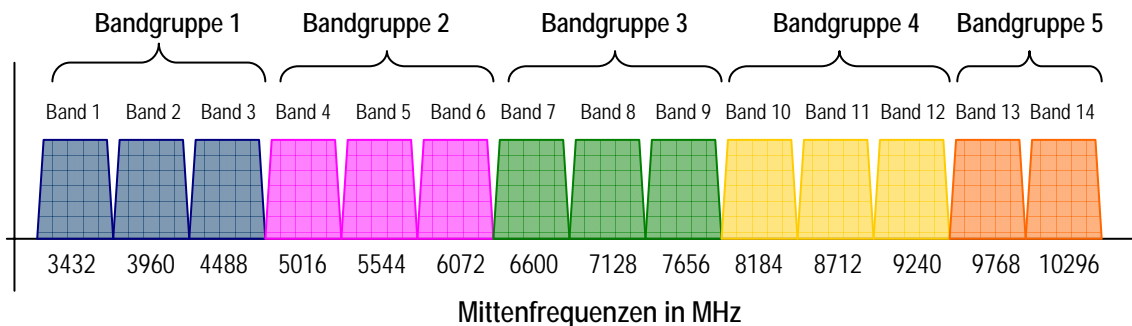


Abbildung 2.12: Bandaufteilung bei MB-OFDM UWB nach dem Vorschlag der *WiMedia Alliance*

Die Breite eines Subbandes mit 528 MHz wurde dabei mit Bedachtnahme auf die seit 2002 geltende FCC-Regulierung [1] (fordert von UWB-Systemen 500 MHz Mindestbandbreite) nicht zufällig gewählt. In jedem einzelnen der 528 MHz breiten Subbänder erfolgt die Datenübertragung wie bei OFDM üblich. D.h., die Information wird mit 100 (jeweils ca. 4 MHz breiten) OFDM Subträgern (+ 12 Pilotträger + 10 Schutz-Frequenzen) mittels 128 Punkt IFFT übertragen. Die Information ist den Subträgern dabei mittels konventioneller Verfahren aufmoduliert. Konkret wird für die unteren Datenraten bis zu 200 MBit/s QPSK (*Quaternary Phase Shift Keying*) und für die höheren Datenraten bis 480 MBit/s DCM (*Dual Carrier Modulation*) verwendet. Zur weiteren Aufweitung des Übertragungsfrequenzbandes wird die Datenübertragung innerhalb der Bandgruppen durch so genannte *Time Frequency Codes (TFC)* gestreut. D.h., für eine beliebige Datenverbindung werden $3 \times 528 \text{ MHz} = \text{ca. } 1,58 \text{ GHz}$ Frequenzbandbreite beansprucht. Neben der Frequenzbanderweiterung und der damit verbundenen Vorteile hinsichtlich Robustheit stellt die TFC Codierung auch gleichzeitig eine Möglichkeit für die Realisierung eines Vielfachzugriffs dar. Tabelle 2.1 fasst die Zuordnung der TFC-Nummern zu den Bandsequenzen für die Bandgruppen 1-4 und Bandgruppe 5 zusammen und Abbildung 2.13 illustriert schematisch die Datenübertragung auf Basis von TFCs. Nach jedem übertragenen OFDM Symbol wird das Frequenzband gemäß dem zugehörigen TFC gewechselt. Das an jedes Symbol angehängte „Zero-padded Suffix“ dient dabei als Schutzintervall, das einerseits ISI-Probleme verringert und andererseits den Einsatz einfacherer (und billigerer) Hardware erlaubt (mehr Zeit für das Einschwingen des Frequenzsynthesizers bei den Frequenzsprüngen).

Im Hinblick auf den Vielfachzugriff ist zu erkennen, dass bei synchronisierten Piconetzen mit einer Kollision pro drei übertragenen Symbole zu rechnen ist. Mit speziellen adaptiven Verfahren wird versucht diesbezüglich Verbesserungen zu erzielen.

Die Vorzüge des MB-OFDM-Verfahrens für UWB liegen vor allem in seiner Flexibilität hinsichtlich der Nutzung des Spektrums. Einzelne Frequenzbereiche können bei Bedarf (z.B. zur Vermeidung von Interferenzen) relativ leicht (von der digitalen Ebene aus gesteuert) ausgeblendet werden. Weiters ist die OFDM-Technik relativ leicht in CMOS Technik (Strom sparend und kostengünstig) integrierbar. Wie in Kapitel 4 noch näher erläutert erscheint MB-OFDM derzeit als das viel versprechendste

Übertragungsverfahren für die ersten breit den Markt durchdringenden UWB-Produkte auf dem Gebiet der Datenkommunikation.

TFC Nr.	Bandnummern-Sequenz (für Bandgruppen n=1...4)					
1	3n-2	3n-1	3n	3n-2	3n-1	3n
2	3n-2	3n	3n-1	3n-2	3n	3n-1
3	3n-2	3n-2	3n-1	3n-1	3n	3n
4	3n-2	3n-2	3n	3n	3n-1	3n-1
5	3n-2	3n-2	3n-2	3n-2	3n-2	3n-2
6	3n-1	3n-1	3n-1	3n-1	3n-1	3n-1
7	3n	3n	3n	3n	3n	3n

TFC Nr.	Bandnummern-Sequenz (für Bandgruppe 5)					
5	13	13	13	13	13	13
6	14	14	14	14	14	14

Tabelle 2.1: Definition der Time Frequency Codes bei MB-OFDM UWB nach [8],[9]

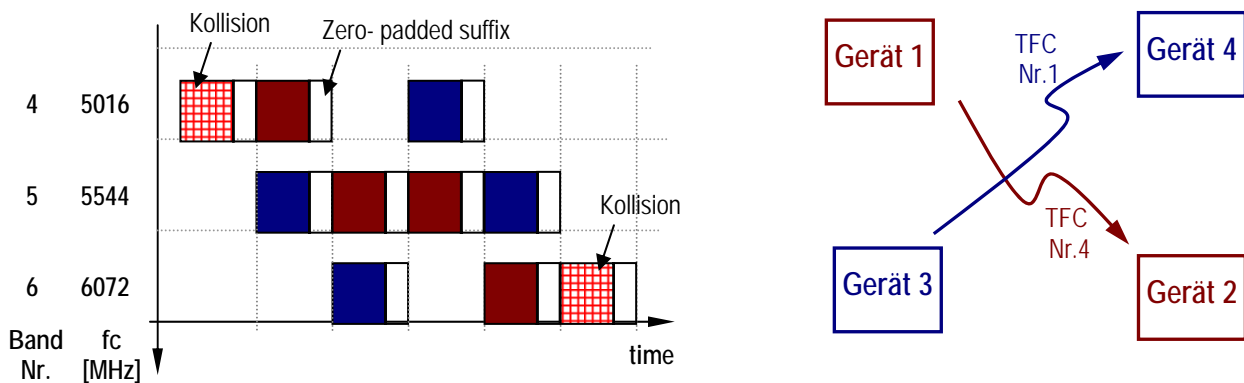


Abbildung 2.13: Schema zur Illustration des Time Frequency Coding (TFC) bei MB-OFDM UWB nach [8],[9]. Hier als Beispiel für Bandgruppe 2 und verwendete TFC Nr. 1 (Bandsequenz 4-5-6-4-5-6...) und TFC Nr. 3. (Bandsequenz 4-4-5-5-6-6..)

3 DIE FUNKREGULIERUNG FÜR UWB

Die funktechnische Regulierung für UWB-Geräte ist, verglichen mit herkömmlichen Funktechnologien, als Spezialfall zu sehen. Dies liegt daran, dass mit UWB eine Technologie auf den Markt kommt, die Frequenzbereiche (mit)benutzt, welche eigentlich für andere (schmalbandige) Funkdienste vorgesehen sind. Bedenkt man, dass von vielen Betreibern dieser anderen Funkdienste teilweise enorme Summen für die Lizenzen zur exklusiven (und damit störungsfreien) Nutzung der entsprechenden Frequenzbereiche bezahlt wurden (man denke nur an die Milliardenbeträge die für die UMTS-Lizenzen bezahlt wurden), wird klar, dass der Regulierungsprozess für UWB viele Diskussionen mit sich bringt und sich damit nicht einfach gestaltet.

3.1 Situation in den USA

Trotz der oben genannten Aspekte hat die US-amerikanische *Federal Communications Commission FCC* im Jahr 2002 die weltweit ersten funktechnischen Regulierungsfestlegungen für UWB-Geräte veröffentlicht (Subpart F in [1]), um Sicherheit für die UWB-Hersteller zu schaffen und die Chance auf die von der UWB-Technologie erwarteten wirtschaftlichen Erfolge nicht zu gefährden. Auf Grund der Befürchtungen von Interferenzen mit anderen, bestehenden Funkdiensten sind die Festlegungen für die zulässigen Emissionen von UWB-Geräten allerdings sehr restriktiv und bewegen sich in Größenordnungen, wie man sie aus der klassischen EMV für Störaussendungen von diversen Geräten kennt.

Neben allgemeiner Bestimmungen wird in [1] konkret zwischen den folgenden unterschiedlichen Kategorien von UWB-Geräten unterschieden und für jede Kategorie spezielle Festlegungen getroffen

- Indoor UWB systems
- Hand held UWB systems
- Ground penetrating radars and wall imaging systems
- Through-wall imaging systems
- Surveillance systems
- Medical imaging systems
- Vehicular radar systems

Für den Massenmarkt und damit wirtschaftlich interessant sind vor allem die Kategorien „Indoor UWB-Systems“ und „Hand held UWB-Systems“. Diesen Kategorien sind die unmittelbar vor der Markteinführung stehenden UWB-Geräte aus den Bereichen des Home-Entertainment, der Datenkommunikation und der Wireless Personal Area Networks (WPAN) zuzurechnen. Auf die Festlegungen für diese Gerätekategorien wird daher im Folgenden näher eingegangen.

3.1.1 Indoor UWB-Systeme

Unter „Indoor UWB Systems“ werden gemäß [1] Geräte bzw. Systeme verstanden, die nur in Innenräumen verwendet werden können. Als konkretes Merkmal wird die Notwendigkeit einer netzgebundenen Stromversorgung gesehen. Batterie- oder akkubetriebene Geräte (wie z.B. ein Laptop) werden demgemäß nicht zu „Indoor-Systemen“ gezählt. Weiters ist es gemäß den Bestimmungen untersagt die von solchen Indoor UWB-Geräten ausgehenden elektromagnetischen Emissionen absichtlich nach

außen zu richten, sowie externe „Outdoor“-montierte Antennen zu verwenden. Typische Indoor-Geräte sind demnach Arbeitsplatzcomputer und Computerperipherie (Drucker, externe Festplatten, Scanner, Beamer, usw.) bzw. Komponenten von Home-Entertainment Systemen (Stichwort „Home-Cinema“).

Das eigentliche Sendefrequenzspektrum für Indoor-UWB Geräte ist zwischen 3.100 MHz bis 10.600 MHz festgelegt, wobei die in Tabelle 3.1 angeführten Limits hinsichtlich der elektromagnetischen Emissionen einzuhalten sind (definiert in Form von spektralen Leistungsdichten der EIRP-Sendeleistung). Abbildung 3.1 zeigt die sich daraus ergebende Spektralmaske für Indoor-UWB-Geräte. Im Frequenzbereich unterhalb von 960 MHz gelten die allgemeinen Limits für Störemissionen von Geräten (max. 200 μ V/m in 3 m Abstand im Frequenzbereich 216 MHz -960 MHz).

<i>Indoor UWB-Geräte</i>	
Frequenzbereich [MHz]	Max. EIRP in dBm/MHz
960-1.610	- 75,3
1.610-1.990	- 53,3
1.990-3.100	- 51,3
3.100-10.600	- 41,3
> 10.600	- 51,3

Tabelle 3.1: Maximal zulässige EIRP-Sendeleistungsdichten (pro 1 MHz) für Indoor-UWB-Systeme nach [1]

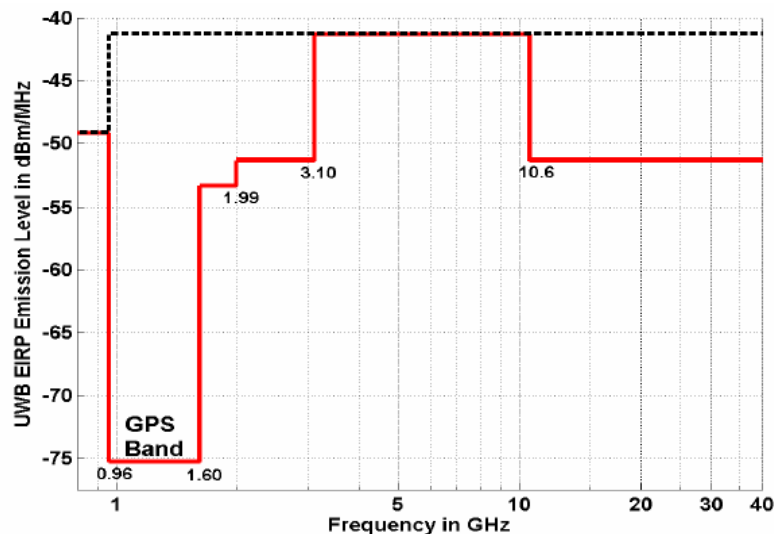


Abbildung 3.1: Graphische Darstellung der Sendeleistungsdichte-Limits (Spektralmaske) für Indoor UWB-Geräte nach [1]

Zusätzlich sind in den Frequenzbereichen 1.164-1.240 MHz und 1.559-1.610 MHz maximale EIRP-Sendeleistungsdichten von -85,3 dBm/kHz einzuhalten, um zusätzlich Störungssicherheit für GPS basierte Anwendungen zu garantieren.

Weiters darf die gesamte maximale, innerhalb eines 50 MHz breiten Frequenzbandes abgestrahlte Leistung nicht mehr als 0 dBm betragen.

3.1.2 Hand held UWB-Systeme

Hand held UWB Systeme werden in [1] als relativ klein (tragbar) und unabhängig von ortsfester Infrastruktur definiert (akku- oder batteriebetrieben). Solche Systeme können sowohl indoor als auch outdoor betrieben werden. Antennen sind nur direkt am Gerät selbst oder am Benutzer erlaubt, nicht jedoch an fixer Outdoor-Infrastruktur (wie z.B. an der Außenwand von Gebäuden). Weiters wird von Hand held UWB-Geräten verlangt, dass sie die Aussendung von HF stoppen, wenn nicht innerhalb von 10 s eine Empfangsbestätigung von der Gegenstelle für die gesendeten Daten einlangt.

Wie auch für die im vorigen Abschnitt beschriebenen Indoor Systeme ist das eigentliche Sendefrequenzspektrum für Hand held-UWB Geräte zwischen 3.100 MHz bis 10.600 MHz festgelegt, wobei die in Tabelle 3.2 angeführten Limits hinsichtlich der elektromagnetischen Emissionen einzuhalten sind (definiert in Form von spektralen Leistungsdichten der EIRP-Sendeleistung). Abbildung 3.2 zeigt die sich daraus ergebende Spektralmaske für Hand held-UWB-Geräte. Im Frequenzbereich unterhalb von 960 MHz gelten die allgemeinen Limits für Störemissionen von Geräten (max. 200 $\mu\text{V/m}$ in 3 m Abstand im Frequenzbereich 216 MHz -960 MHz).

<i>Hand held UWB-Geräte</i>	
Frequenzbereich [MHz]	Max. EIRP in dBm/MHz
960-1.610	- 75,3
1.610-1.990	- 63,3
1.990-3.100	- 61,3
3.100-10.600	- 41,3
> 10.600	- 61,3

Tabelle 3.2: Maximal zulässige EIRP-Sendeleistungsdichten (pro 1 MHz) für Hand held-UWB-Systeme nach [1]

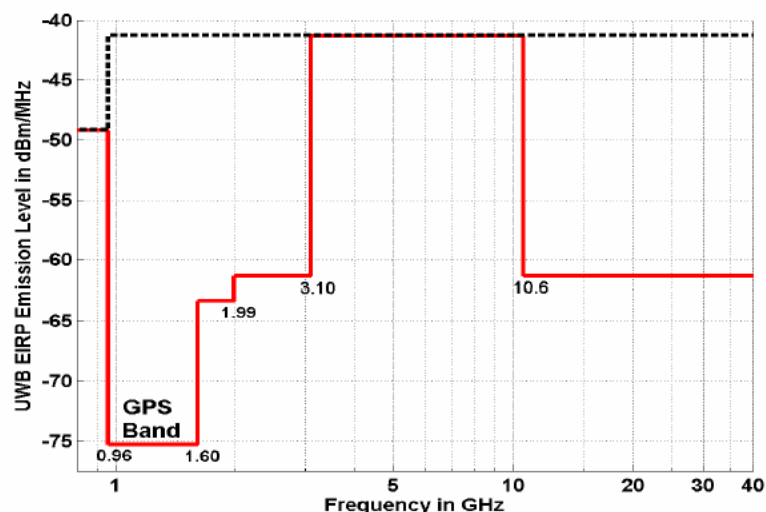


Abbildung 3.2: Graphische Darstellung der Sendeleistungsdichte-Limits (Spektralmaske) für Hand held UWB-Geräte [1]

Der Tatsache, dass Hand held UWB-Geräte definitionsgemäß auch Outdoor betrieben werden dürfen, hat man hier (im Vergleich zu Indoor-Geräten) durch zusätzliche 10 dB Sicherheitsabstand im Frequenzbereich zwischen 1.610 MHz und 3.100 MHz, sowie oberhalb von 10.600 MHz Rechnung getragen.

In gleicher Weise wie auch für Indoor-Geräte ist auch von Hand held-Geräten zusätzlich in den Frequenzbereichen 1.164-1.240 MHz und 1.559-1.610 MHz maximale EIRP-Sendeleistungsdichten von -85,3 dBm/kHz einzuhalten und die gesamte maximale, innerhalb eines 50 MHz breiten Frequenzbandes abgestrahlte Leistung darf nicht mehr als 0 dBm betragen.

3.1.3 Weitere UWB-Systeme nach FCC Regulierung

Wie bereits eingangs erwähnt spezifiziert die FCC in [1] auch noch Zulassungsbedingungen für weitere UWB-Gerätekatgorien. Einige davon werden vereinfacht in den folgenden Abbildungen anhand der für sie definierten Spektralmasken kurz zusammengefasst.

“Ground penetrating radar and wall imaging systems”

“Ground penetrating” Radar Systeme sind für den Einsatz vergrabener bzw. verschütteter Objekte bzw. Personen konzipiert. Unter „Wall imaging systems“ werden Geräte zur Detektion bzw. Untersuchung von Objekten in massiven Wänden verstanden (z.B. Stahlbewährung in Betonbaukörpern).

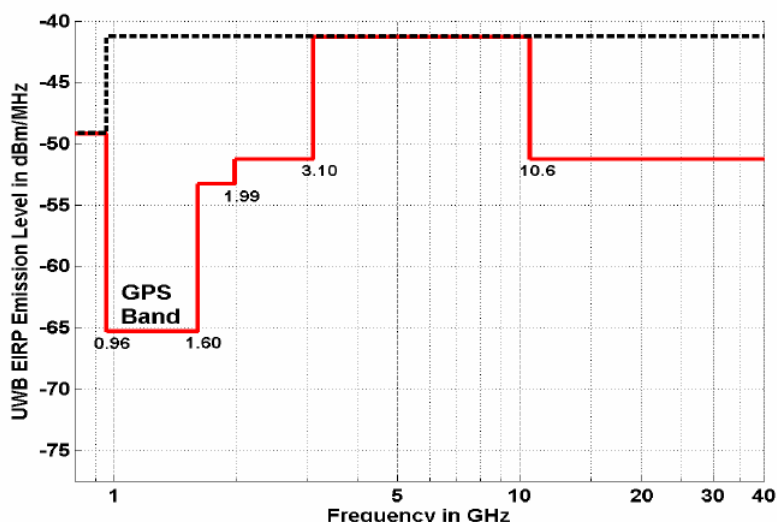


Abbildung 3.3: Graphische Darstellung der Sendeleistungsdichte-Limits (Spektralmaske) für Ground penetrating radar and wall imaging systems nach [1]

„Vehicular radar systems“

Derartige Systeme dürften nach gegenwärtiger Einschätzung ebenfalls ein hohes Marktpotenzial besitzen. Große Firmen aus der Automotive Branche zeigen starkes Interesse an dieser Technologie, welche Kommunikations- und Ortungs-Möglichkeiten der UWB-Technik vereinen und damit zur Verkehrsoptimierung und Kollisionsvermeidung in den nächsten Generationen von Automobilen eine große Rolle spielen könnte. Diese Systeme sind für den Frequenzbereich zwischen 22 GHz und 29 GHz konzipiert.

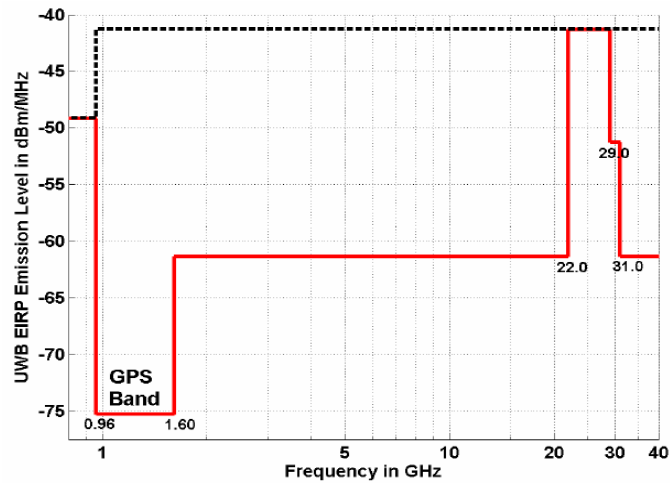


Abbildung 3.4: Graphische Darstellung der Sendeleistungsdichte-Limits (Spektralmaske) für Vehicular radar systems nach [1]

3.2 Situation in Europa bzw. Deutschland

Im Gegensatz zu den USA verzögerte sich die Regulierung für UWB in Europa. Für *Short Range Radar Systeme* um 24 GHz für Anwendungen in der Verkehrstechnik zur Kollisionsvermeidung und für zukünftige Fahrer-Assistenzsysteme besteht seit 2005 eine europäische Regulierungsvorschrift [10], die einen etwas weniger breiten Frequenzbereich (von 22 GHz bis 26,65 GHz) als die entsprechende FCC-Vorschrift (vgl. mit Abbildung 3.4) zulässt. Diese gilt bis 2013. Danach sind derartige Anwendungen in Europa für den Frequenzbereich um 79 GHz geplant.

Für den vor allem für Datenkommunikationsanwendungen interessanten Frequenzbereich von 3,1 GHz bis 10,6 GHz war die Situation bis vor kurzem noch nicht endgültig entschieden. Nachdem die Europäische Kommission der *Europäischen Konferenz für Verwaltungen im Post und Fernmeldewesen (CEPT)* in den vergangenen Jahren mehrere Mandate im Zusammenhang mit der Harmonisierung der Frequenznutzung von UWB in der Europäischen Union erteilt hat, liegt jedoch nun seit 21. Februar 2007 eine auf den Arbeiten der *CEPT* und des europäischen *Electronics Communications Committee (ECC)* beruhende Entscheidung der Europäischen Kommission mit der Bezeichnung „2007/131/EG“ vor [2]. Diese definiert maximale EIRP-Sendeleistungsdichten (pro MHz) und maximale EIRP-Spitzensendeleistungsdichten (über 50 MHz) im Frequenzbereich zwischen 1.600 MHz und 10.600 MHz, wobei zwischen Geräten mit Störungsminderungstechniken und solchen ohne diese Maßnahmen unterschieden wird. Tabelle 3.3 fasst die Sendeleistungslimits nach [2] für UWB-Geräte ohne Störungsminderungstechniken zusammen.

Für Geräte mit entsprechenden Störungsminderungstechniken ist auch im Frequenzbereich zwischen 3,4 GHz und 3,8 GHz eine maximale EIRP-Sendeleistungsdichte von -41,3 dBm/MHz zulässig. Konkret als wirksame Störungsminderungstechnik angeführt ist in [1] die so genannte *Low Duty Cycle (LDC)* Technik bei der der gesamte effektive Duty Cycle pro Sekunde weniger als 5% und pro Stunde weniger als 0,5% beträgt, sowie die maximale Burst- bzw. Symboldauer nicht größer als 5 ms ist. Eine andere, z.B. in [6] beschriebene Störungsminderungstechnik ist *Detect and Avoid (DAA)*. Bei diesem Verfahren überwacht das UWB-Gerät den

Funkkanal im Hinblick auf mögliche andere vorhandene Funkdienste und adaptiert das ausgesendete Spektrum entsprechend um Störungen zu vermeiden. Weiters ist aus Tabelle 3.3 zu ersehen, dass Geräte ohne Störminderungsmaßnahmen nach dem 31.12. 2010 im Frequenzband unterhalb von 6 GHz praktisch nicht mehr eingesetzt werden können.

Frequenzbereich [GHz]	Max. mittlere EIRP-Sendeleistungsichte [dBm / MHz]	Max. EIRP-Spitzensendeleistungsdichte [dBm / 50 MHz]
< 1,6	- 90,0	- 50,0
1,6 - 3,4	- 85,0	- 45,0
3,4 - 3,8	- 85,0	- 45,0
3,8 - 4,2	- 70,0	- 30,0
4,2 - 4,8	bis 2010: - 41,3 / ab 1.1.2011: -70	bis 2010: 0,0 / ab 1.1.2011: -30
4,8 - 6,0	- 70,0	- 30,0
6,0 - 8,5	- 41,3	0,0
8,5 - 10,6	- 65,0	- 25,0
> 10,6	- 85,0	- 45,0

Tabelle 3.3: Sendeleistungsdichtelimits für UWB-Geräte ohne Störminderungstechniken gemäß [2]

In Umsetzung der Festlegungen in [2] hat schließlich am 16. Jänner 2008 die deutsche Bundesnetzagentur mit der Veröffentlichung der Verfügung Vfg 1/2008 [3] die formal rechtlichen Grundlagen hinsichtlich der Frequenznutzung für UWB-Geräte im Frequenzbereich zwischen 30 MHz und 10,6 GHz auch auf nationaler Ebene geschaffen. Das Dokument mit dem Titel *Allgemeinzuteilung der Frequenzen 30 MHz bis 10,6 GHz für die Nutzung durch Anwendungen geringer Leistung der Ultra-Wideband (UWB) Technologie* legt die Frequenznutzungsbedingungen für UWB-Geräte in Deutschland fest. Tabelle 3.4 fasst diese Bedingungen zusammen und Abbildung 3.5 zeigt die dadurch definierte Spektralmaske für die maximale mittlere EIRP-Sendeleistungsdichte im Vergleich zu den Festlegungen in [2].

Frequenzbereich [GHz]	max. mittlere EIRP-Sendeleistungsichte [dBm / MHz]		
	Geräte ohne Störminderungstechnik bis 31.12.2010	Geräte ohne Störminderungstechnik ab 01.01.2011	Geräte mit Störminderungstechnik
0,03 - 1,6	- 90,0	- 90,0	- 90,0
1,6 - 2,7	- 85,0	- 85,0	- 85,0
2,7 - 3,4	- 70,0	- 70,0	- 70,0
3,4 - 3,8	- 80,0	- 80,0	- 41,3
3,8 - 4,2	- 70,0	- 70,0	- 41,3
4,2 - 4,8	- 41,3	-70,0	-41,3
4,8 - 6,0	- 70,0	- 70,0	- 70,0
6,0 - 8,5	- 41,3	- 41,3	- 41,3
8,5 - 10,6	- 65,0	- 65,0	- 65,0
> 10,6	- 85,0	- 85,0	- 85,0

Tabelle 3.4: Sendeleistungsdichtelimits für UWB-Geräte gemäß Vfg 1/2008 der Bundesnetzagentur.

Interessant, jedoch für die Expositionsbeurteilung praktisch irrelevant erscheint die Tatsache, dass die Vorgaben der Bundesnetzagentur in den Frequenzbereichen 2,7-3,4 GHz und 3,4-3,8 GHz um 15 dB bzw. 5 dB weniger restriktiv sind als die Festlegungen in 2007/131/EG (vgl. mit Tabelle 3.3).

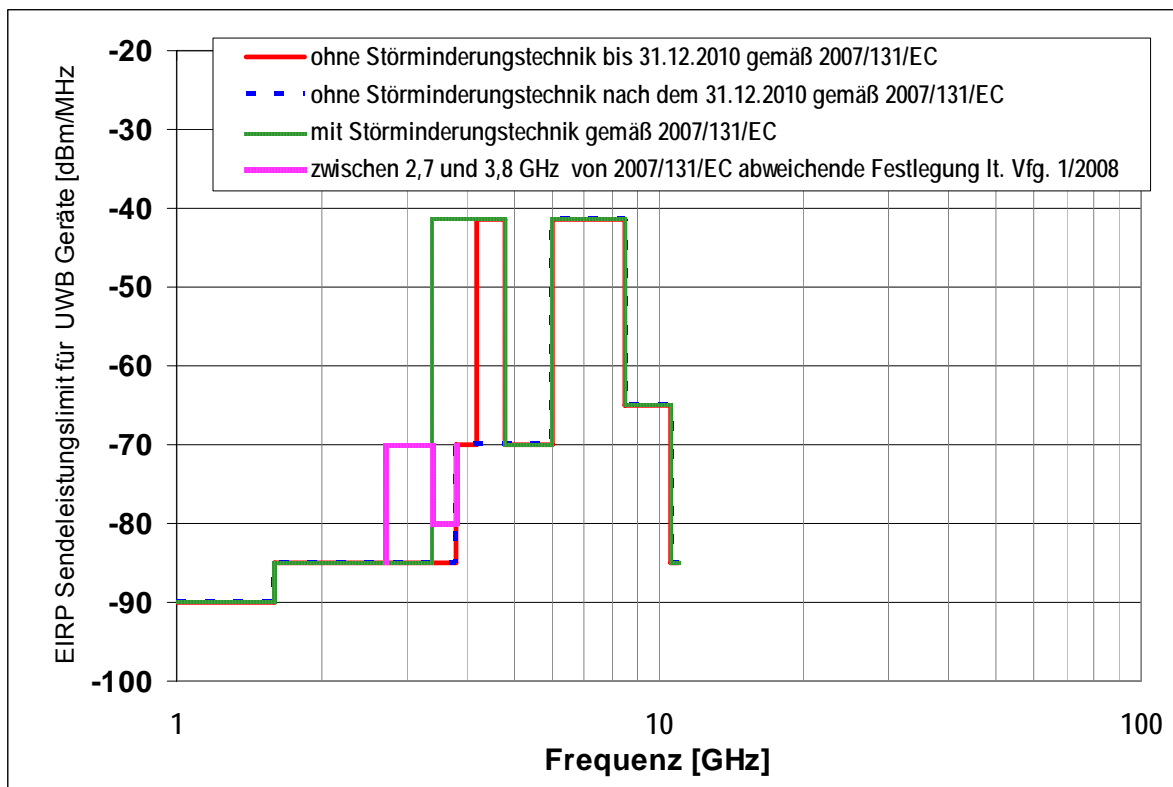


Abbildung 3.5: Graphische Darstellung der maximalen mittleren EIRP Sendeleistungsdichten für UWB-Geräte gemäß der aktuellen Verfügung Vfg 1/2008 der Bundesnetzagentur

Grundsätzlich ist anzumerken, dass die derzeitigen Festlegungen auf Basis generischer Untersuchungen getroffen wurden, da ja noch keinerlei Erfahrungswerte hinsichtlich des tatsächlich vorliegenden Störpotenzials von UWB-Geräten existieren. Es wird daher in [2] explizit darauf hingewiesen, dass die gesamte Situation im Zuge der UWB-Verbreitung genau beobachtet werden sollte, um gegebenenfalls Anpassungen der getroffenen Festlegungen machen zu können.

4 UWB-STANDARDISIERUNG

4.1 Allgemeines

Die Standardisierung stellt vor allem im Bereich der Datenkommunikation und im Bereich der Consumer-Elektronik einen wesentlichen Faktor für den Markterfolg einer Technologie dar, da gerade in diesen Bereichen die Kompatibilität und Interoperabilität von Produkten unterschiedlicher Hersteller für den Endkunden Voraussetzung für die Akzeptanz von Produkten ist. Dies wurde grundsätzlich auch im Falle der UWB-Technologie von der Industrie erkannt, so dass sich bald nach der Veröffentlichung der UWB-Regulierung durch die FCC im Jahr 2002 unterschiedliche Konsortien bildeten, mit dem Ziel einen einheitlichen Standard für die UWB-Datenkommunikation zu erarbeiten. Ohne auf Details deren Entwicklungsgeschichte einzugehen, kann zusammengefasst werden, dass daraus zwei große Organisationen hervorgegangen sind, nämlich das *UWB-Forum* und die *WiMedia Alliance*.

4.1.1 Das UWB-Forum

Das *UWB-Forum*, 2004 gegründet, war ein profitorientierter Zusammenschluss von Firmen, vor allem aus den Bereichen der Funktechnik, Halbleiterelektronik und Computertechnik. Einer der namhaftesten Mitglieder aus den Anfängen des *UWB-Forums* war die Motorola-Tochterfirma *Freescale Semiconductors, Inc.* Das UWB-Forum strebte einen UWB-Standard nach dem DS-UWB Verfahren (siehe Kapitel 2.3.2) an, der im Wesentlichen auf einem Vorschlag der *Fa. XtremeSpectrum* (inzwischen von *Freescale Semiconductors, Inc.* aufgekauft) beruhte. Im Zuge des Konkurrenzkampfes zwischen dem *UWB-Forum* und der *WiMedia Alliance* hat das UWB-Forum immer mehr an Zuspruch verloren. Mitte 2006 ist auch *Freescale Semiconductors, Inc.* aus dem UWB-Forum ausgetreten. Im Jahre 2007 hat das UWB-Forum schließlich seine Aktivitäten eingestellt.

4.1.2 Die WiMedia Alliance

Die *WiMedia Alliance* (www.wimedia.org) ist ebenfalls ein Konsortium aus namhaften Industriefirmen, darunter Intel, Microsoft, Texas Instruments, Nokia, Sony, Samsung. Im Gegensatz zum *UWB-Forum* agiert die *WiMedia Alliance* als offene Plattform und stellt ihre Arbeiten öffentlich zur Verfügung. Die *WiMedia Alliance* propagiert einen UWB-Standard basierend auf MB-OFDM (siehe Kapitel 2.3.3) und hat ihren Vorschlag bereits erstmals im Dezember als ECMA³-Standards ECMA-368 und ECMA-369 veröffentlicht. Im März 2007 wurden diese Dokumente auch als ISO/IEC Standards mit den Bezeichnungen ISO/IEC-26907 [8] und ISO/IEC 26908 [9] verabschiedet. Weitere Erfolge konnte die *WiMedia Alliance* im Jahr 2006 feiern, als sich die *Bluetooth Special Interest Group (Bluetooth SIG)* und das *USB-Implementers Forum* dazu entschieden, das von der *WiMedia Alliance* propagierte MB-OFDM UWB für die nächste Bluetooth Generation (Bluetooth 3.0) bzw. für ein *Certified Wireless USB* zu nutzen. Aus gegenwärtiger Sicht ist daher davon auszugehen, dass die Produkte für den Massenmarkt in den Bereichen WPAN bzw. Datenkommunikation sich am WiMedia Standard orientieren werden.

³ European Computer Manufacturers Association

4.1.3 Die Arbeitsgruppe IEEE 802.15a

Die Standard-Arbeitsgruppe IEEE 802.15 befasst sich ganz allgemein mit der Standardisierung von WPAN Technologien (Abbildung 4.1). Beispielsweise wurde in der Task-Group IEEE 802.15.1 ein WPAN Standard basierend auf den Bluetooth-Spezifikationen definiert. 2001 wurde die Gruppe IEEE 802.15.3a gegründet, mit dem Ziel einen WPAN Standard für sehr hohe Datenraten im Bereich von mehreren hundert Megabit pro Sekunde zu schaffen. Durch die ab 2002 konkret gewordenen Technologie-Vorschläge für unterschiedliche UWB-Verfahren, sah sich die Arbeitsgruppe IEEE 802.15.3a ab 2003 vor allem damit konfrontiert die beiden konkurrierenden Vorschläge des *UWB-Forums* und der *WiMedia Alliance* (siehe oben) in einem einheitlichen Standard zu vereinen. Nach fast 3 Jahren andauernder ergebnisloser Diskussion wurde dieses Vorhaben als gescheitert betrachtet und die Arbeitsgruppe IEEE 802.15.3a löste sich im Jänner 2006 auf. Die Entscheidung welches der beiden Übertragungsverfahren sich durchsetzen wird, bleibt damit dem freien Markt überlassen. Wie bereits oben erwähnt ist das MB-OFDM UWB der *WiMedia Alliance* aus gegenwärtiger Sicht das Verfahren mit den größten Chancen.

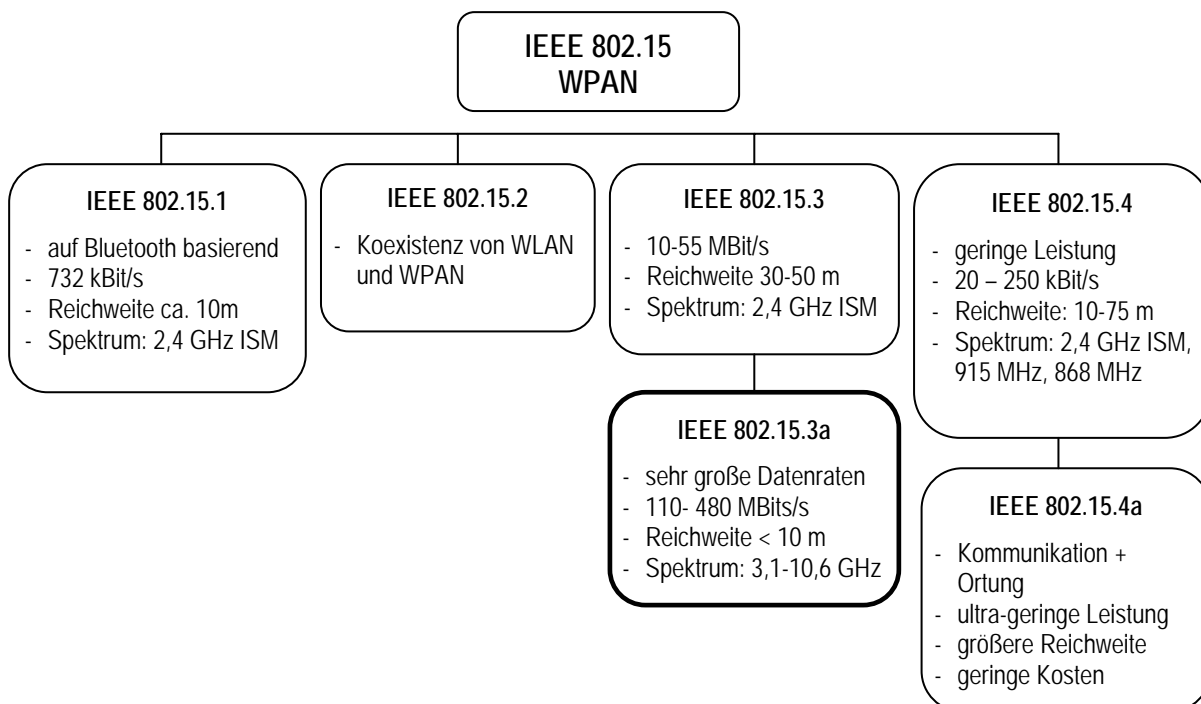


Abbildung 4.1: Übersicht über die Aktivitäten des Standard-Arbeitsgruppe IEEE 802.15 (nach [5])

4.1.4 ETSI-Standards für unterschiedliche Produktgruppen

Aus den oben dargestellten Verhältnissen ist daher ersichtlich, dass es in nächster Zeit wahrscheinlich zumindest formal keinen weltweit einheitlichen Standard für UWB basierte Datenkommunikationsendgeräte geben wird (wie dies z.B., im Fall von WLAN gelungen ist). Es ist jedoch anzunehmen, dass sich auf dem freien Markt im Verlauf der nächsten Jahre eine der vorgeschlagenen Technologien durchsetzt und damit zum „Quasi-Standard“ der UWB-Kommunikation wird.

Die Nichtverfügbarkeit eines einheitlichen vollständigen (d.h., sowohl die physikalische als auch die logische Ebene umfassenden) Standards, macht es im Sinne eine raschen Markteinführung umso notwendiger entsprechende Richtlinien und Verfahren für Produktzulassungsprüfungen zu definieren.

Das *European Telecommunications Standards Institute (ETSI)* war bzw. ist auf diesem Sektor bereits sehr aktiv und es existieren bereits eine Reihe solcher Standards (zumeist noch als Draft), die sowohl die grundlegenden physikalischen Erfordernisse von UWB-Sendern, sowie entsprechende Prüfverfahren für eine Reihe von Produktgruppen definieren. Grundlage dafür ist naturgemäß die Entscheidung der Europäischen Kommission vom 21. Februar 2007 [2]. Derzeit sind bei ETSI Standardisierungsaktivitäten zu folgenden UWB-Anwendungsfeldern im Gang:

- Communications applications
- Ground-probing and wall-probing radar
- Tank level probing radar
- Sensors
- Precision location within buildings
- Automotive radar

Aktuelle Informationen über den Status und den Inhalt der entsprechenden Standards können auf der Homepage von ETSI eingesehen werden [11].

Diese Dokumente basieren, sofern nicht bereits durch entsprechende Entscheidungen der Kommission festgelegt, auf entsprechenden Entscheidungen des *Electronics Communications Committee (ECC)* [12], [13]

5 UWB-ANWENDUNGEN

Aufgrund der seit langem anhaltenden Unsicherheit hinsichtlich eines einheitlichen UWB-Standards (siehe Kapitel 4) und der in Europa erst kürzlich finalisierten Regulierungssituation sind auf dem europäischen Markt derzeit noch keine UWB-Produkte im Bereich von Datenkommunikationsendgeräten erhältlich. Seit kurzem verfügbar sind hingegen bereits zur europäischen Regulierung konforme Echtzeit-Lokalisierungssysteme [14].

Auf dem US-amerikanischen Markt sind hingegen bereits einige wenige UWB-basierte Datenkommunikationsgeräte erhältlich, eine breite Marktdurchdringung von UWB-Geräten ist jedoch auch in den USA noch nicht vorhanden. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass diese Produkte ähnliche, entsprechend angepasst an die europäische Regulierungssituation in absehbarer Zeit auch in Europa auf den Markt kommen werden.

Im Folgenden werden aktuelle verfügbare bzw. bereits absehbare UWB-Anwendungen zusammengestellt, wobei dem Bereich der Kommunikationsgeräte für den Massenmarkt besondere Aufmerksamkeit geschenkt wird.

5.1 UWB-Anwendungen zu Kommunikationszwecken

5.1.1 Bereits kommerziell verfügbare Anwendungen

Wireless USB Geräte

Sowohl am US-amerikanischen als auch für den japanischen Markt sind seit kurzem bereits so genannte USB-Hubs kommerziell erhältlich. Sie stellen eine drahtlose Alternative zur herkömmlichen USB-Verkabelung dar und ermöglichen laut Herstellerangaben Datenraten bis zu 480 MBit/s. Diese Geräte arbeiten mit MB-OFDM UWB, wobei ein japanisches Produkt YD-300 [15] (Firma *Y-E Data*) nur in einem 528 MHz breiten Band (Band 3, vgl. Abbildung 2.12) arbeitet. Die Produkte für den US-amerikanischen Markt mit den Bezeichnungen F5U301 (Firma *Belkin*) [16] und GUWH104Kit (Firma *IOGEAR*) [17] unterstützen die gesamte erste Bandgruppe (3 x 528 MHz) im Frequenzbereich von 3,1 GHz bis 4,8 GHz (vgl. Abbildung 2.12) und arbeiten laut Hersteller mit einer mittleren HF-Sendeleistung von ca. 80 μ W.

UWB-Funkmikrofone

Ein weitere interessante Anwendung hat die Firma *Audio-Technica* kürzlich unter dem Markenlabel *SpectraPulseTM* auf den (US-amerikanischen) Markt gebracht [18]. Auf klassischer UWB-Technik basierend (Aussendung von kurzen Impulsen) können gleichzeitig 14 unterschiedliche Audio-Kanäle zu einer zentralen Empfangsstation gesendet werden. Das System arbeitet im Frequenzbereich zwischen 6.100 und 6.600 MHz. Als mittlere Sendeleistung werden 40 nW angegeben.

5.1.2 Absehbare UWB-Anwendungen in der Kommunikationstechnik

Der UWB-Technik wird im Bereich der Datenübertragungstechnik enormes Potenzial zugeschrieben. Dementsprechend groß ist die Vielfalt der denkbaren, bzw. konkret geplanten Anwendungen, wie sie derzeit in den Werbeauftritten vieler Hersteller im

Internet gezeigt werden (z.B. [19], [20], [21]). Im Folgenden sollen die wichtigsten absehbaren Nutzungsszenarien der UWB-Technik kurz beschrieben werden, aus denen sich konkrete Anwendungen und Produkte leicht ableiten lassen.

WPAN-Anwendungen

Neben der bereits oben erwähnten drahtlosen Alternative zur USB Schnittstelle, eignet sich die UWB-Technologie für den gesamten WPAN Bereich. Künftige Nutzungsszenarien sehen die gesamte Kommunikation zwischen elektronischen Endgeräten im persönlichen Gebrauch UWB-basiert. D.h., Geräte wie Computer, Laptop, Drucker, externe Harddisks, Mobiltelefone, PDAs, MP3-Player, Video-Beamer, Kameras, Scanner, Faxgeräte, usw. könnten schon bald mit UWB-Sendemodulen ausgestattet und damit für den drahtlosen, hochbitratigen Datenaustausch gerüstet sein.

WBAN-Anwendungen

WBANs (Wireless Body Area Networks) werden ebenfalls bereits konkret als ein potenzielles Anwendungsfeld für die UWB-Technologie gesehen. Daten, von unterschiedlichen Sensoren am Körper (z.B. EKG, Blutdruck, usw.) könnten damit drahtlos zu einem zentralen Knoten („Body-Hub“) und von dort z.B. per Mobiltelefon an die Klinik übertragen werden. Aber nicht nur Sensoren können in ein WBAN eingebunden sein, ebenso Implantate oder andere Körperhilfen, wie z.B. Hörgeräte oder elektronische Prothesen. Im Hinblick auf die HF-Exposition erscheinen diese Anwendungen als besonders interessant, da hier die UWB-Sender unmittelbar am Körper getragen werden. Die Forschungsaktivitäten zum Einsatz von UWB auf dem WBAN-Sektor sind zur Zeit sehr intensiv im Gang, wobei vor allem die Übertragungseigenschaften zwischen an unterschiedlichen Orten am Körper positionierten UWB-Antennen, bzw. die optimale Ausführung dieser Antennen im Blickpunkt stehen (z.B. [22], [23], [24]). Auch die Entwicklung spezieller, flexibler, in Textilien integrierbarer Antennen wird derzeit intensiv untersucht [23].

Home-Entertainment und Multimedia Anwendungen

Aufgrund der hohen erzielbaren Bitraten eignen sich UWB-Anwendungen auch für Echtzeit-Videoübertragung, was den Einsatz im Multimedia- und Home-Entertainment-Bereich möglich macht. D.h., die derzeit noch notwendigen Kabelverbindungen zwischen TV-Geräten und DVD-Playern, Spielkonsolen, usw. könnten ebenfalls bald von drahtlosen, UWB-basierten Übertragungssystemen abgelöst werden. Das gleiche gilt natürlich auch für den professionellen Multimedia-Bereich (Präsentationen, Filmvorführungen, usw.)

5.2 UWB-Anwendungen für Ortungs- und Identifikationszwecke

5.2.1 Bereits kommerziell verfügbare Anwendungen

Am amerikanischen Markt werden bereits einige auf UWB basierte Produkte zur Objekt- bzw. Personenortung und zu Identifikationszwecken angeboten. Viele dieser Anwendungen davon zielen auf Aufgaben zur Personenortung und –verfolgung für militärische, bzw. polizeiliche Zwecke ab, wie Systeme zur Ortung und Überwachung von Personen durch Wände hindurch oder Sensorsysteme zur Grenz- bzw. Sicherheitszonenüberwachung. Weiters werden auch UWB-basierte RFID-Produkte angeboten. Eine der aktivsten Firmen auf diesen Sektoren ist die *TimeDomain Corporation*, die Produkte für alle diese Anwendungsfelder kommerziell anbietet. Speziell

UWB-basierte Produkte für die Ortung- und Verfolgung von Gegenständen (z.B. bei der Lagerhaltung und in Fertigungsstraßen), sowie RFID-UWB-Produkte werden von der *Firma Multispectral Solutions, Inc.* angeboten [27]. Für ähnliche Zwecke ist das erste zur europäischen Regulierung konforme Echtzeitlokalisierungssystem der Firma *Ubisense AG* [14] konzipiert. Eine weitere kommerzielle, der UWB-Technik zuzurechnende Anwendung sind Komponenten für Millimeterwellen-Personenscanner zur Detektion gefährlicher Objekte an Personen, wie sie beispielsweise von der Fa. *Farran Technology Ltd.* entwickelt werden [28].

5.2.2 Absehbare Anwendungen für Ortungs- und Identifikationszwecke

Wenngleich auch nicht so attraktiv für den Massenmarkt wie UWB-Produkte aus dem Datenkommunikations- und Consumer-Elektronik Bereich, so ist das technische Potenzial UWB-basierter Anwendungen für Ortungs-, und Identifikationszwecke wahrscheinlich sogar größer. Neben der Ausweitung der bereits oben angeführten, in den USA bereits verfügbaren Anwendungen auf viele spezielle Anwendungsfälle, bestehen auch große Erwartungen auf vielen neuen Anwendungsfeldern, von denen einige im Folgenden kurz aufgezeigt werden sollen.

UWB-Radar zur Kollisionsvermeidung und Verkehrsinformationsübertragung

Einige große Firmen der Automotive Industrie engagieren sich intensiv in diesem Bereich und entsprechende Standardisierungen für Zulassungsprüfverfahren solcher Systeme im Frequenzbereich um ca. 24 GHz arbeitender Systeme sind bereits in Arbeit (siehe [11]). Der Vorteil der UWB-basierten Radarsysteme gegenüber herkömmlichen Radar-Verfahren liegt vor allem im geringeren Einfluss von Witterungsverhältnissen und in der Möglichkeit einer genaueren Objektverfolgung aufgrund des wesentlich besseren räumlichen Auflösungsvermögens von UWB-Radar-Systemen.

Ground Penetrating / Wall Penetrating Radar und Baukörperinspektionsgeräte

In diesem breiten Feld sind Anwendungen zur Detektion bzw. Ortung verschütteter (z.B. in Lawinen, nach Erdbebenkatastrophen) oder eingeschlossener Personen geplant. Weiters könnten einfache Handgeräte zur Ortung von Objekten in Baukörpern einen Markt in der Baubranche finden. Beispielsweise zur Feststellung des Verlaufs von Wasserrohren oder Stahlbewehrung vor Bohrungen. Aus in diesem Segment existieren bereits Standardisierungsaktivitäten (siehe [11]).

Medizinische Anwendungen

Das hohe räumliche Auflösungsvermögen von UWB-Ortungsverfahren bietet auch die Möglichkeit für eine Reihe von medizinischen Anwendungen. Beispielsweise existieren einige wissenschaftliche Arbeiten zum Thema der Brustkrebsdetektion mittels UWB-Signalen als alternative zur auf ionisierender Strahlung basierenden Mammografie. Neben dem Einsatz radioaktiver Strahlung sind eine relativ hohe Fehldetektionsrate und auch die notwendige Kompression der Brust Nachteile der Mammografie ([29], [30], [31]). Durch die Entwicklung eines Systems mit einem der Brustform angepassten Antennenarray (4.3 GHz -9.7 GHz) [29] kann die Brust ohne größere Verformung, bei zufriedenstellender Auflösung untersucht werden. Tumormodelle in der Größenordnung von 4 mm sind derzeit bereits detektierbar [31].

Weiters werden in [5] konkret Atmungsmonitore, basierend auf der mittels UWB detektierten Brustwandbewegung angekündigt. Anwendungen wie die Fernüberwachung von Patientendaten wurden bereits in Kapitel 5.1.2 (WBAN) erwähnt.

6 VERFAHREN ZUR MESSTECHNISCHEN EXPOSITIONSERFASSUNG IN UWB-FELDERN

6.1 Größenordnung der zu erwartenden Immissionen

Bevor im Detail auf die Möglichkeiten der messtechnischen Expositionserfassung eingegangen wird, soll kurz, anhand theoretischer Betrachtungen, erörtert werden, in welcher Größenordnung die durch UWB-Geräte verursachten HF-Immissionen zu erwarten sind. Betrachtet werden dabei ausschließlich Geräte und Anwendungen für den freien Markt, die der aktuellen Funkregulierung für UWB entsprechen. Für militärische, medizinische (siehe z.B. [32]) und andere Sonderfälle von UWB-Anwendungen mit Leistungsdichten weit oberhalb der Werte der gegenwärtigen UWB-Funkregulierung können die folgenden Betrachtungen natürlich nicht gelten.

6.1.1 Vorgaben durch die Funkregulierung

Ausgangspunkt der Überlegungen sind die Vorgaben der Funkregulierung in Europa [2] für UWB-Anwendungen im Frequenzbereich 3,1 GHz – 10,6 GHz. Diese sind in Tabelle 6.1 nochmals zusammengefasst.

Frequenzbereich [GHz]	max. mittlere EIRP-Sendeleistungsichte [dBm / MHz]		
	Geräte ohne Störminderungstechnik bis 31.12.2010	Geräte ohne Störminderungstechnik ab 01.01.2011	Geräte mit Störminderungstechnik
< 1,6	- 90,0	- 90,0	- 90,0
1,6 - 3,4	- 85,0	- 85,0	- 85,0
3,4 - 3,8	- 85,0	- 85,0	- 41,3
3,8 - 4,2	- 70,0	- 70,0	- 41,3
4,2 - 4,8	- 41,3	-70,0	-41,3
4,8 - 6,0	- 70,0	- 70,0	- 70,0
6,0 - 8,5	- 41,3	- 41,3	- 41,3
8,5 - 10,6	- 65,0	- 65,0	- 65,0
> 10,6	- 85,0	- 85,0	- 85,0

Tabelle 6.1: Sendeleistungsdichtelimits für UWB-Geräte gemäß [2].

Gemäß der US-amerikanischen FCC-Funkregulierung für UWB [1], ist der Frequenzbereich zwischen 3,1 GHz und 10,6 GHz durchgehend von UWB-Geräten mit einer maximal zulässigen EIRP-Sendeleistungsdichte von -41,3 dBm/MHz nutzbar. Im Gegensatz dazu ist die Nutzung des Spektrums für UWB-Geräte auf diesem Sendeleistungsdichte-Niveau in Europa generell nur in den Frequenzbereichen zwischen 3,4 GHz und 4,8 GHz und zwischen 6 GHz und 8,5 GHz vorgesehen. Für Geräte ohne Störminderungstechnik wird langfristig sogar nur der Frequenzbereich zwischen 6,0 und 8,5 GHz sinnvoll nutzbar sein (vgl. Tabelle 6.1).

Diese aus technischer Sicht sehr restriktiven Beschränkungen für UWB sind durch die Sorge möglicher Interferenzen mit anderen Funkdiensten in den von UWB „mitbenutzten“ Frequenzbereichen begründet. Bedenken dieser Art, vor allem von Betreibern etablierter Funkdienste in lizenzierten Frequenzbändern geäußert, sind in Anbetracht der für die Lizenzen teilweise bezahlten Summen verständlich. Aus der Sicht

dieser Betreiber sollen UWB-Anwendungen zu keinen störenden Interferenzen mit den eigenen Funkdiensten führen.

Vor diesem Hintergrund wird auch deutlich, dass der für UWB-Anwendungen erlaubte Sendeleistungsdichtepegel nicht zufällig auf -41,3 dBm/MHz gesetzt wurde. Innerhalb des gesetzlichen Rahmens, der im Wesentlichen (wenn auch mit einigen Abweichungen) das US-amerikanische Pendant zur europäischen EMV-Richtlinie ist, legt nämlich die FCC in den USA im Frequenzbereich 960 MHz – 40 GHz einen maximal erlaubten Störaussendungspegel von $54 \text{ dB}\mu\text{V/m}$ in 3 m Entfernung zum Prüfling fest, wobei bei der entsprechenden Konformitätsprüfung eine Messbandbreite von 1 MHz und Verwendung eines AVG-Detektors vorgeschrieben sind.

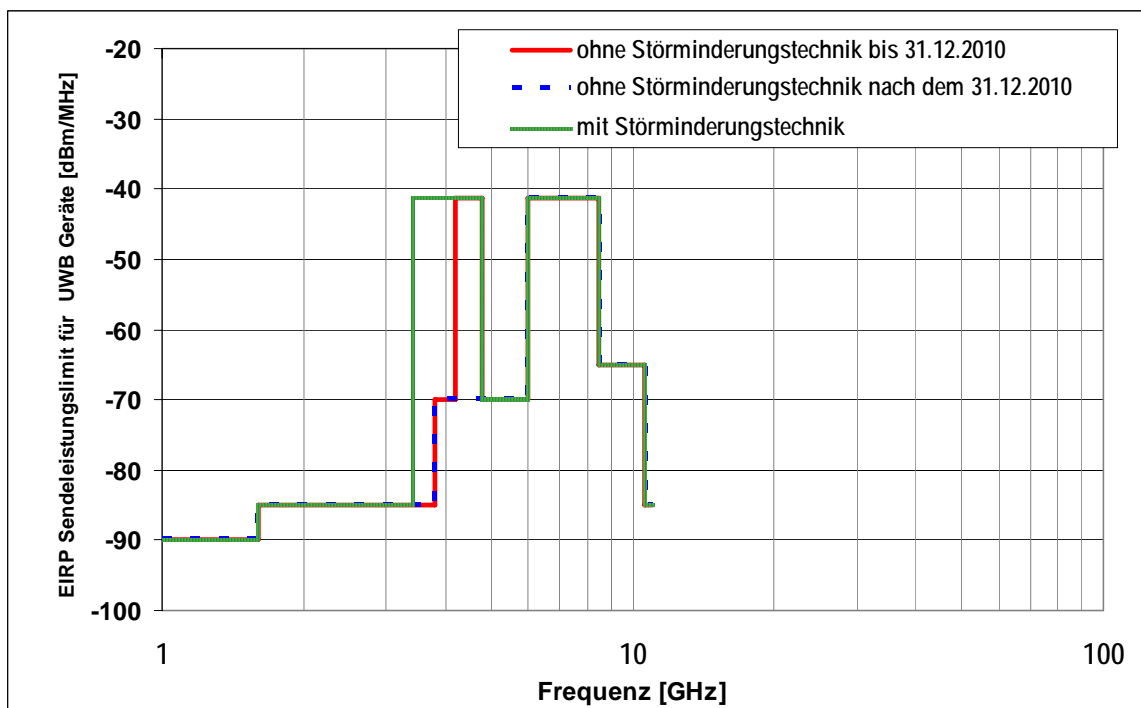


Abbildung 6.1: Graphische Darstellung der maximalen mittleren EIRP Sendeleistungsdichten für UWB-Geräte gemäß der aktuellen Entscheidung der Europäischen Kommission vom 21. Februar 2007 [2].

Eine einfache, auf der „Fernfeldbeziehung“

$$S = \frac{E^2}{Z_0} = \frac{P \cdot G}{4\pi d^2} \quad (6.1)$$

basierende Umrechnung, dieses Feldstärkepegels auf die entsprechende EIRP-Sendeleistungsdichte führt auf (Antennengewinn $G=1$):

$$P_{[1\text{MHz}]} = 4\pi d^2 \frac{E^2_{[1\text{MHz}]}}{Z_0} = 4\pi \cdot (3\text{m})^2 \cdot \frac{(10^{-6} \cdot 10^{\frac{54}{20}})^2}{377\Omega} \approx 7,5 \cdot 10^{-8} \text{ W / MHz}, \quad (6.2)$$

was genau -41,3 dBm/MHz entspricht.

D.h., die von UWB-Geräten verursachten elektromagnetischen Immissionen liegen (im Hinblick auf deren spektrale Dichte) maximal in einem Bereich wie sie auch von anderen

elektronischen (Nicht-Funk-)Geräten (z.B. Computer) auf Basis der US-amerikanischen EMV-Vorschriften verursacht werden dürften. Natürlich ist anzumerken, dass übliche elektronische Geräte, wie z.B. ein Computer mit einer Taktfrequenz im Bereich > 3,1 GHz, die erlaubte spektrale Dichte der Störaussendungen nicht über den gesamten Frequenzbereich „ausschöpfen“ wird, sondern nur „schmalbandig“ (z.B. Oszillatorfrequenz + Oberschwingungen) abstrahlen wird. UWB-Geräte werden, zur Erreichung guter Übertragungsqualität, demgegenüber den Bereich unterhalb der erlaubten Spektralmaske wesentlich dichter belegen und somit eine insgesamt wesentlich größere Sendeleistung im gesamten betrachteten Frequenzbereich abstrahlen. Trotzdem machen die oben angeführten Erläuterungen deutlich, dass die von UWB-Geräten zu erwartenden Immissionen sehr gering sein werden, was gleichzeitig auch deren beschränkten Aktionsradius von max. ca. 10 m festlegt.

Dass auch in Europa -41,3 dBm/MHz als maximale mittlere EIRP Sendeleistungsdichte für UWB-Geräte festgelegt wurde, liegt wohl daran, dass die entsprechende EMV relevante Fachgrundnorm EN 61000-6-3 in Europa Störaussendungslimits bis dato nur bis 1 GHz festlegt. Im Frequenzbereich oberhalb von 1 GHz sind derzeit Störaussendungslimits in Diskussion, jedoch derzeit noch nicht beschlossen⁴.

6.1.2 Einfache Abschätzung der Größenordnungen der Immissionen

Für die Abschätzung der Größenordnung der zu erwartenden UWB-Immissionen ist zunächst die verwendete Impulsform bzw. die dazugehörige Form des Frequenzspektrums bedeutsam, da die UWB-Regulierung lediglich Maxima der spektralen Sendeleistungsdichte im Frequenzbereich zwischen 3.1 GHz und 10.6 GHz in Form einer Spektralmaske festlegt (vgl. Abbildung 6.1 für die Verhältnisse in Europa). Wie viel HF-Sendeleistung ein UWB-Gerät tatsächlich maximal abstrahlen kann, hängt maßgeblich davon ab, wie effizient es die zugelassene Spektralmaske „ausfüllen“ kann. Abbildung 6.2 versucht dies an einem einfachen Beispiel zu verdeutlichen. Aus Gründen der Einfachheit wurde dazu nicht von den europäischen Verhältnissen, sondern von einer maximalen mittleren EIRP-Sendeleistungsdichte von konstant -41,3 dBm/MHz im Frequenzbereich zwischen 3,1 GHz bis 10,6 GHz (entsprechend der FCC-Regulierung), ausgegangen. Der zulässige mittlere EIRP-Sendeleistungsdichtepegel P_{SD} kann gemäß

$$S_{SD} = \frac{P_{SD}}{4\pi d^2} \quad (6.3)$$

einfach in den zugehörigen Leistungsflussdichtepegel S_{SD} in Entfernung d zur Quelle umgerechnet werden. Beispielsweise ergibt sich für $d = 1$ m Entfernung zur Quelle für den maximalen mittleren spektralen Dichte-Pegel der Leistungsflussdichte S (vgl. Abbildung 6.2)

$$S_{SD(1m)} = 10 \cdot \log\left(\frac{10^{(-41,3dBm/MHz)/10}}{4\pi(1m)^2}\right) = -52,3dB(mW/m^2)/MHz \quad (6.4)$$

Die linke Seite der Abbildung 6.2 zeigt drei unterschiedliche Zeitverläufe von Gauß-Impulsen der elektrischen Feldstärke in 1 m Entfernung zu hypothetischen UWB-Quellen, deren spektrale Dichtefunktion der äquivalenten mittleren Leistungsflussdichte

⁴ Einer der letzten Entwürfe einer neuen Version von EN61000-6-3 enthielt als Vorschläge für Störaussendungslimits im Frequenzbereich von 1-3 GHz maximal zulässige Feldstärkepegel in 3 m Abstand von 50 dB μ V/m (AVG) bzw. 70 dB μ V/m (PEAK). Auf diesen Vorschlag konnte man sich jedoch bisher nicht einigen.

gerade noch unterhalb des maximal zulässigen Niveaus von $-52,3 \text{ dB(mW/m}^2\text{)/MHz}$ liegt. D.h., alle drei betrachteten hypothetischen UWB-Quellen wären somit (hinsichtlich des Maximums der spektralen Sendeleistungsdichte) gerade noch konform zur FCC-Spektralmaske. Die unterschiedliche Signalform der drei Quellen führt jedoch zu unterschiedlichen Bandbreiten im Frequenzbereich, so dass die drei Quellen das prinzipiell zur Verfügung stehende Spektrum (gesamter Bereich unterhalb der Spektralmaske) unterschiedlich effizient ausnutzen.

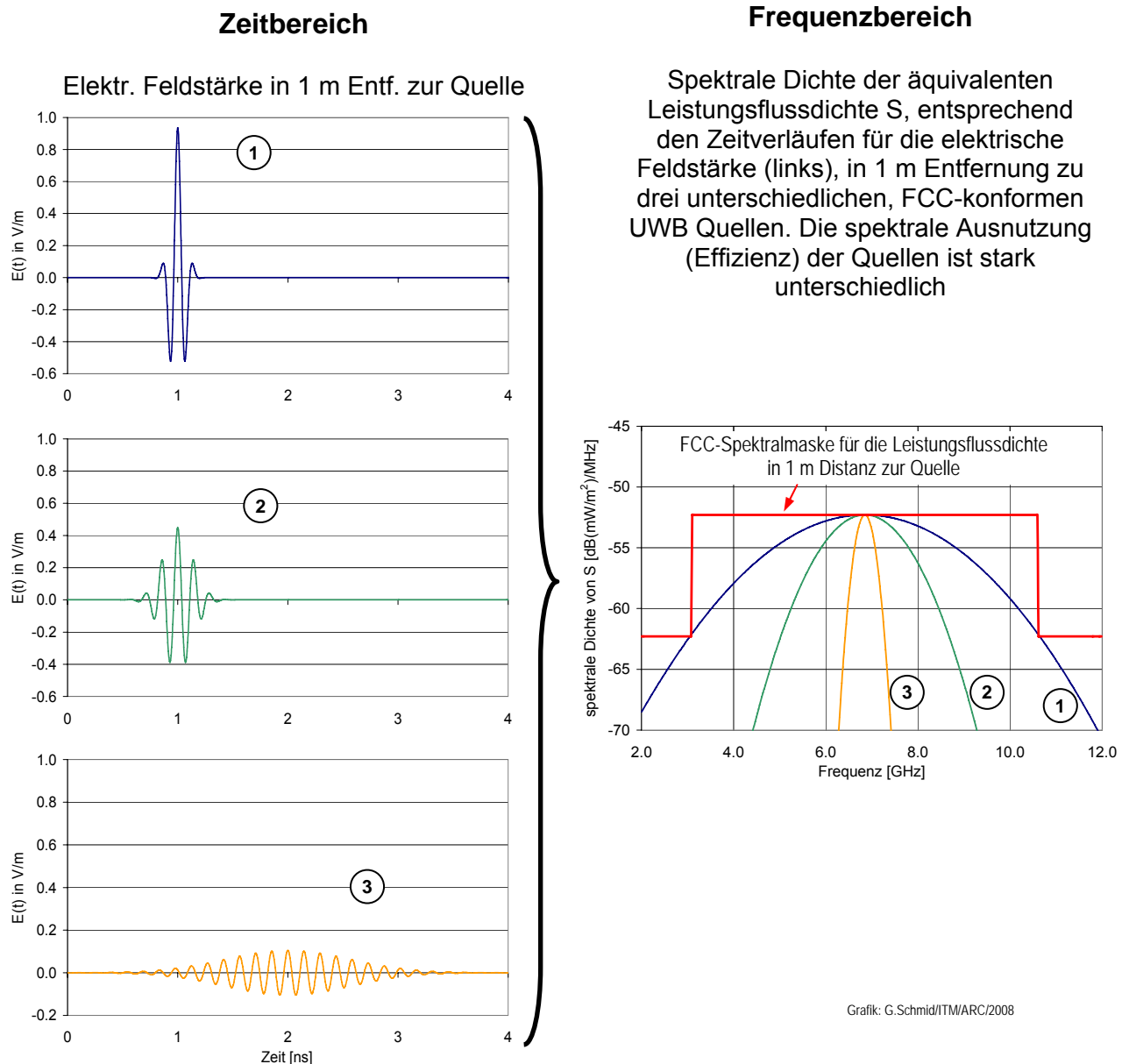


Abbildung 6.2: Zeitverläufe unterschiedlicher Gauß-Impulsformen der elektrischen Feldstärke und zugehörige spektrale Dichten der äquivalenten Leistungsflussdichte in 1 m Distanz zur jeweiligen Quelle. Alle drei dargestellten Signalverläufe entsprechen einer Quelle, die die Anforderungen der FCC-Spektralmaske für Indoor-UWB erfüllen (max. mittlere EIRP-Sendeleistungsdichte von -41.3 dBm/MHz im Frequenzbereich 3.1 GHz bis 10.6 GHz).

Dies wird deutlich, wenn man die von den drei betrachteten Quellen verursachte äquivalente Leistungsflussdichte, aus dem Integral der spektralen Dichtefunktion S_{SD} über den Frequenzbereich berechnet. Für die betrachteten drei hypothetischen UWB-Quellen illustriert Abbildung 6.3 die unter Anwendung der Fernfeldbeziehung (6.1)

berechneten Werte für die resultierenden äquivalenten Leistungsflussdichten S und äquivalenten elektrischen Feldstärken E in Abhängigkeit von der Entfernung. Zum Vergleich sind auch die Verläufe von S und E für eine (theoretische) Quelle mit 100% Ausnutzung der FCC-Spektralmaske dargestellt.

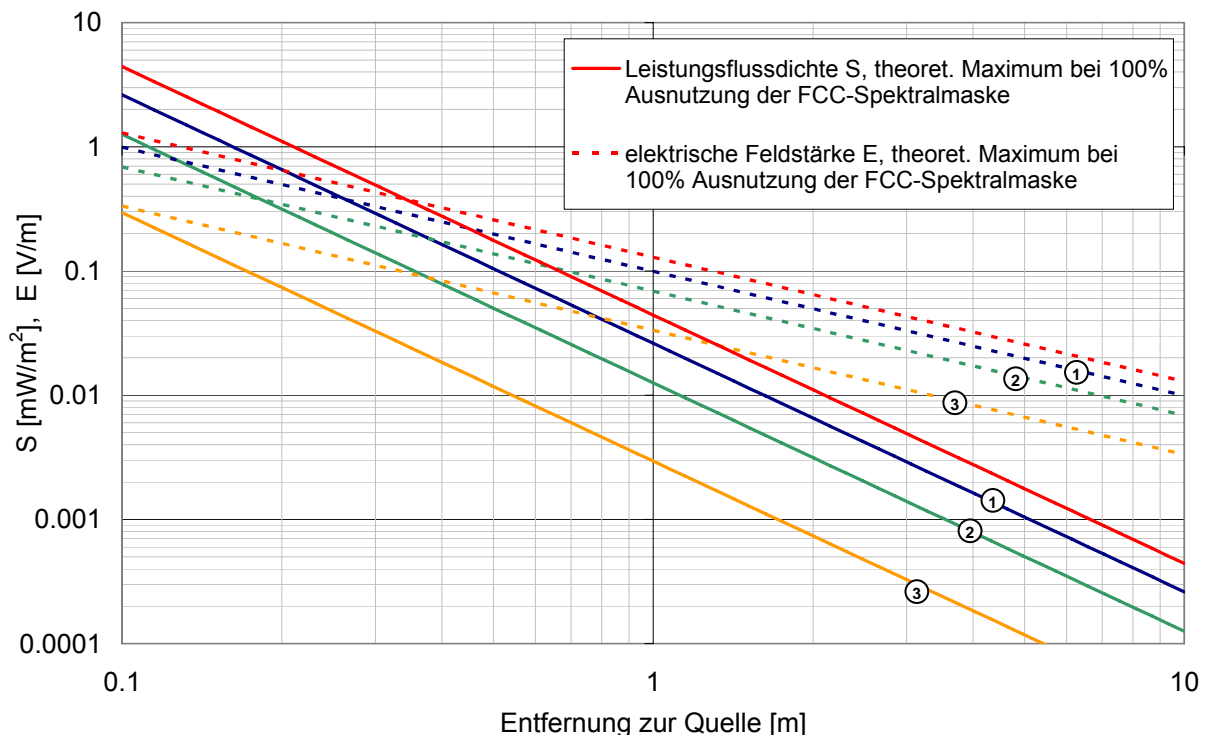


Abbildung 6.3: Verläufe der zu erwartenden resultierenden Leistungsflussdichten S (durchgezogene Linien) und elektrischen Feldstärken E (strichlierte Linien) in Abhängigkeit von der Entfernung zu den 3 hypothetischen Quellen (vgl. Abbildung 6.2), bei Anwendung der Fernfeldbeziehung (6.1). Zum Vergleich sind auch die Verläufe von S und E für eine (theoretische) Quelle mit 100% Ausnutzung der FCC-Spektralmaske dargestellt (rot).

Im Gegensatz zur US-amerikanischen Regulierung ist, wie bereits eingangs erwähnt, der Frequenzbereich zwischen 3,1 GHz und 10,6 GHz in Europa von UWB-Geräten nicht durchgängig nutzbar, sondern es bleiben die Bereiche unterhalb von 3,4 GHz, zwischen 4,8 GHz und 6,0 GHz und oberhalb von 8,5 GHz ausgespart (Abbildung 6.1). Dies bedeutet naturgemäß, dass die theoretische Obergrenze der Immissionsgrößen (bei 100% Ausnutzung der Spektralmaske) EU-konformer UWB-Geräte unterhalb jener von FCC-konformen UWB-Geräten liegt. Zudem führt die Aussparung des Frequenzfensters von 4,8 GHz bis 6,0 GHz, zumindest bei DS-UWB Geräten (also beim „echten Impuls-UWB“), zu besonderen Anforderungen hinsichtlich der Impulsformung, wenn man eine nahezu 100% Ausnutzung der EU-Spektralmaske anstrebt (vgl. Abbildung 2.9 oder allgemeiner und tief greifender in [33]). Mit OFDM-UWB bereitet die Frequenz-Aussparung insofern weniger Aufwand, als ganz einfach nur die entsprechenden Träger-Frequenzen ausgelassen werden müssen. UWB-Geräte für den europäischen Massenmarkt, z.B. im Bereich der Consumer-Elektronik, werden sich wahrscheinlich auch oft mit der Ausnutzung entweder des unteren (3,4 GHz – 4,8 GHz) oder des oberen (6,0 GHz – 8,5 GHz) Subbandes begnügen, was die maximal zu erwartenden äquivalenten Leistungsflussdichten weiter reduziert. Für Geräte ohne Störminderungstechnik steht gemäß der EU-Regulierung ab 1.1.2011 ohnehin nur mehr das obere Subband zur Verfügung, so dass für solche Geräte nur eine Bandbreite von 2,5 GHz zur Verfügung steht (nur ca. 33% der nach FCC zugelassenen Leistung). Geht man von UWB-Geräten nach WiMedia-Standard ([8], [9]) aus, so ist zu berücksichtigen,

dass solche Geräte zu jedem Zeitpunkt pro Funkkanal (pro Time Frequency Code TFC) immer nur ein 528 MHz breites Subband nutzen. Das verwendete Subband wird zwar in regelmäßigen Zeitabständen gemäß der Definition des Multiband-OFDM gewechselt, die Bandbreite der abgestrahlten HF-Leistung pro Funkkanal ist jedoch zu keinem Zeitpunkt größer als die genannten 528 MHz. D.h., ein einzelner UWB-Funkkanal nach WiMedia-Standard nutzt nur ca. 7% der gemäß FCC-Regulierung nutzbaren Sendeleistung (ca. 14% der gemäß EU-Regulierung zugelassenen Leistung für Geräte mit Störminderungstechnik). Zusammenfassend bedeutet dies, dass die zu erwartenden, von einem UWB-Gerät verursachten Immissionen vergleichsweise sehr gering sein werden. Abbildung 6.4 zeigt die, mittels der Fernfeldbeziehung (6.1) abgeschätzten, zu erwartenden maximalen Immissionswerte (Leistungsflussdichte und elektrische Feldstärke) in Abhängigkeit der Entfernung zu UWB-Quellen mit unterschiedlicher Ausnutzung des Spektrums. Es wird dabei deutlich, dass in Entfernungen von mehr als 50 cm zu einem in Europa zugelassenen UWB-Gerät die auftretenden maximalen Feldstärkewerte sogar im Extremfall (100% Ausnutzung des Spektrums) nicht mehr als 0,2 V/m betragen werden.

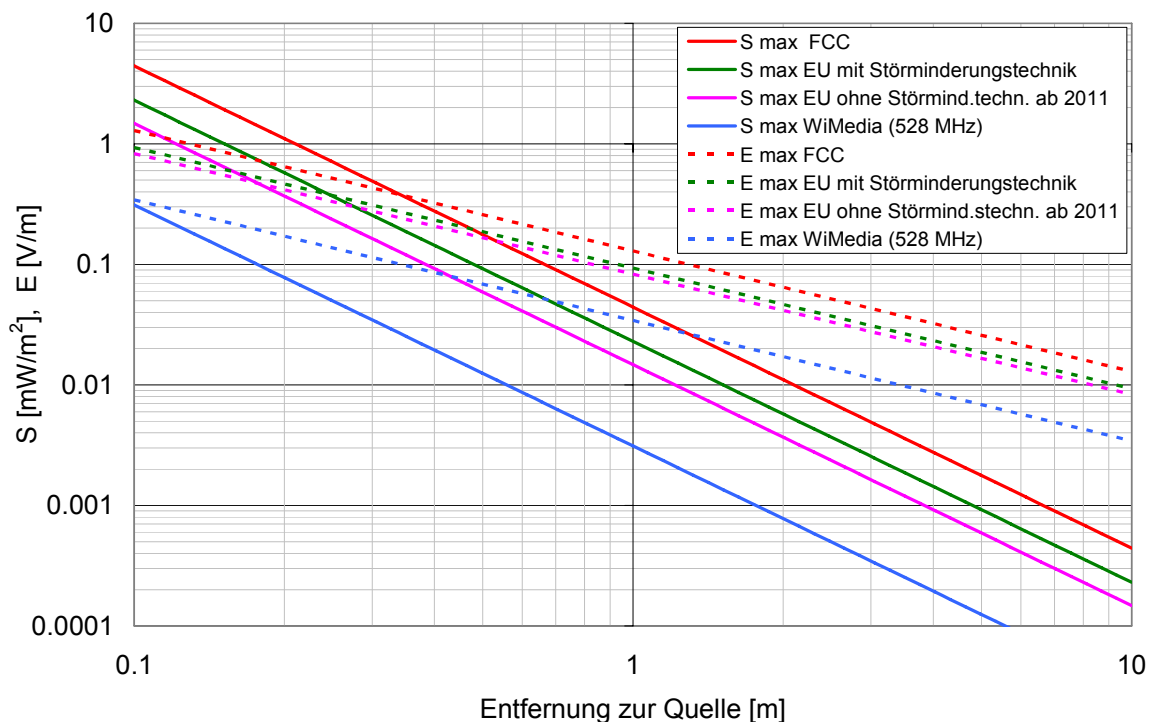


Abbildung 6.4: Mittels Fernfeldbeziehung (6.1) berechnete Verläufe der zu erwartenden resultierenden Leistungsflussdichten S (durchgezogene Linien) und elektrischen Feldstärken E (strichlierte Linien) in Abhängigkeit von der Entfernung zu einzelnen UWB-Quellen unter der Annahme 100% Ausnutzung der angegebenen Spektralmasken.

Betrachtet man ein Gerät nach WiMedia-Standard, und es werden nach gegenwärtiger Einschätzung der Situation wohl solche sein, die sich in nächster Zukunft am schnellsten im Massenmarkt verbreiten werden, so liegt der zu erwartende Maximalwert der äquivalenten elektrischen Feldstärke in 50 cm Entfernung sogar deutlich unter 0,1 V/m.

Die oben angestellten Überlegungen bilden eine wichtige Basis für die weiteren Ausführungen hinsichtlich tauglicher Messmethoden für die Expositionserfassung in UWB-Feldern, da aufgrund der sehr kleinen zu erwartenden Messgrößen, der Empfindlichkeit der verschiedenen Messmethoden eine besonders große Rolle zukommt.

6.2 Tauglichkeit unterschiedlicher Messverfahren für die Expositionsbestimmung in UWB-Feldern

Im Folgenden werden die für die Expositionserfassung in hochfrequenten elektromagnetischen Feldern heute grundsätzlich verfügbaren Messmethoden im Hinblick auf deren Tauglichkeit für die Immissionserfassung im Bereich von UWB-Geräten diskutiert. Die Diskussion wird dabei im Hinblick auf UWB-Geräte entsprechend der gegenwärtigen europäischen Funkregulierung für den Frequenzbereich 3,1 GHz -10,6 GHz geführt.

6.2.1 Breitbandmessungen (Feldsonden)

Breitbandmessungen mittels handelsüblicher Feldsonden müssen für die Expositionserfassung in UWB-Feldern als für die Praxis untauglich eingestuft werden. Obwohl grundsätzlich Feldsonden mit entsprechend großen Bandbreiten verfügbar sind, stellen die begrenzte Empfindlichkeit und die fehlende Information über die spektrale Zusammensetzung der erfassten Immissionsgröße die entscheidenden Schwachstellen dieser Messmethode dar.

Die erreichbare Empfindlichkeit (Eigenrauschen) von Mikrowellen-Breitbandfeldsonden mit Bandbreiten von mehreren Gigahertz ist üblicherweise nicht besser als ca. 0,1 V/m bis 0,2 V/m, was gemäß den Ausführungen des voranstehenden Abschnitts (Abbildung 6.4) für die meisten praktischen Gegebenheiten deutlich zu gering sein wird.

Weiters ist zu bedenken, dass alle im Nutzfrequenzbereich der Feldsonde liegenden Immissionen zum angezeigten Messwert beitragen. Im Fall von Immissionsmessungen in Feldern herkömmlicher (schmalbandiger) HF-Quellen (z.B. Mobilfunk), kann dieser Umstand oft toleriert werden, wenn davon ausgegangen werden kann, dass die interessierende Quelle am Immissionsort (im Nutzfrequenzbereich der Sonde) dominant ist. Aufgrund der geringen Sendeleistung von UWB-Geräten wird diese Voraussetzung in der Praxis kaum als erfüllt angesehen werden können. Vielmehr ist zu erwarten, dass der „elektromagnetische Hintergrund“, verursacht von diversen anderen HF-Quellen, zumindest in der gleichen Größenordnung, bzw. in größerem Abstand zu UWB-Quellen deutlich oberhalb dem UWB-Immissionsniveau liegt.

6.2.2 Messungen im Zeitbereich (mit Digital-Oszilloskop)

Unter „Messung in Zeitbereich“ wird im Folgenden die „direkte“ Messung der Immissionsgröße, d.h. ohne deren Frequenzumsetzung verstanden. Für diese Art von Messung bieten heute moderne und leistungsfähige Digital-Oszilloskope eine Vielzahl von Möglichkeiten. Eine Recherche nach effizienten „UWB-Mess-Methoden“ führt heute praktisch immer auf die Verwendung eines Breitband-Digital-Oszilloskops als erstgenannte Methode. Dies ist einerseits rein intuitiv verständlich, da leistungsfähige (=teure) Oszilloskope entsprechend große Messbandbreiten bieten, die den Frequenzbereich von UWB-Geräten komplett abdecken können, was bei Geräten mit Frequenzumsetzung (z.B. Spektrumanalysator) nicht möglich ist. Andererseits bietet die Zeitbereichsmessung mit entsprechender Bandbreite im Vergleich zur Messung im Frequenzbereich (mit Spektrumanalysator) auch wesentlich mehr Einblicke in die Signaleigenschaften, wie z.B. Phasenbeziehungen zwischen Signalen, und moderne Oszilloskope bieten zudem eine Vielfalt vorteilhafter Funktionen (z.B. Triggerfunktionen) und Möglichkeiten der mathematischen Verarbeitung der Messgröße. All diese Eigenschaften und Möglichkeiten der Zeitbereichsmessungen sind der Grund dafür, dass im Bereich der UWB-Systementwicklung und UWB-Signalanalyse der Einsatz von schellen, breitbandigen Digital-Oszilloskopen zum (notwendigen) Standard geworden ist

und daher diese Messmethode beim Stichwort „UWB-Messungen“ sofort die erstgenannte Option ist. Die Zielsetzung bei der Erfassung der Exposition in UWB-Feldern ist jedoch stark unterschiedlich zu jener der UWB-Systementwicklung und UWB-Signalanalyse und damit muss die Tauglichkeit der Zeitbereichsmessungen für die Immissionserfassung vor einem anderen Hintergrund diskutiert werden. Beispielsweise ist die Verfügbarkeit von Phaseninformationen des Messsignals für die Expositionserfassung in UWB-Feldern irrelevant, dafür ist aber, aufgrund der weiter oben diskutierten geringen zu erwartenden Immissionswerte, hohe Empfindlichkeit der Messmethode wichtig. Für Messungen im Zuge der UWB-Systementwicklung und UWB-Signalanalyse ist die relativ geringe Empfindlichkeit der Oszilloskope weniger kritisch, da die Messgröße dem Messgerät üblicherweise über Kabel zugeführt werden kann und damit ausreichender Signalpegel vorliegt.

Bei der Immissionserfassung jedoch wird die Immissionsgröße mittels einer Antenne erfasst und das Antennenausgangssignal dem Messgerät zugeführt und der dabei am Eingang des Oszilloskops anliegende Signalpegel ist daher um mehrere Größenordnungen geringer als im oben genannten Fall.

Leistungsfähige Digital-Oszilloskope mit Bandbreiten ≥ 10 GHz (siehe z.B. [34],[35]) bieten heute maximale Empfindlichkeitseinstellungen (bei Messungen über die gesamte Bandbreite) von üblicherweise nicht unter 5 mV/div, wobei für das Eigenrauschen (Noise Floor) in diesen Messbereichen ca. 0.5 mV in den Spezifikationen angegeben werden. Für sinnvoll ablesbare Messergebnisse sollte sich das Nutzsignal vom Rauschhintergrund zumindest um einen Faktor 2 abheben, also mindestens ca. 1 mV (entsprechend ca. 60 dB μ V) am Eingang des Oszilloskops betragen. Berücksichtigt man weiters, dass das Wandlungsmaß (Antennenfaktor) üblicher und handlicher Breitband-Messantennen für den hier interessierenden Frequenzbereich kaum besser als 35-40 dB/m ist, entspricht dies, unter Vernachlässigung der Verluste im Messkabel, einer elektrischen Feldstärke von mindestens 95-100 dB μ V/m (entsprechend 0,06-0,1 V/m), die noch sinnvoll gemessen werden kann. Vergleicht man diesen Wert mit Abbildung 6.4 so wird deutlich, dass damit die Immissionen typischer UWB-Geräte, wie z.B., nach Wimedia-Standard, nur mehr in Entfernungen von unter 1 m zum Gerät möglich sein wird. Berücksichtigt man weiters Verluste im Messkabel und die Tatsache, dass die in Abbildung 6.4 dargestellten Verhältnisse nur für die maximal erlaubte Sendeleistung und nur in Hauptstrahlrichtung gelten (wegen EIRP-bezogener Definition der Regulierung), wird die Entfernung in der die UWB- Immissionen eines solchen Gerätes noch messbar sind, wohl eher im Bereich unterhalb von 0,5 m zur Quelle liegen.

6.2.3 Frequenzselektive Messungen (mit Spektrumanalysator)

Bei der frequenzselektiven Messung mittels Spektrumanalysator erfolgt vor der eigentlichen Auswertung der Messgröße eine analoge Frequenzumsetzung auf eine fix festgelegte Zwischenfrequenz. Im Hinblick auf die Signalamplitude kann dies mit entsprechendem schaltungstechnischem Aufwand sehr präzise und mit hoher Messdynamik, allerdings nur mit eingeschränkter Bandbreite erfolgen. Spektrumanalysatoren der mittleren Preisklasse bieten heute üblicherweise Messbandbreiten (Auflösebandbreiten) bis etwa 5 MHz an. Bei Messungen von Signalen mit größerer Bandbreite müssen die erfassten Messwerte entsprechend dem Verhältnis zwischen Signalbandbreite und äquivalenter Rauschbandbreite des Spektrumanalysators korrigiert werden. Mit Mittelklasse-Spektrumanalysatoren (ab ca. 25.000,- Euro) sind bei z.B. 100 kHz Auflösungsbreite sehr geringe Eigenrauschpegel von ca. -100 dBm (entsprechend 7 dB μ V bzw. ca. 2-3 μ V) erreichbar. Wieder einen ausreichenden Abstand zum Hintergrundrauschen vorausgesetzt sind damit Signalstärken am Detektor

des Spektrumanalysators von $10 \text{ dB}\mu\text{V}$ gerade noch sinnvoll messbar. Aufgrund der beschränkten Auflösebandbreite steht bei der Messung mit dem Spektrumanalysator allerdings nur ein Bruchteil der UWB-Signalleistung als Messgröße zur Verfügung. Für das obige Beispiel mit 100 kHz Auflösebandbreite und einem UWB-Gerät nach WiMedia-Standard mit 528 MHz Bandbreite beträgt der Faktor zwischen tatsächlich anstehender Immissionsleistung und auswertbarer Leistung ca. 5000 , entsprechend ca. 37 dB . Mit dieser „Einbuße“ von ca. 37 dB zufolge der geringen Auflösebandbreite⁵ und dem oben abgeschätzten Mindestsignalpegel am Eingang von ca. $10 \text{ dB}\mu\text{V}$ ergibt sich daher, umgelegt auf die gesamte WiMedia-Signalbandbreite von 528 MHz , ein notwendiger Signalpegel am Eingang des Spektrumanalysators von ca. $47 \text{ dB}\mu\text{V}$. Mit den oben bereits erwähnten typischen Wandlungsmaßen (Antennenfaktoren) entsprechender Messantennen von ca. $35\text{-}40 \text{ dB/m}$ entspricht dies unter Vernachlässigung der Verluste im Messkabel, einer elektrischen Feldstärke von mindestens $82\text{-}87 \text{ dB}\mu\text{V/m}$ (entsprechend ca. $0,01\text{-}0,02 \text{ V/m}$) die noch sinnvoll gemessen werden kann. D.h., die frequenzselektive Messung ist der oben diskutierten Zeitbereichsmessung hinsichtlich der erreichbaren Messempfindlichkeit überlegen. Umgelegt auf die Entfernung zu der als Beispiel angenommenen UWB-Quelle in der ihre Immissionen noch nachgewiesen werden können, ergibt sich in diesem Fall (maximal erlaubte Sendeleistung des Gerätes, Messung in Hauptstrahlrichtung) ein Wert von ca. 3 m (vgl. Abbildung 6.4). Unter realistischeren Annahmen (Berücksichtigung von Verlusten im Messkabel, nicht maximale Sendeleistung, Messung nicht in Hauptstrahlrichtung) wird diese Entfernung möglicherweise eher bei ca. 1 m liegen.

Ein weiterer wesentlicher Vorteil der frequenzselektiven Messtechnik liegt darin, dass schmalbandige Spektralanteile (z.B. von anderen Funkdiensten) im Frequenzbereich von UWB-Anwendungen erkannt und aus dem Messergebnis extrahiert werden können, sodass der tatsächliche UWB-Immissionsanteil erfasst werden kann. In der Praxis kann dies beispielsweise durch (mehrere hintereinander ausgeführte und anschließend summierte) Bandpower Messungen erfolgen, bei denen jeweils die schmalbandigen Fremdanteile ausgespart bleiben. Der sich dadurch ergebende Messfehler im UWB-Immissionsanteil wird bei entsprechender Schmalbandigkeit der ausgesparten Frequenzbereiche im Allgemeinen vernachlässigbar sein, bzw. kann er durch Interpolation des UWB-Spektrums über die ausgesparten Frequenzbereiche größtenteils kompensiert werden.

6.2.4 SAR-Messungen bei körpernahen UWB-Sendern

Neben der Messung der UWB-Immissionen im Fernfeld der Quellen in Form von Feldstärke- bzw. Leistungsflussdichtemessungen stellt sich auch die Frage nach den Möglichkeiten für die Erfassung der lokalen Exposition bei körpernah betriebenen Geräten (SAR-Messung). Die im Zusammenhang mit vielen Endgeräten der herkömmlichen Funktechnologien routinemäßig durchgeführten SAR-Messungen stoßen bei der Betrachtung von UWB-Geräten an ihre Grenzen. Dies ist vor allem durch zwei Gegebenheiten begründet.

Einerseits können regulierungskonforme UWB-Geräte aufgrund ihrer geringen Sendeleistung nur zu SAR-Werten führen, die in den meisten Fällen deutlich unterhalb der Empfindlichkeit der gegenwärtig verfügbaren SAR-Messtechnik von ca. $0,005 \text{ mW/g}$ liegen (je nach Frequenzbereich und Gewebe simulierender Flüssigkeit). Um dies zu zeigen, kann zunächst die theoretische Obergrenze (100% Ausnutzung des gesamten

⁵ Eine Erhöhung der Auflösebandbreite (z.B. auf das Maximum, typ. 5 MHz) bringt keinen Vorteil, da sich dadurch nicht nur der Nutzsignalanteil, sondern in gleichem Maße auch die Rauschleistung erhöht.

verfügbaren Frequenzbereiches) für die mittlere EIRP-Sendeleistung $P_{EIRP,max}$ von UWB-Geräten leicht aus

$$P_{EIRP,max} [mW] = 1[mW / MHz] \cdot B[MHz] \cdot 10^{-41,3/10} \quad (2.5)$$

berechnet werden, wobei B für die insgesamt belegte Bandbreite steht. Tabelle 6.2 fasst diese Obergrenzen der EIRP-Sendeleistungen für unterschiedliche Regulierungsvorgaben zusammen. Geht man von der rein theoretischen Annahme aus, dass die gesamte abgestrahlte Leistung eines solchen Gerätes zur Gänze in einem, genau der Mittelungsmasse entsprechenden Volumen absorbiert wird, ergeben sich die in der äußerst rechten Spalte von Tabelle 6.2 angegebenen Werte für die über 1g bzw. über 10g gemittelte SAR. Es ist daraus klar erkennbar, dass in der Praxis, mit einer räumlich kompliziert verteilten Absorption nur eines Bruchteils der Sendeleistung, die maximalen SAR-Werte typischerweise unterhalb der Empfindlichkeit der gegenwärtigen SAR-Messtechnik liegen werden.

Regulierung	nutzbare Gesamt-Bandbreite B [MHz]	theoret. Obergrenze der EIRP-Sendeleistung $P_{EIRP,max}$ [mW]	theoret. Obergrenze der lokalen SAR SAR_{1g} / SAR_{10g} [mW/g]
FCC (USA)	7500	0,556	0,556 / 0,056
EU mit Störminderungstechnik	3900	0,289	0,289 / 0,029
EU ohne Störmind.technik bis 31.12.2010	3100	0,230	0,230 / 0,023
EU ohne Störmind.technik ab 01.01.2011	2500	0,185	0,185 / 0,019
WiMedia-Standard (1 Kanal mit 528 MHz)	528	0,039	0,039 / 0,004

Tabelle 6.2: Theoretische Obergrenzen der Sendeleistung für UWB-Geräte im Frequenzbereich zwischen 3,1 und 10,6 GHz gemäß den unterschiedlichen Regulierungsvorgaben.

Die Tatsache, dass die gegenwärtig verfügbaren SAR-Messsonden üblicherweise eine obere Frequenzgrenze von 6 GHz besitzen, wäre zwar ebenfalls zum gegenwärtigen Zeitpunkt ein Problem, die Erweiterung der Sondentechnik auf einen breiteren Frequenzbereich (bis 10,6 GHz) ist allerdings, technologisch gesehen, eine wesentlich geringere Herausforderung im Vergleich zur doch deutlich zu geringen Empfindlichkeit.

Ein weiteres gegenwärtiges Problem im Hinblick auf SAR-Messungen bei körpernahe Betrieb von UWB-Sendegeräten, sind die dielektrischen Eigenschaften der notwendigen Gewebe simulierenden Phantommateriale (Flüssigkeiten). Obwohl für die wichtigsten Körpergewebe dispersive Gewebemodelle verfügbar sind [36], sind keine wissenschaftlichen Arbeiten bekannt, die sich mit der Entwicklung von entsprechend breitbandigen Gewebe simulierenden Flüssigkeiten befassen. Wie schwierig es ist, die dispersiven Eigenschaften der Körpergewebe durch repräsentative Gewebe simulierende Flüssigkeiten über einen Frequenzbereich von mehreren hundert MHz bzw. sogar einige GHz nachzubilden, ist schon allein daran zu erkennen, dass für die gegenwärtig routinemäßig durchgeführten SAR-Messungen mit schmalbandigen Geräten, für praktisch jedes Frequenzband eigene Flüssigkeiten verwendet werden müssen (z.B. GSM900/GSM1800/UMTS/WLAN).

Schließlich, eng mit der Problematik der dispersiven Gewebeeigenschaften verknüpft, besteht das Problem, dass der Kalibrierfaktor der gegenwärtigen SAR-Messsonden-Technologie eine Funktion der dielektrischen Parameter ϵ und σ der Gewebe simulierenden Flüssigkeit ist. Da ϵ und σ aufgrund der Dispersion frequenzabhängig

sind, folgt daraus auch die Frequenzabhängigkeit der Sonden-Kalibrierfaktoren. Die spektrale Zusammensetzung der absorbierten Leistung im Gewebe (in der Flüssigkeit) wird räumlich nicht konstant sein, da z.B. höherfrequente Spektralanteile eher oberflächlich und niederfrequente Spektralanteile auch noch in tieferen Gewebeschichten absorbiert werden. Daraus ergibt sich das Problem, dass abhängig von der Sondenposition (Sondentiefe im homogenen Material), bzw. abhängig von der spektralen Zusammensetzung der SAR am Messort unterschiedliche Kalibrierfaktoren anzuwenden wären. Da jedoch SAR-Messsonden keine Frequenzinformation der Messgröße liefern können, besteht hier ein grundsätzliches Problem. Wissenschaftliche Untersuchungen zu diesem Problembereich, bzw. über die zusätzlichen Messunsicherheiten bei Verwendung der gegenwärtigen Sondentechnologie und nur in grober Näherung angepasster Gewebe simulierender Flüssigkeiten, sind bisher keine bekannt. Formal, aus der Sicht der Konformitätsprüfung von Geräten hinsichtlich des Personenschutzes, besteht aus heutiger Sicht allerdings auch kein Anlass dazu, da für alle zur gegenwärtigen Regulierung konformen UWB-Geräte aufgrund ihrer geringen Sendeleistung kein expliziter Nachweis zur Einhaltung der SAR-Basisgrenzwerte zu erbringen ist. Z.B. kann in Europa gemäß EN 50371 [37], basierend auf den auch Tabelle 6.1 zugrunde liegenden Überlegungen, für alle Funksendegeräte mit einer mittleren Sendeleistung ≤ 20 mW implizit die Konformität mit den europäischen Basisgrenzwerten angenommen werden. Da die zeitgemittelte SAR bei kurzen energiereichen Impulsen, mit relativ großen Impulswiederholzeiten, nur ein adäquates Maß für die Gewebeerwärmung darstellt, aber keine Aussage hinsichtlich thermoelastischer Expansionseffekte im Gewebe erlaubt, schreibt EN 50371 [37] zusätzlich auch Limits für die spezifische Absorption SA pro Impuls vor. Für gepulste Felder mit Impulsdauer weniger als $30 \mu\text{s}$ und Impulswiederholraten von weniger als 100 Hz gilt gemäß EN 50371 für die maximale mittlere Sendeleistung $P_{\text{max}} = 20 \times f_{\text{imp}}$ [mW] unterhalb der implizit die Konformität mit den Basisgrenzwerten angenommen werden kann (f_{imp} ... Impulswiederholfrequenz in Hertz).

Zusammenfassend lässt sich daher sagen, dass die messtechnische Erfassung von UWB-Immissionen, aufgrund der sehr geringen zu erwartenden Sendeleistungen in den meisten Fällen nur in unmittelbarer Nähe zu den Quellen sinnvoll und möglich ist. Hinsichtlich der Tauglichkeit der prinzipiell verfügbaren Messmethoden sind frequenzselektive Methoden mit Spektrumanalysatoren aufgrund deren höherer Empfindlichkeit besser geeignet, als die Zeitbereichsmethode mit breitbandigen Digital-Oszilloskopen. Auch hinsichtlich des finanziellen Aufwands sind Messungen mit Spektrumanalysator zu bevorzugen, da hinsichtlich Messempfindlichkeit bereits Spektrumanalysatoren der preislichen Mittelklasse (ab ca. 25.000,- Euro) für die hier diskutierte Aufgabenstellung besser geeignet sind als die hierfür notwendigen Digital-Oszilloskope mit Messbandbreiten von mehr als 10 GHz (unteres Preisniveau ca. 70.000,- Euro).

Breitband-Immissionsmessungen mit Feldsonden, sowie SAR-Messungen bei körpernah betriebenen UWB-Geräten, werden in den meisten Fällen aufgrund ihrer relativ geringen Empfindlichkeit für UWB-Messungen nicht sinnvoll einsetzbar sein.

Einblicke in die Absorptionsverteilung bei körpernaher Exposition durch UWB-Geräte, können daher gegenwärtig nur auf Basis numerischer Feldberechnungsmethoden gewonnen werden (siehe Kapitel 7).

6.3 Ermittlung praxistauglicher Messparameter anhand von Messungen unter Laborbedingungen

Um die im vorangegangenen Kapitel angestellten theoretischen Überlegungen experimentell zu untermauern, bzw. um sinnvolle Messparameter für Immissionsmessungen und die damit verknüpften Messunsicherheiten zu ermitteln, wurden Messungen an UWB-Geräten unter kontrollierten Laborbedingungen durchgeführt. Da am europäischen Markt zum gegebenen Zeitpunkt noch keine UWB-Produkte erhältlich sind, wurden zwei auf dem US-amerikanischen Markt erhältliche Produkte (konform zur FCC-UWB-Regulierung) für die Messungen verwendet. Alle Messungen fanden, zur Vermeidung von Interferenzen mit bestehenden Funkdiensten in einem geschirmten HF-Labor statt.

Bei einem der Produkte handelt es sich um ein UWB-Evaluation Kit der Firma Time Domain [38], das nach dem „echten“ Impuls-basierten UWB-Prinzip arbeitet.

Das zweite untersuchte Produkt ist das erste erhältliche UWB-Datenkommunikations-Massenprodukt, der „Cable-free USB-Hub“ der Firma Belkin [16], der nach dem WiMedia-Standard, d.h., mit MB-OFDM-UWB arbeitet.

6.3.1 Messungen an einer Multiband-OFDM-UWB Quelle nach dem WiMedia Standard

Spezifikationen des untersuchten Gerätes

Für die Messungen wurde der *Cable-Free USB Hub* (Model No. F5U301, Fa. Belkin International, Inc.) verwendet. Bei diesem Gerät handelt es sich um das weltweit erste am Massenmarkt verfügbare UWB-Produkt nach WiMedia-Standard. In der derzeit verfügbaren und hier untersuchten Version entspricht das Gerät nur der UWB-Regulierung nach FCC und ist daher in Europa nicht zugelassen. Das Gerät besteht aus einem USB-Dongle der direkt an eine USB-Schnittstelle des Computers angeschlossen wird und einem dazugehörigen Hub für den Anschluss von bis zu 4 Peripheriegeräten. Zwischen dem Hub und dem USB-Dongle werden die Daten mittels MB-OFDM-UWB übertragen. Bei guten Empfangsbedingungen, d.h. geringer Distanz zwischen USB-Dongle und Hub, sind damit bis zu 480 MBit/s Bruttodatenrate möglich.



Abbildung 6.5: Cable-Free USB Hub der Fa. Belkin International, Inc.; links: USB-Dongle, rechts: Hub

Für die Übertragung wird nur die Bandgruppe 1, d.h., die drei jeweils 528 MHz breiten Kanäle mit den Mittenfrequenzen 3432, 3960, 4488 MHz verwendet, und als Time Frequency Codes (TFC) stehen nur TFC1, TFC2, TFC5, TFC6 und TFC7 zur Verfügung (vgl. Kapitel 2.3.3). Die Auswahl des TFC kann entweder automatisch oder manuell über eine Konfigurationssoftware erfolgen.

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

Untersuchungen zu den emittierten Signalformen

Um das Zeitverhalten der emittierten HF-Signale des Gerätes zu untersuchen wurden zunächst Messungen kabelgebunden, d.h. direkt an einem Antennenausgang des Hubs durchgeführt (Abbildung 6.6). Die Funkverbindung zwischen Dongle und Hub konnte über die zweite Antenne des Hubs (offensichtlich zu Diversity-Zwecken vorhanden) aufrecht erhalten werden. Als Datenquelle zur Generierung eines konstanten Datentransfers diente ein herkömmlicher USB-Stick.

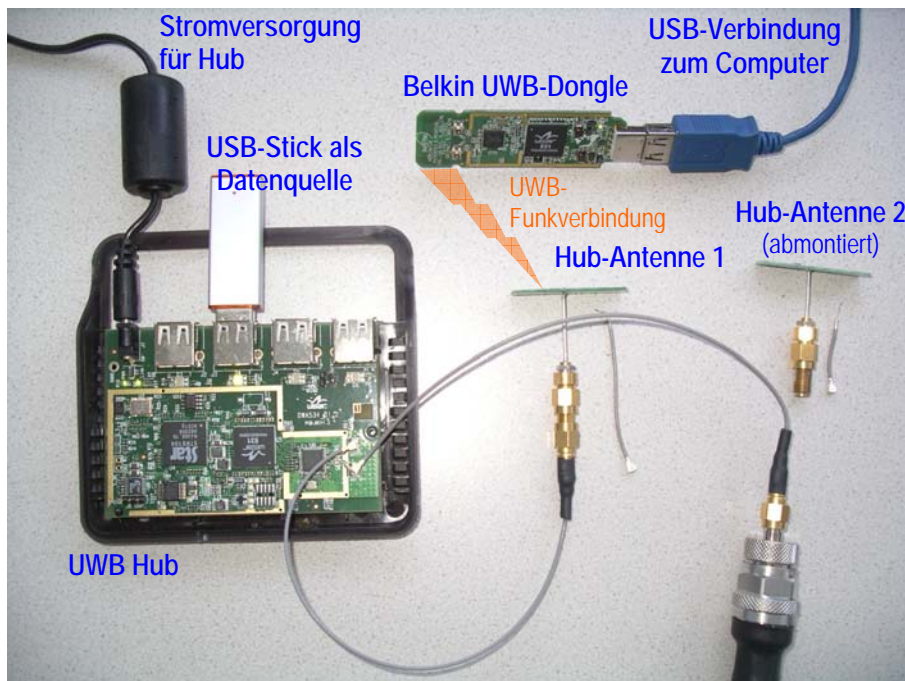


Abbildung 6.6: Messungen am Antennenausgang des Belkin Cable-Free USB Hub

Als Messgerät wurde in diesem Fall ausschließlich ein Spektrumanalysator (Agilent E4405B) verwendet, da aufgrund des Rauschcharakters von OFDM Signalen für die hier interessierenden Fragestellungen die Messung mittels Digitaloszilloskop keinen Vorteil gegenüber Messungen im Zerospan-Modus des Spektrumanalysators bringt.

Abbildung 6.7 zeigt Zeitverläufe des Sendesignals des UWB-Hubs bei voller Auslastung mit einer Datenübertragung von einem am Hub angeschlossenen USB-Stick zum UWB-Dongle am Computer. Zuzufolge der relativ komplexen und teilweise flexiblen Rahmenstruktur des Übertragungsstandards erfolgt die HF-Abstrahlung in Form von Bursts (konstanter Amplitude), abhängig vom gerade zu bewältigenden Datenverkehr. Im Zustand ohne Datenübertragung erfolgt lediglich die regelmäßige Aussendung von Beacon Signalen (Abbildung 6.8).

Hinsichtlich der Immissionserfassung liegen die Verhältnisse daher sehr ähnlich wie im Fall von WLAN (vgl. z.B. [39]), d.h. die mittleren Immissionen können, je nach Datenverkehrssituation, über mehrere Größenordnungen schwanken.

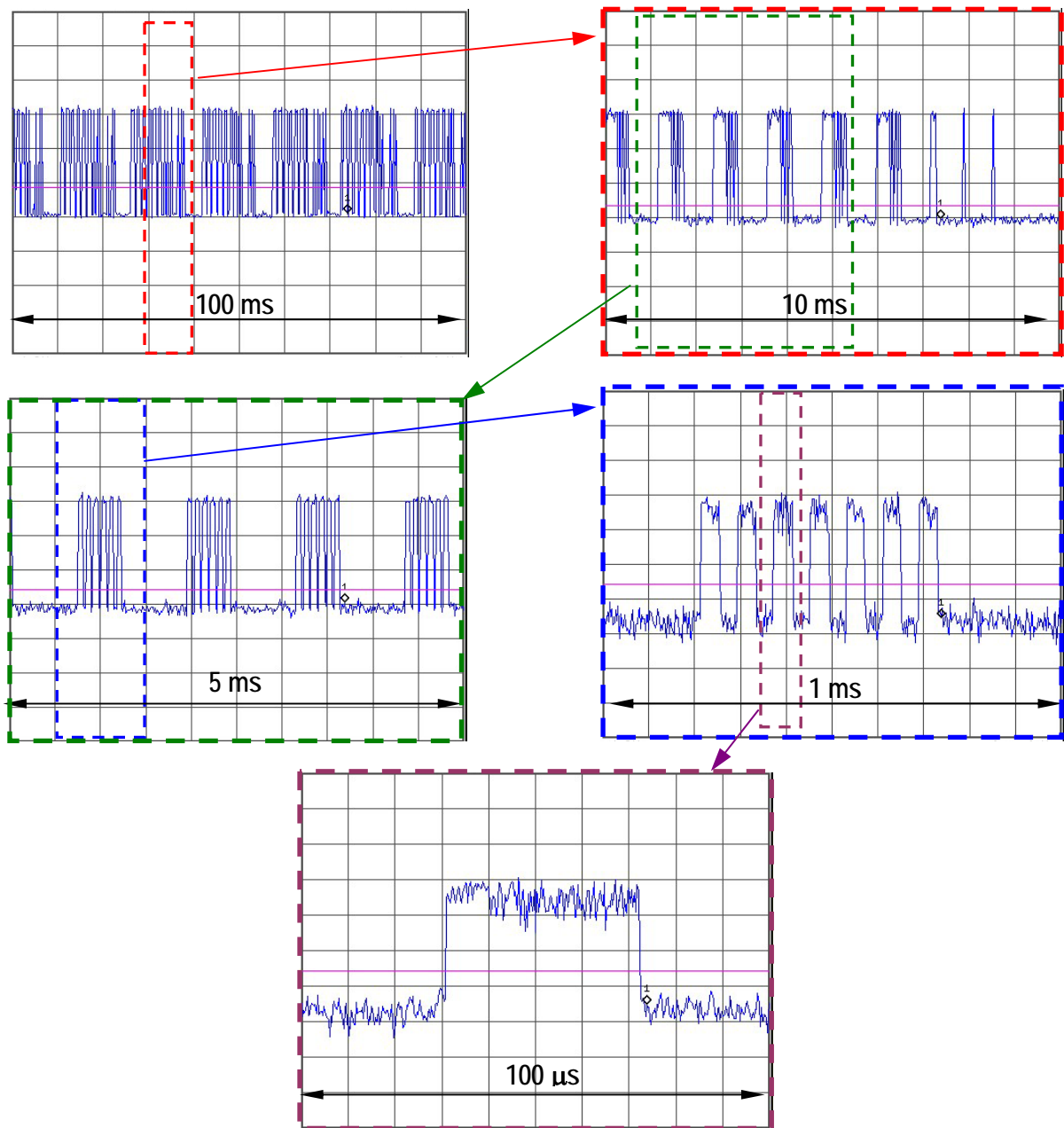


Abbildung 6.7: Zeitverlauf (Amplituden nur qualitativ) des Sendesignals des Belkin Cable-Free USB (UWB) Hub bei voller Auslastung durch eine Datenübertragung von einem USB-Stick zum UWB-Dongle am Computer in schrittweise größer werdenden zeitlicher Auflösung.

Ebenso wie im Fall von WLAN ist, aufgrund der stochastischen Signalcharakteristik des MB-OFDM Übertragungsverfahrens, für die korrekte Erfassung der Immissionen die Verwendung eines RMS-Detektors erforderlich. Die Verwendung eines PEAK-Detektors führt unweigerlich zu systematischen Überschätzungen der Immissionen. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 6.9 dargestellt. Das Bild zeigt die Ergebnisse von Messungen am HF-Ausgang des Hubs während einer Datenübertragung vom USB-Stick zum Computer, wobei Time Frequency Code TFC 1 für die Übertragung verwendet wurde, d.h., die Übertragung erfolgt in sequentiell wiederholter Abfolge in den Frequenzbändern 1, 2 und 3. Die Messung erfolgte einmal mit PEAK-Detektor im

MAXHOLD-Modus (blaue Kurve), einmal mit RMS-Detektor im MAXHOLD-Modus (rote Kurve) und einmal mit RMS-Detektor und Zeitmittelung über 3 Sekunden. Die MAXHOLD bzw. Mittelungsfunktion bedingt, dass im dargestellten Messergebnis alle 3 Bänder in gleichem Maß aufscheinen, obwohl tatsächlich zu jedem Zeitpunkt immer nur in einem der Bänder gesendet wird.

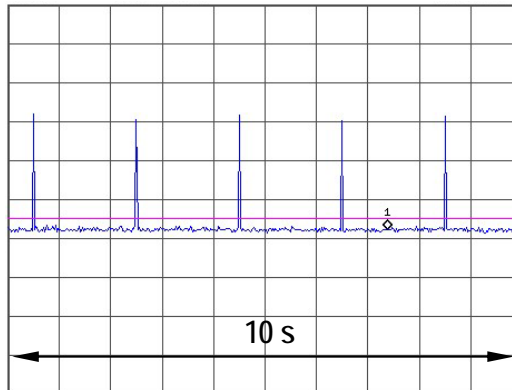


Abbildung 6.8: Aussendung des Beacon Signals im Ruhezustand (d.h. ohne Datenübertragung vom USB-Stick zum Computer)

Aus dem Vergleich von blauer und roter Kurve kann leicht abgelesen werden, dass die Messung mit PEAK-Detektor zu systematischen Überbewertungen von mehr als 10-15 dB führt. Der Vergleich von roter und grüner Kurve zeigt das Verhältnis von Maximalimmission und mittlerer Immission, das im vorliegenden Fall einer durchgehenden Datenübertragung während des Beobachtungszeitraumes ca. 5 dB (ca. Faktor 3,2 hinsichtlich der Leistung) beträgt. Dieses Verhältnis von Maximalimmission zu mittlerer Immission kann auch schon aus den Zeitverläufen in Abbildung 6.7 abgeschätzt werden. Für andere Datenverkehrszustände kann dieses Verhältnis natürlich vom genannten Wert abweichen. Beispielsweise führt eine Verdichtung des Datenverkehrs (z.B. Übertragung von mehrere Datenquellen gleichzeitig) zu einer Annäherung dieses Verhältnisses an 1. Umgekehrt werden Unterbrechungen der Datenübertragung, bzw. die Übertragung von nur geringen Datenmengen zu einer drastischen Verringerung des Zeitmittelwertes der Immissionen führen.

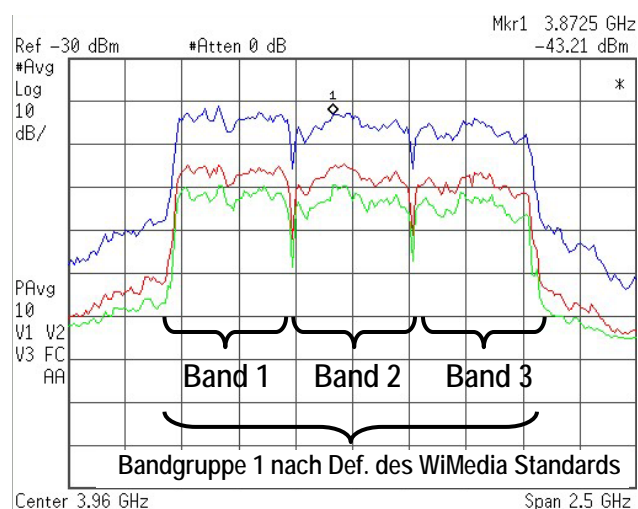


Abbildung 6.9: Messung im Frequenzbereich am HF-Ausgang des Belkin Cable-Free USB (UWB) Hub während einer Datenübertragung mit Time Frequency Code TFC1. Vergleich von Messungen mit PEAK-Detektor im MAXHOLD Modus (blaue Kurve), RMS-Detektor im MAXHOLD Modus und RMS-Detektor mit Mittelungsfunktion (Mittelung über 3 s)

In Abbildung 6.10 sind die Ergebnisse der Messungen der zeitgemittelten (3 s) HF-Ausgangsleistung für die 5 unterschiedlichen, beim untersuchten Belkin Cable-Free USB-Hub möglichen Time Frequency Codes TFC1, TFC2, TFC5, TFC6 und TFC7 dargestellt. Die Messungen wurden wieder während einer Datenübertragung vom USB-Stick (Datenquelle) zum Computer durchgeführt. Auffallend ist dabei, dass bei Übertragung mit TFC 1 und TFC 2 die mittlere Sendeleistung ca. 8 dB höher ist, als bei Übertragung mit TFC 5, TFC 6 und TFC 7 (vgl. Band Power Werte, jeweils rechts oben in den Teilbildern von Abbildung 6.10). Dies könnte durch den Messaufbau bedingt sein, bei dem eine der beiden Antennen des Gerätes entfernt wurde, um den Leistungsmesser bzw. den Spektrumanalysator an der entsprechenden Antennenbuchse anzuschließen (vgl. Abbildung 6.6). Für die folgenden Referenzmessungen (Relativmessungen), spielt diese Tatsache weiters keine Rolle.

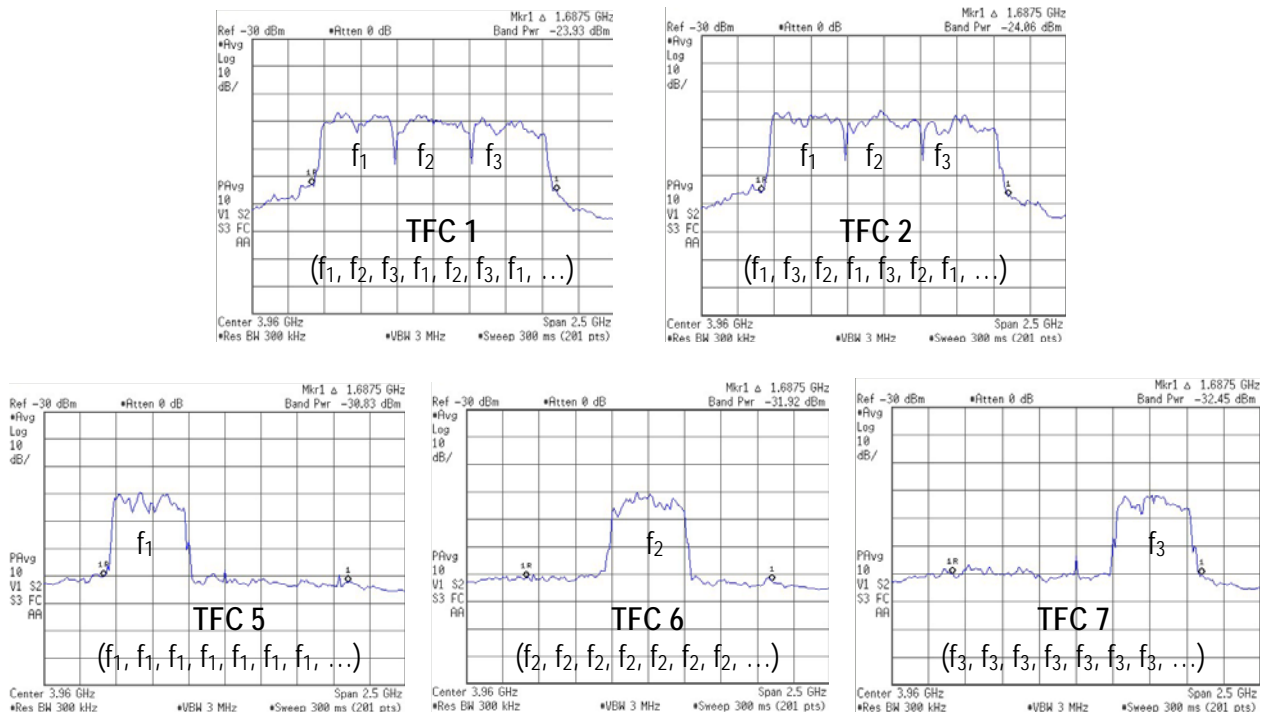


Abbildung 6.10: Messungen der zeitgemittelten (3 s) HF-Ausgangsleistung für die 5 unterschiedlichen, beim untersuchten Belkin Cable-Free USB-Hub möglichen Time Frequency Codes TFC1, TFC2, TFC5, TFC6 und TFC7.

Optimierung der Messparameter

Zur Ermittlung der optimalen Messparameter für Immissionsmessungen in den HF-Feldern von MB-OFDM-UWB Geräten wurden Referenzmessungen gemäß Abbildung 6.11 durchgeführt. Der mit dem Leistungsmesser ermittelte Wert diente dabei als Referenzwert (thermischer Messkopf liefert zuverlässig den wahren Effektivwert).

Für die Messungen wurde wieder eine Datenübertragung vom USB-Stick zum Computer durchgeführt, wobei Time Frequency Code TFC 6 verwendet wurde.

Die Messungen mit Spektrumanalysator wurden grundsätzlich mit RMS-Detektor und angemessener Sweep time durchgeführt. Auflösebandbreite (RBW) und Videobandbreite (VBW) wurden in sinnvollen Grenzen variiert und die damit erhaltenen Messwerte (Band Power Messungen) mit dem Referenzwert verglichen.

Der mit dem Leistungsmesser ermittelte Referenzwert ergab sich zu -31,8 dBm mit einer Schwankungsbreite von $\pm 0,12$ dBm in einem Beobachtungszeitraum von 10 Sekunden.

Wie Tabelle 6.3 zeigt, sind mit geeigneten Einstellungen am Spektrumanalysator grundsätzlich sehr präzise Messungen möglich. Im Zuge von Immissionsmessungen in der Praxis wird daher der in Zusammenhang mit dem Spektrumanalysator anzusetzende

Beitrag zur Gesamt-Messunsicherheit gegenüber den anderen Unsicherheitsquellen (Schwankungen des Datenverkehrsaufkommens, Isotropie der Messantenne, usw.) vernachlässigt werden können.

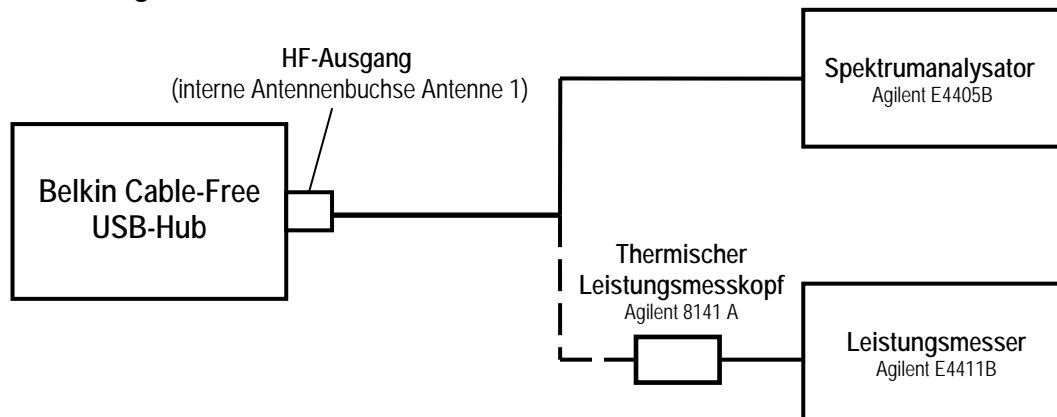


Abbildung 6.11: Schema der durchgeführten Referenzmessungen mit dem Belkin Cable-Free USB Hub. Die mittlere HF-Ausgangsleistung wurde alternativ mit Spektrumanalysator oder thermischem Leistungsmesskopf bestimmt.

Gesamtleistung (Band Power) im Übertragungskanal (3 s Mittelwert, Beobachtungszeitraum 10 s)					
Referenzwert $-31,8 \pm 0,12$ dBm					
Agilent E4405B		RBW			
		100 kHz	300 kHz	1 MHz	3 MHz
VBW	300 kHz	$-31,95 \pm 0,3$ dBm	-	-	-
	1 MHz	$-31,90 \pm 0,3$ dBm	$-31,85 \pm 0,3$ dBm	-	-
	3 MHz	$-31,78 \pm 0,3$ dBm	$-31,81 \pm 0,3$ dBm	$-32,70 \pm 0,2$ dBm	$-33,60 \pm 0,1$ dBm

Tabelle 6.3: Ergebnis der Referenzmessungen mit unterschiedlichen Kombinationen von Auflösbandbreiten (RBW) und Videobandbreiten (VBW)

Zusammenfassend können daher die folgenden Spektrumanalysator-Einstellungen für Immissionsmessungen in den Feldern von MB-OFDM-UWB-Geräten empfohlen werden:

Messung der mittleren Immissionen:

- RMS-Detektor
- Sweep Time >100 ms (bei 401 Frequenzpunkten)
- VBW so hoch wie möglich (üblicherweise 3 MHz)
- RBW mindestens Faktor 10 unter VBW
- Band Power Messungen über gesamten UWB-Frequenzbereich (lt. Gerätespez.)
- Mittelung der Band Power Messungen über gewünschtes Zeitintervall

Messung der Maximal- Immissionen:

- RMS-Detektor
- Sweep Time 15 ms (bei 401 Frequenzpunkten)
- VBW so hoch wie möglich (üblicherweise 3 MHz)
- RBW mindestens Faktor 10 unter VBW
- MAXHOLD
- Korrektur des maximal gemessenen Wertes entsprechend dem Verhältnis von Signalbandbreite (z.B. ca. 500 MHz bei WiMedia-Gerät) zu äquivalenter Rauschbandbreite⁶ des Spektrumanalysators

⁶ Die äquivalente Rauschbandbreite des Spektrumanalysators wird aus der Auflösbandbreite RBW multipliziert mit einem Korrekturfaktor für die Form des ZF-Filters (in den Spezifikationen des Spektrumanalysators angegeben) berechnet. Dieser Korrekturfaktor liegt für üblicherweise eingesetzte ZF-Filter zwischen 1,065 und 1,129.

Die relativ geringe Sweep Time zur Erfassung der Maximalimmissionen bei MB-OFDM Geräten ist aufgrund des RMS-Detektors notwendig [40]. 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.

Stellt der Spektrumanalysator keine Möglichkeiten für Band Power Messungen zur Verfügung, besteht auch die Möglichkeit die mittleren Immissionen aus den Maximal-Immissionswerten und nachträglicher Gewichtung mit dem effektiven Duty Cycle⁷ des Immissionssignals abzuschätzen. Die Abschätzung des effektiven Duty Cycles erfolgt im Zero-Span Modus des Spektrumanalysators. Detektor Typ, RBW, VBW sind dabei relativ unkritische Größen, obwohl bei Messungen sehr kleiner Signalpegel (nur knapp über dem Rauschen, wie für UWB-Signale zu erwarten) der PEAK-Detektor am sinnvollsten erscheint. Soweit sinnvoll und machbar können Trigger-Funktionen, oder aber auch einfach Snapshots der Anzeige verwendet werden. Keinesfalls darf zur Bestimmung des effektiven Duty Cycles die MAXHOLD Funktion aktiviert sein. Die Sweep Time ist schrittweise zu verkleinern/vergrößern, so dass die Abschätzung des effektiven Duty Cycles über sinnvolle Beobachtungszeiträume möglich ist. Zu beachten ist dabei allerdings, dass die Abschätzung des effektiven Duty Cycles auf diese Art nur bei den Frequency Codes TFC5, TFC6 und TFC7 in jeder Bandgruppe erfolgen kann, da nur in diesen Fällen sich die Sendefrequenz nicht ändert. Bei allen anderen Time Frequency Codes ist zu bedenken, dass sich die Sendefrequenz in regelmäßigen Abständen innerhalb der Bandgruppe ändert, d.h., bei einer Messung im Zero Span Mode, auf genau einer (Mitten)frequenz innerhalb der Bandgruppe, wird nur etwa ein Drittel aller tatsächlich abgestrahlter HF-Bursts sichtbar sein.

Typische Immissionswerte

Nach den oben angeführten systematischen Messungen wurde schließlich versucht die UWB-Immissionen in der Umgebung eines Computer-Arbeitsplatzes an dem der Belkin Cable-Free USB Hub verwendet wurde zu messen.

Zur Aufrechterhaltung einer kontinuierlichen Datenübertragung während der Messungen wurde wieder eine große Datei von einer am UWB-Hub angeschlossenen Datenquelle zum Computer übertragen.

Die Messungen erfolgten mittels Spektrumanalysator mit den oben angeführten Messparametern, wobei die 3 folgenden unterschiedlichen Antennentypen verwendet wurden:

Messantenne 1 [41]: Precision Omnidirectional Dipole POD16 (1-6 GHz),
Hersteller: Austrian Research Centers GmbH-ARC
Antennenfaktor im Messfrequenzbereich (3,1 - 4,8 GHz): ca. 43-48 dB/m

Messantenne 2 [42]: Log. Per. Antenne SAS 200/518 (1-18 GHz),
Hersteller: Rohde und Schwarz GmbH
Antennenfaktor im Messfrequenzbereich (3,1 - 4,8 GHz): 33-37 dB/m

⁷ Unter dem effektiven Duty Cycle wird in diesem Zusammenhang das Verhältnis der Summe aller Zeitintervalle in denen HF-Leistung innerhalb der Beobachtungsdauer abgestrahlt wird zur Beobachtungsdauer verstanden.

Messantenne 3 [43]: Doppelsteghornantenne Model 3115 (1-18 GHz),
 Hersteller: EMCO
 Antennenfaktor im Messfrequenzbereich (3,1 - 4,8 GHz): 31-34 dB/m

Messungen in 0,5 m und 1 m Abstand zum Gerät wurden durchgeführt, wobei isotrop gemessen wurde (12 Einzelmessungen mit Log.Per.- bzw. Horn-Antenne, 3 Einzelmessungen mit POD-Antenne). Tabelle 6.4 fasst die resultierenden Messergebnisse zusammen (alle Messwerte bezüglich Auflösebandbreite, Antennenfaktor und Kabelverluste bereits korrigiert).

	Distanz: 1m				Distanz 0,5 m			
	Mittlere Immission (Band Power Messung)		Max. Immission (RMS-Det., MAXHOLD)		Mittlere Immission (Band Power Messung)		Max. Immission (RMS-Det., MAXHOLD)	
	E [V/m]	S [mW/m ²]	E [V/m]	S [mW/m ²]	E [V/m]	S [mW/m ²]	E [V/m]	S [mW/m ²]
POD-Antenne	-	-	-	-	0,026	0,00186	0,046	0,00561
Log.Per.Antenne	0,011	0,00035	0,021	0,00117	0,030	0,00232	0,053	0,00745
Horn-Antenne	0,010	0,00027	0,018	0,00086	0,023	0,00139	0,040	0,00424

Tabelle 6.4: Ergebnisse der Immissionsmessungen in 0,5 m und 1 m Abstand zum Belkin-Cable-Free-USB Hub

Die mit den unterschiedlichen Messantennen erfassten Messwerte zeigen gute Übereinstimmung. Bei der Messung mit der POD-Antenne lagen, aufgrund des im Vergleich zur Log.Per.- und Horn-Antenne um ca. 10-12 dB höheren Antennenfaktors die Immissionen in 1 m Entfernung zur Quelle bereits unterhalb der Nachweisgrenze. Diese Tatsache bestätigt die in Kapitel 6.2 angestellten theoretischen Überlegungen.

Für die Praxis sind daher, im Sinne einer Maximierung der Empfindlichkeit, direktive Antennen mit geringeren Antennenfaktoren zu bevorzugen. Aufgrund der ohnehin extrem geringen Immissionen wird es zur Abschätzung der Größenordnung der Feldstärken bzw. Leistungsflussdichten ausreichen ein räumliches Maximum mit der in [44] beschriebenen Schwenkmethode zu ermitteln und auf eine räumliche Mittelung der Immissionen zu verzichten. Somit kann auf eine echte isotrope Messung und den damit verbundenen höheren Messaufwand bei Verwendung direkter Antennen (theoretisch 12 Einzelmessungen statt nur 3 Einzelmessungen mit bikonischer Antenne) verzichtet werden.

6.3.2 Messungen an einer Impuls-UWB-Quelle

Spezifikationen des untersuchten Gerätes

Für die Messungen wurde das *PulsON P210 Reference Design Kit* der Firma Time Domain, Inc. verwendet. Das aus 2 UWB-Sendeempfängern bestehende Set ermöglicht unter anderem den Austausch von Daten mit definierbaren Übertragungsraten, basierend auf einer „echten“ Impuls-UWB Funktechnik. Die Konfiguration der Geräte erfolgt über die mitgelieferte Software. Die Funkschnittstelle der Geräte ist konform zur 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 µW). Abbildung 6.12 zeigt die beiden Sendeempfänger.



Abbildung 6.12: PulsON P210 Reference Design Kit

Untersuchungen zu den emittierten Signalformen

Um das Zeitverhalten der emittierten HF-Signale des Gerätes zu untersuchen wurden zunächst Messungen kabelgebunden, d.h. direkt am Antennenausgang des als Sender konfigurierten Gerätes durchgeführt (Abbildung 6.13). Während aller im Folgenden beschriebenen Messungen wurden kontinuierlich pseudozufällige Datenfolgen (Datenrate 9.6 MBit/s) gesendet um die mittlere abgestrahlte HF-Leistung konstant auf dem Maximalniveau zu halten.

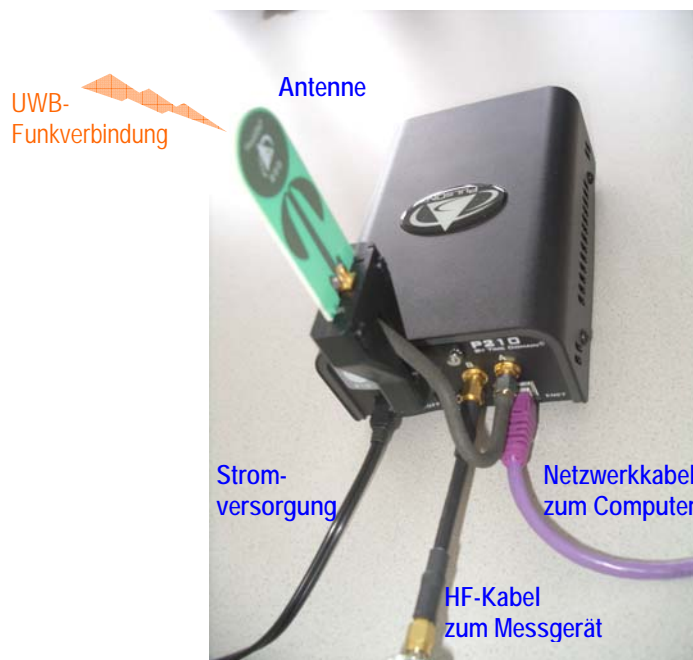


Abbildung 6.13: Messungen am Antennenausgang des PulsON P210 UWB-Sendeempfängers

Die Zeitbereichsmessungen wurden mittels eines Digital-Speicheroszilloskops mit 7 GHz Bandbreite (Tektronix TDS7704B) durchgeführt. Abbildung 6.14 zeigt den Zeitverlauf des Sendesignals in schrittweise verfeinerter zeitlicher Auflösung. Die Übertragung der Daten erfolgt durch einzelne ca. 15 ns lange Impulse mit einem mittleren zeitlichen Abstand von ca. 100 ns. Weiters ist zu erkennen, dass der Impulsübertragung ein Paket orientiertes Übertragungsprotokoll überlagert ist (Empfangen von Acknowledge-Paketen in den Sendelücken). Da die Sendeantenne beim Impuls-UWB zumeist bewusst als letztes impulsformendes Element eingesetzt wird und der am Empfangsort eintreffende Impuls im Allgemeinen durch Mehrwegeausbreitung verzerrt ist, entspricht die direkt am Ausgang (d.h. noch vor der Sendeantenne gemessene) Impulsform im Allgemeinen nicht jener, die als Immission im Sinne des Zeitverlauf der elektrischen Feldstärke in der Umgebung des UWB-Senders auftreten wird. Abbildung 6.15 zeigt den Zeitverlauf der UWB-Immissionen, wie sie in ca. 20 cm Abstand zur Sendeantenne mittels einer Breitband-Hornantenne und Digital-Speicheroszilloskop gemessen werden konnten.

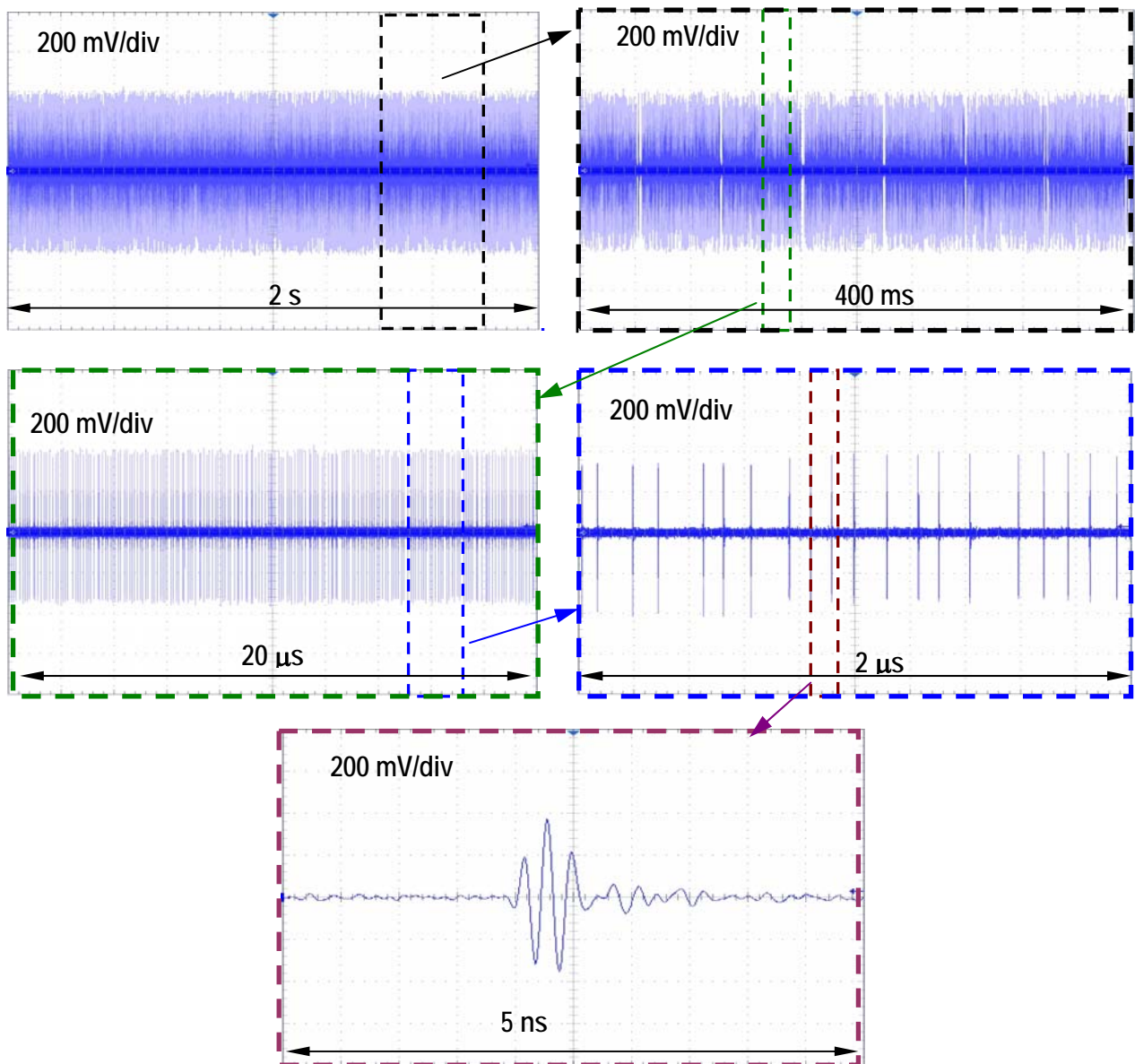


Abbildung 6.14: Zeitverlauf des Sendesignals am Ausgang (Anschlussport der Sendeantenne) des PulsON P210, gemessen mit einem Digital Speicheroszilloskop

Im hier vorliegenden speziellen Fall ist der Unterschied zwischen der am Sendeantenneneingang anliegenden Quellensignalform (Abbildung 6.14, unten) und der Signalform am Ausgang der Messantenne relativ gering (Mehrwegeausbreitung vernachlässigbar, weil in reflexionsarmer Umgebung in unmittelbarer Nähe zur Sendeantenne gemessen wurde).

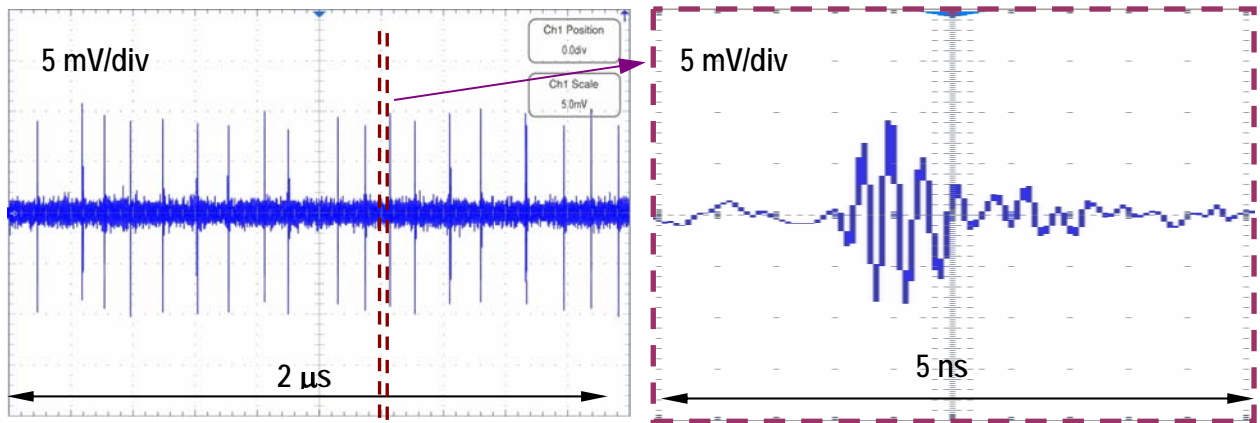


Abbildung 6.15: Zeitverlauf der UWB-Immissionen, gemessen mit Breitband-Hornantenne und Digital Speicheroszilloskop in ca. 20 cm Abstand zur UWB-Sendeantenne

Weiters bestätigen diese Messungen die bereits in Kapitel 6.2 auf Basis theoretischer Überlegungen attestierten Beschränkungen von Oszilloskopen für UWB-Immissionsmessungen in der Praxis. Selbst bei einem Abstand von nur 20 cm sind die vom UWB-Gerät verursachten Immissionen mit dem Oszilloskop gerade noch erfassbar. (vgl. Signal-Rauschabstand in Abbildung 6.15, rechts).

Zum Vergleich mit den in Abbildung 6.14 dargestellten Ergebnissen der Zeitbereichsmessungen mittels Digital-Speicheroszilloskop ist in Abbildung 6.16 das Ergebnis einer Zero Span Messung mit Spektrumanalysator (Agilent E4405B) dargestellt (Amplituden nur qualitativ). Gemessen wurde, wie im Fall der Messungen mit dem Oszilloskop, direkt am Ausgang (Antennenanschlussbuchse) des UWB-Sendeempfängers. Aufgrund der im Vergleich zum Oszilloskop nach unten stark begrenzten zeitlichen Auflösung, können hier zwar noch die Zeitverhältnisse bezüglich der Impulspaketlängen (vgl. Abbildung 6.14 erste Reihe rechts), aber natürlich nicht mehr Zeitintervalle in der Größenordnung der Einzelimpulsängen dargestellt werden. Eine korrekte Darstellung der Einzelimpulse wäre aufgrund der im Vergleich zur Impuls-Bandbreite viel zu geringen Auflösebandbreite des Spektrumanalysators ohnehin nicht möglich.

Messungen der mittleren Immissionen mit dem Spektrumanalysator müssen natürlich auch im Fall von Impuls-basiertem UWB mit RMS-Detektor durchgeführt werden, um systematische Überbewertungen, wie z.B., bei Verwendung eines PEAK-Detektors, zu vermeiden. Abbildung 6.17 zeigt dies wieder anschaulich anhand eines Vergleichs von Messungen mit PEAK-Detektor im MAXHOLD Modus (blaue Kurve), RMS-Detektor im MAXHOLD-Modus (rote Kurve) und zeitgemittelten Messungen mit RMS-Detektor (grüne Kurve). Die Messungen wurden wieder direkt (kabelgebunden) am Antennenanschluss des UWB-Sendeempfängers während kontinuierlichem Senden von pseudozufälligen Daten durchgeführt. Aufgrund des großen Verhältnisses von Impulsdauer und Impulswiederholzeit führen Messungen mit PEAK-Detektor wieder zu großen

Überbewertungen (ca. 10 dB) gegenüber den tatsächlich vorhandenen Immissions-Effektivwerten. PEAK-Detektor Messungen in Kombination mit der MAXHOLD-Funktion können jedoch (nach entsprechender Bandbreitenkorrektur) zur Abschätzung der Impulsamplitude verwendet werden. Die Sweep Time sollte dabei so groß gewählt werden, dass die Verweilzeit des Detektors pro Frequenzpunkt größer als die Impulsdauer ist.

Der Unterschied zwischen MAXHOLD-Messungen und zeitgemittelten Messungen mit RMS-Detektor ist in diesem speziellen Fall sehr gering. Dies ist aber natürlich kein Spezifikum des Impuls-UWB, sondern ist darauf zurückzuführen, dass der Sendeempfänger für die Messungen manuell für kontinuierliches Senden konfiguriert wurde. Da das untersuchte Gerät gewissermaßen „stand alone“ betrieben wird, d.h., keinerlei übergeordneter Netzwerkstruktur (und deren Timing) unterliegt, ergeben sich in diesem Fall auch keine nennenswerten Schwankungen des effektiven Duty Cycles, was wiederum der Grund für die nahezu Übereinstimmung zwischen RMS-MAXHOLD und zeitgemittelter RMS-Messung ist.

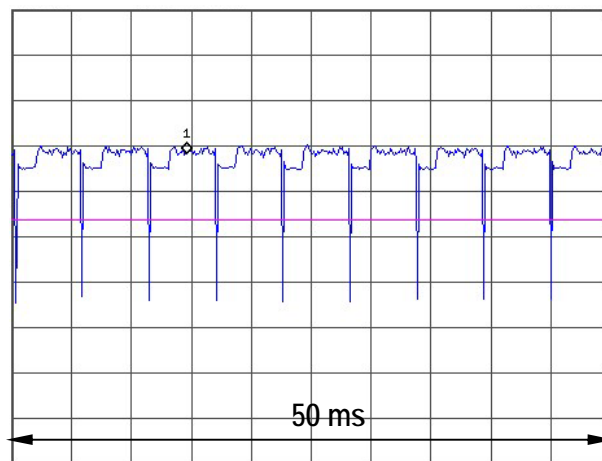


Abbildung 6.16: Zeitverlauf des Sendesignals am Ausgang (Anschlussport der Sendeantenne) des PulsON P210, gemessen mit dem Spektrumanalysator.

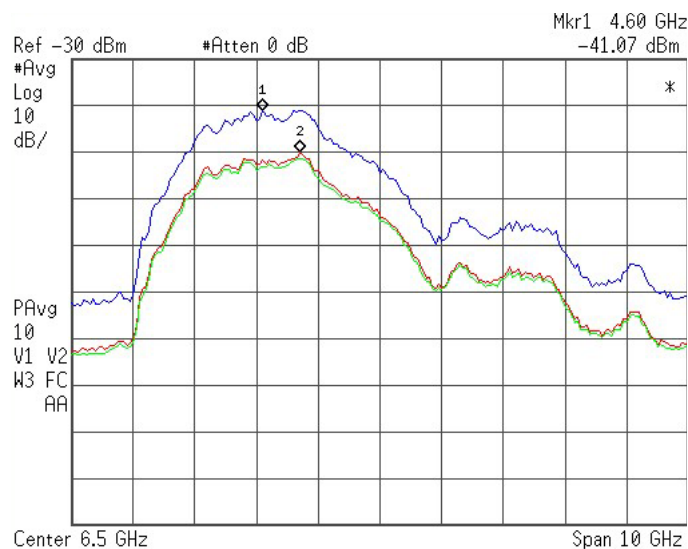


Abbildung 6.17: Messung im Frequenzbereich am HF-Ausgang des PulsON P210 UWB-Sendeempfängers während kontinuierlichem Senden von pseudozufälligen Daten. Vergleich von Messungen mit PEAK-Detektor im MAXHOLD Modus (blaue Kurve), RMS-Detektor im MAXHOLD Modus (rote Kurve) und RMS-Detektor mit Mittelungsfunktion (grüne Kurve, Mittelung über 3 Sekunden)

Optimierung der Messparameter

Zur Ermittlung der optimalen Messparameter für Immissionsmessungen in den HF-Feldern von Impuls-UWB Geräten wurden Referenzmessungen gemäß Abbildung 6.18 durchgeführt. Der mit dem Leistungsmesser ermittelte Wert diente dabei als Referenzwert (thermischer Messkopf liefert zuverlässig den wahren Effektivwert).

Für die Messungen wurde der PulsON P210 UWB-Sendeempfänger wieder auf kontinuierliches Senden von Daten konfiguriert.

Die Messungen mit Spektrumanalysator wurden grundsätzlich mit RMS-Detektor und ausreichender Sweep time von 300 ms durchgeführt. Auflösebandbreite (RBW) und Videobandbreite (VBW) wurden in sinnvollen Grenzen variiert und die damit erhaltenen Messwerte (Band Power Messungen) mit dem Referenzwert verglichen.

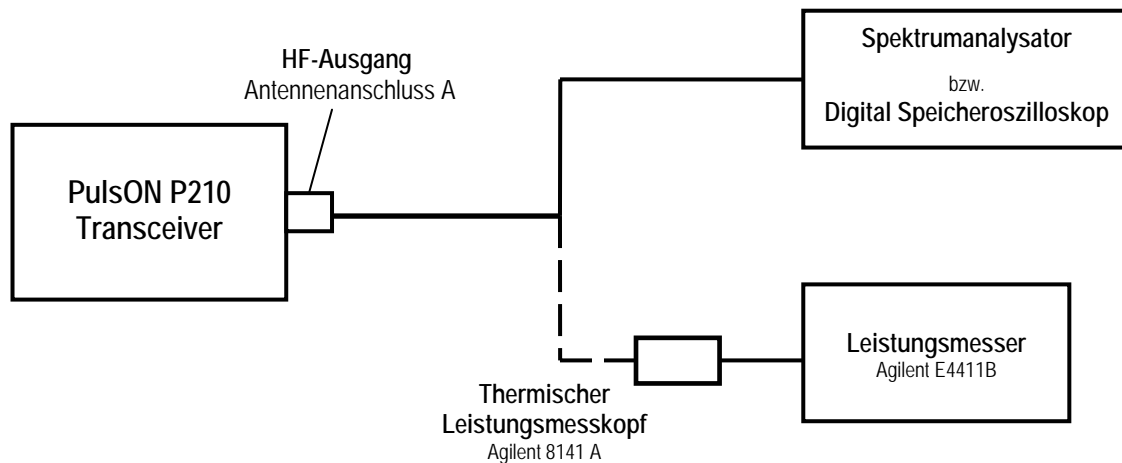


Abbildung 6.18: Schema der durchgeführten Referenzmessungen mit dem PulsON P210 UWB-Sendeempfänger. Die mittlere HF-Ausgangsleistung wurde alternativ mit Spektrumanalysator oder thermischem Leistungsmesskopf bestimmt.

Der mit dem Leistungsmesser ermittelte Referenzwert ergab sich zu $-14,6 \text{ dBm}$ mit einer Schwankungsbreite von $\pm 0,1 \text{ dBm}$ in einem Beobachtungszeitraum von 10 Sekunden.

Gesamtleistung (Band Power) im Übertragungskanal (3 s Mittelwert, Beobachtungszeitraum 10 s)					
Referenzwert $-14,6 \pm 0,10 \text{ dBm}$					
Agilent E4405B		RBW			
		100 kHz	300 kHz	1 MHz	3 MHz
VBW	300 kHz	$-15.03 \pm 0,1 \text{ dBm}$	-	-	-
	1 MHz	$-14.90 \pm 0,1 \text{ dBm}$	$-15.12 \pm 0,1 \text{ dBm}$	-	-
	3 MHz	$-14.56 \pm 0,1 \text{ dBm}$	$-14.64 \pm 0,1 \text{ dBm}$	$-15.73 \pm 0,1 \text{ dBm}$	$-16,51 \pm 0,1 \text{ dBm}$

Tabelle 6.5: Ergebnis der Referenzmessungen mit dem PulsON P210 Sendeempfänger bei unterschiedlichen Kombinationen von Auflösebandbreiten (RBW) und Videobandbreiten (VBW)

Wie Tabelle 6.5 zeigt, sind auch bei Impuls-UWB-Immissionen mit geeigneten Einstellungen am Spektrumanalysator grundsätzlich sehr präzise Messungen möglich. Im Zuge von Immissionsmessungen in der Praxis wird daher der in Zusammenhang mit dem Spektrumanalysator anzusetzende Beitrag zur Gesamt-Messunsicherheit gegenüber den anderen Unsicherheitsquellen (Schwankungen des Datenverkehrsaufkommens, Isotropie der Messantenne, usw.) vernachlässigt werden können.

Zusammenfassend können, wie bei MB-OFDM-UWB-Signalen auch für Impuls-UWB-Signale die folgenden Spektrumanalysator-Einstellungen für Immissionsmessungen empfohlen werden:

Messung der mittleren Immissionen:

- RMS-Detektor
- Sweep Time >100 ms (bei 401 Frequenzpunkten)
- VBW so hoch wie möglich (üblicherweise 3 MHz)
- RBW mindestens Faktor 10 unter VBW
- Band Power Messungen über gesamten UWB-Frequenzbereich (lt. Gerätespez.)
- Mittelung der Band Power Messungen über gewünschtes Zeitintervall

Abschätzung der Impulsamplitude:

- PEAK-Detektor
- Sweep Time >10 ms (bei 401 Frequenzpunkten)
- VBW so hoch wie möglich (üblicherweise 3 MHz)
- RBW so hoch wie möglich
- MAXHOLD
- Korrektur des maximal gemessenen Wertes entsprechend dem Verhältnis von Signalbandbreite zu äquivalenter Rauschbandbreite⁸ des Spektrumanalysators

Stellt der Spektrumanalysator keine Möglichkeiten für Band Power Messungen zur Verfügung, ist bei Impuls-UWB-Quellen die Abschätzung der mittleren Immissionen nicht oder zumeist nur mit großer Unsicherheit möglich, da die Ermittlung der tatsächlichen Impulsform bzw. Impulsdauer mit Spektrumanalysatoren zumeist nicht oder nur in sehr grober Näherung möglich sein wird. Demzufolge wird auch die Abschätzung des effektiven Duty Cycles nicht oder nur mit großer Unsicherheit behaftet möglich sein. Allein mit Spektrumanalysator ohne Band Power Funktion wird daher oftmals nur die Ermittlung der Maximal-Immissionen mittels MAXHOLD-Funktion möglich.

Im Zuge der Referenzmessung gemäß Abbildung 6.18 mit dem Digital-Speicheroszilloskop wurde der Zeitverlauf des Sendeimpulses aufgezeichnet und daraus die mittlere Leistung berechnet. Für Impulswiederholzeiten zwischen 80 ns und 120 ns ergaben sich dabei Werte zwischen -14,0 dBm und -15,3 dBm, was sehr gut (Abweichung < 20%) mit dem Referenzwert von -14,6 dBm übereinstimmt.

Typische Immissionswerte

Nach den oben angeführten systematischen Messungen wurde auch versucht die Immissionen in der Umgebung des PulsON P210 UWB-Sendeempfängers zu messen. Für den Zeitraum der Messungen wurde der PulsON P210 UWB-Sendeempfänger wieder auf kontinuierliches Senden von Daten konfiguriert.

Die Messungen erfolgten in 0,5 m und 1 m Distanz zur Quelle und wurden mittels Spektrumanalysator mit den oben angeführten Messparametern und den bereits in Kapitel 6.3.1 genannten Antennen durchgeführt. Immissionsmessungen mit Digital-Speicheroszilloskop wurden aufgrund der zu geringen Empfindlichkeit des Gerätes nicht durchgeführt (vgl. Kapitel 6.2.2 und Messergebnis in 20 cm Abstand in Abbildung 6.15).

⁸ Die äquivalente Rauschbandbreite des Spektrumanalysators wird aus der Auflösungsbreite RBW multipliziert mit einem Korrekturfaktor für die Form des ZF-Filters (in den Spezifikationen des Spektrumanalysators angegeben) berechnet. Dieser Korrekturfaktor liegt für üblicherweise eingesetzte ZF-Filter zwischen 1,065 und 1,129.

Die Messungen erfolgten wieder quasi-isotrop, d.h., 12 Einzelmessungen mit Log.Per.- bzw. Horn-Antenne und 3 Einzelmessungen mit POD-Antenne. Tabelle 6.6 fasst die resultierenden Messergebnisse zusammen (alle Messwerte bezüglich Auflösungsbreite, Antennenfaktor und Kabelverluste bereits korrigiert).

	Distanz: 1m				Distanz 0,5 m			
	Mittlere Immission (Band Power Messung)		Max. Immission (RMS-Det., MAXHOLD)		Mittlere Immission (Band Power Messung)		Max. Immission (RMS-Det., MAXHOLD)	
	E [V/m]	S [mW/m ²]	E [V/m]	S [mW/m ²]	E [V/m]	S [mW/m ²]	E [V/m]	S [mW/m ²]
POD-Antenne	0,0278	0,00205	0,0301	0,00240	0,0645	0,01104	0,0714	0,01353
Log.Per.Antenne	0,0311	0,00257	0,0348	0,00321	0,0736	0,01435	0,0840	0,01871
Horn-Antenne	0,0298	0,00235	0,0311	0,00256	0,0678	0,01219	0,0771	0,01576

Tabelle 6.6: Ergebnisse der Immissionsmessungen in 0,5 m und 1 m Abstand zum PulsON P210 UWB-Sendeempfänger

Die mit den unterschiedlichen Messantennen erfassten Messwerte zeigen gute Übereinstimmung.

Aufgrund der ohnehin extrem geringen Immissionen wird es zur Abschätzung der Größenordnung der maximalen Feldstärken bzw. Leistungsflussdichten ausreichen ein räumliches Maximum mit der in [44] beschriebenen Schwenkmethode zu ermitteln und auf eine räumliche Mittelung der Immissionen zu verzichten. Somit kann auf eine echte isotrope Messung und den damit verbundenen höheren Messaufwand bei Verwendung direkter Antennen (theoretisch 12 Einzelmessungen statt nur 3 Einzelmessungen mit bikonischer Antenne) verzichtet werden.

7 NUMERISCHE VERFAHREN FÜR DIE EXPOSITIONSERFASSUNG IN UWB-FELDERN

Im Gegensatz zu Expositionssituationen in den Feldern von schmalbandigen HF-Quellen, stehen bei UWB gegenwärtig nicht einmal vereinfachte messtechnische Methoden für die SAR-Bestimmung zu Verfügung. Der Hauptgrund dafür sind die frequenzabhängigen (dispersiven) Gewebeeigenschaften. Einerseits existieren derzeit noch keine Gewebe simulierenden Flüssigkeiten, welche die dispersiven Gewebeparameter adäquat nachbilden. Andererseits ist der Kalibrierfaktor von SAR-Messsonden prinzipiell abhängig von der Frequenz und von der Gewebe simulierenden Flüssigkeit in der gemessen wird, was eine genaue SAR-Messung auf Basis der gegenwärtigen SAR-Messtechnik prinzipiell unmöglich macht (siehe Kapitel 6.2.4). Eine quantitative Analyse der zu erwartenden (frequenz- und bandbreitenabhängigen) Ungenauigkeit von näherungsweise UWB-SAR-Messungen mit Gewebe simulierenden Flüssigkeiten und Sondenkalibrierfaktoren entsprechend der Mittenfrequenz liegt bisher nicht vor.

Die Bestimmung der gewebespezifischen Absorption bei Exposition in UWB-Feldern kann daher nur mittels numerischer Berechnungen erfolgen, wobei auch hier, aufgrund der spezifischen Eigenschaften der UWB-Signale modernste und leistungsfähige Algorithmen und Hardwareressourcen notwendig sind, um befriedigende Ergebnisse zu erzielen.

7.1 FDTD-Methode für UWB-Berechnungen

Für numerische Berechnungen bei Exposition in UWB-Feldern, bieten sich Zeitbereichsmethoden wie die FDTD-Methode schon allein aufgrund der Notwendigkeit der Anregung mit kurzen, speziell geformten Impulsen als die Methode der ersten Wahl an. Bisher veröffentlichte Arbeiten zu diesem Thema ([45]-[52]) basieren ausschließlich auf FDTD-Berechnungen.

Abgesehen von der Möglichkeit der Anregung mit beliebiger Signalform im Zeitbereich hat die stetige Weiterentwicklung der FDTD-Methode in den letzten Jahren dazu geführt, dass seit einigen Jahren auch effiziente Methoden verfügbar sind, um die dispersiven Gewebeeigenschaften im FDTD-Algorithmus zu berücksichtigen.

7.1.1 Implementierung dispersiver Gewebeparameter in FDTD

Die Frequenzabhängigkeit der dielektrischen Eigenschaften von Materialien wird heute in der Literatur durch unterschiedliche Dispersionsmodelle beschrieben. Die bekanntesten davon sind die Modelle nach *Debye*, *Cole Cole*, *Lorentz* und *Drude*, die die Frequenzabhängigkeit der komplexen Permittivität $\underline{\epsilon}(\omega)$ nach folgenden Gleichungen beschreiben (jeweils allgemeine Formulierung für ein n-poliges Modell):

$$\text{Debye:} \quad \underline{\epsilon}(\omega) = \epsilon_{\infty} + \sum_{n=1}^P \frac{(\epsilon_s - \epsilon_{\infty}) \cdot A_n}{1 + j\omega\tau_n} \quad (7.1)$$

$$\text{Cole Cole:} \quad \underline{\epsilon}(\omega) = \epsilon_{\infty} + \sum_{n=1}^P \frac{(\epsilon_s - \epsilon_{\infty}) \cdot A_n}{1 + (j\omega\tau_n)^{1-\alpha_n}} \quad (7.2)$$

$$\text{Lorentz:} \quad \underline{\varepsilon}(\omega) = \varepsilon_\infty + \sum_{n=1}^P \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \cdot A_n \cdot \omega^2}{\omega_n^2 + 2j\omega\tau_n - \omega^2} \quad (7.3)$$

$$\text{Drude:} \quad \underline{\varepsilon}(\omega) = \varepsilon_\infty - \sum_{n=1}^P \frac{\omega_n^2}{\omega^2 - j\omega\tau_n} \quad (7.4)$$

Die Größen A_n , τ_n und ω_n stehen in Gleichungen (7.1) bis (7.4) für die Polamplitude, die Relaxationszeitkonstante und die Kreisfrequenz des n-ten Pols. ε_s und ε_∞ sind die statische Permittivität (bei Frequenz=0 Hz) und der Grenzwert der Permittivität bei unendlich hohen Frequenzen.

Speziell für die Beschreibung biologischer Medien haben sich fast ausschließlich das *Debye-Modell* und das *Cole Cole-Modell* durchgesetzt, da mit ihnen die Nachbildung der Frequenzabhängigkeit biologischer Materialien sehr genau erfolgen kann. Das *Cole Cole-Modell* ist dabei dem *Debye-Modell* hinsichtlich der Nachbildung der (im Frequenzbereich) sehr breiten Dispersionsbereiche der meisten biologischen Gewebe etwas überlegen, so dass beispielsweise Gabriel et al. 1996 [36] ein 4-poliges *Cole Cole-Modell* für die Beschreibung der Gewebeparameter verwendeten.

Für die Implementierung der Dispersion in den FDTD-Algorithmus sind seit Anfang der 1990er Jahre unterschiedliche Methoden vorgeschlagen worden. Die bekanntesten unter ihnen sind unter den Namen *Recursive Convolution (RC)* [53], bzw. in verbesserter Form *Linear Piecewise Recursive Convolution (PLRC)* [54], *Auxiliary Differential Equation (ADE)* [55]-[57] und *Z-transformation* [58] in der Literatur beschrieben. Wirklich durchgesetzt haben sich jedoch in den letzten Jahren nur PLRC und ADE, da sich diese Methoden effizient (im Hinblick auf Rechenzeit und Speicherbedarf) in den FDTD-Algorithmus eingliedern lassen. Moderne, kommerziell erhältliche Simulationsplattformen greifen zumeist auf ADE zurück, weil sich diese Methode sehr vorteilhaft auch für die Behandlung nichtlinearer Materialeigenschaften verwenden lässt [59].

Die RC-Methode geht vom Zusammenhang zwischen elektrischer Flussdichte und elektrischer Feldstärke im Zeitbereich unter Verwendung der elektrischen Suszeptibilität ($\chi = \varepsilon_r - 1$) aus [59]:

$$\vec{D}(t) = \varepsilon_0 \varepsilon_\infty \vec{E}(t) + \varepsilon_0 \int_{\tau=0}^t \vec{E}(t-\tau) \chi(\tau) dt \quad (7.5)$$

Anschaulich gesprochen beschreibt dies den Sachverhalt, dass sich die einstellende resultierende elektrische Flussdichte aus einem unverzögerten (der elektrischen Feldstärke unendlich schnell folgenden) Anteil (erster Summand der rechten Seite in Gl. 7.5) und einem sich erst etwas, durch die spezifischen Materialeigenschaften verzögert einstellenden (phasenverschobenen) Anteil zusammensetzt (zweiter Summand der rechten Seite der Gl. 7.5). In rein mathematischer Sichtweise ergibt sich Gleichung 7.5 beim Überführen der bekannten Beziehung

$$\vec{D}(\omega) = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E}(\omega) = \varepsilon_0 (1 + \chi(\omega)) \vec{E}(\omega) = \varepsilon_0 \vec{E}(\omega) + \varepsilon_0 \chi(\omega) \vec{E}(\omega) \quad (7.6)$$

aus dem Frequenzbereich in den Zeitbereich, wobei die Eigenschaft der inversen Fourier-Transformation, dass der Multiplikation im Frequenzbereich die Faltung im Zeitbereich entspricht, berücksichtigt wird. Die Zeitbereichsdarstellung der elektrischen

Suszeptibilität wird dabei ebenfalls aus der etwas geläufigeren Frequenzbereichsdarstellung (ähnlich Gl. 7.1 – 7.4) gewonnen.

Das Faltungsintegral in Gleichung 7.5 lässt sich schließlich effizient in den FDTD-Algorithmus integrieren.

Bei der ADE Methode wird vom Ampere'schen Satz im Zeitbereich ausgegangen:

$$\nabla \times \vec{H}(t) = \sigma \vec{E}(t) + \varepsilon_0 \varepsilon_\infty \frac{d}{dt} \vec{E}(t) + \sum_{p=1}^P \vec{J}_p(t) \quad (7.7)$$

D.h., die resultierende Stromdichte setzt sich aus einem reinen Leitungsstromanteil (erster Summand in Gl. 7.7), einem sich unverzögert einstellenden Verschiebungsstromanteil (zweiter Summand in Gl. 7.7), und einem sich entsprechend den spezifischen Materialeigenschaften erst verzögert einstellenden (phasenverschobenen) Verschiebungsstromanteil (dritter Summand in Gl. 7.7) zusammen. Dieser letztgenannte Stromdichteanteil (Polarisierungsstromdichte) setzt sich bei mehrpoligen Dispersionsmodellen aus mehreren Einzelanteilen (Summenzeichen in Gl. 7.7) zusammen. Die weitere Analyse führt für jeden Summanden dieser Polarisierungsstromdichte auf eine zusätzliche Differentialgleichung (daher der Name ADE) der Form

$$\vec{J}_p(t) + \tau_p \frac{d}{dt} \vec{J}_p(t) = \varepsilon_0 A_p \frac{d}{dt} \vec{E}(t) \quad (7.8)$$

die leicht in den FDTD-Algorithmus implementiert werden kann (τ_p und A_p bezeichnen die Relaxationszeitkonstante und die Polamplitude des jeweiligen Dispersions-Poles, vgl. Gl. 7.1-7.4)

Eine detaillierte Beschreibung bzw. Ableitung des RC- und ADE-Verfahrens und die numerische Vorgehensweise bei der Implementierung in FDTD sind in [59] ausführlich beschrieben.

Erwähnenswert bleibt schließlich, dass sich das Dispersionsmodell nach Cole Cole numerisch im Hinblick auf die Rechenzeit und den Speicherbedarf nicht sehr effizient implementieren lässt, was dazu führt, dass in der Praxis für FDTD-Berechnungen heute hauptsächlich das Debye-Modell (vor allem für biologische Gewebe), teilweise auch das Lorentz- und Drude-Modell, jedoch nie das Cole Cole-Modell verwendet wird. Dies spielt jedoch üblicherweise nur eine untergeordnete Rolle, da biologische Gewebe in eingeschränkten Frequenzbereichen, im Rahmen vertretbarer Unsicherheitsgrenzen auch hineinreichend gut durch das Debye-Modell beschrieben werden können.

Die im Rahmen dieses Projekts verwendete Simulationsplattform SEMCAD X verwendet die ADE-Methode zur Implementierung dispersiver Medien [60].

7.2 UWB-Absorption in biologischen Geweben

Um die grundlegenden Charakteristika der Absorption von UWB-Strahlung zu untersuchen, wurden FDTD-Berechnungen mit einfachen planaren Gewebemodellen bei Befeldung mit einer ebenen Welle durchgeführt. Es wurde ein homogenes Modell (entsprechend Muskelgewebe) und ein geschichtetes Modell, bestehend aus Haut, Fett, Muskel, Knochen und „innerem Gewebe“ (entsprechend Niere) betrachtet. Um die Relevanz der dispersiven Gewebemodellierung zu verdeutlichen, wurde in beiden Fällen

jeweils einmal mit entsprechend frequenzabhängigen Gewebeparametern und einmal mit den (frequenzunabhängigen) Gewebeparametern der Mittenfrequenz gerechnet. Weiters wurde für beide Fälle ein Vergleich der UWB-Absorptionsverhältnisse mit der Leistungsabsorption bei harmonischer (sinusförmiger) Exposition (CW) angestellt.

Als UWB-Anregung wurde ein Gauß-förmiger Feldstärke-Impuls mit Amplitude 2,76 V/m und einer Mittelfrequenz von 6,85 GHz

$$\vec{E}(t) = 2,76 * e^{-\left(\frac{t-0,5ns}{0,1213ns}\right)^2} * \cos(2\pi * 6.85GHz * (t - 0,5ns)) \quad (7.9)$$

in Form einer ebenen Welle verwendet. Dieses Signal ist in Abbildung 7.1 im Zeitbereich und in Abbildung 7.2 im Frequenzbereich in Form der spektralen Dichte der Leistungsflussdichte S dargestellt. Die (-10 dB) Bandbreite des Signals beträgt ca. 5,6 GHz und die Amplitude ist so gewählt, dass sie, bei der gegebenen Signalform der maximalen Immission im Abstand von 25 cm zu einem FCC-konformen Gerät entspricht (spektrale Effizienz ca. 46%, d.h., Gesamtsendeleistung ca. 0,26 mW).

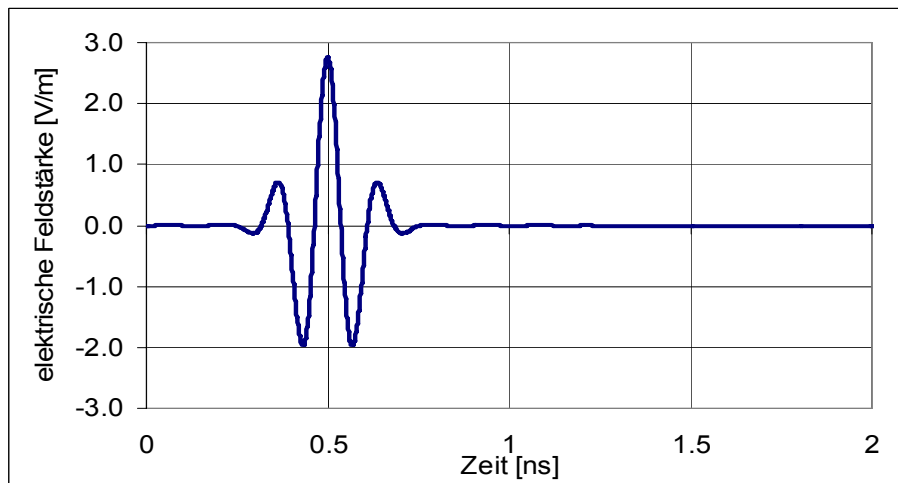


Abbildung 7.1: Zeitverlauf des für die folgenden FDTD-Berechnungen verwendeten UWB-Signals

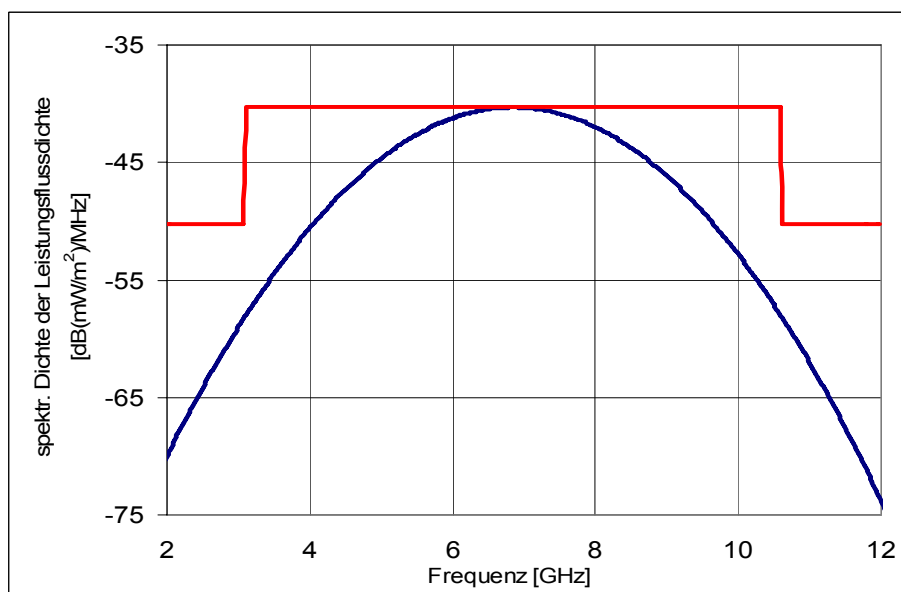


Abbildung 7.2: Spektrale Dichte der Leistungsflussdichte S in dB(mW/m²)/MHz des Signals in Abbildung 7.1. Rot eingezeichnet die entsprechende (auf Leistungsflussdichte in 0,25 m Abstand umgerechnete) Spektralmaske der FCC Regulierung.

7.2.1 Modell eines homogenen Gewebeblocks

Für die Untersuchung der Absorptionsverhältnisse in einem homogenen Medium wurde ein homogener Block entsprechend Muskelgewebe als Modell betrachtet (Abbildung 7.3). Die Abmessungen des Blocks wurden entsprechend groß gewählt, so dass er für die im Folgenden angestellten Überlegungen als gutes Modell eines homogenen unendlich großen Halbraumes aufgefasst werden kann.

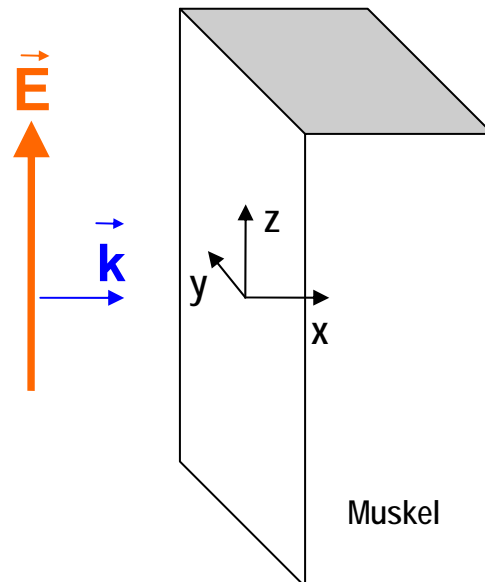


Abbildung 7.3: Schematische Darstellung des homogenen ebenen Modells

Die frequenzabhängigen Eigenschaften des Muskelgewebes wurden mittels eines 3-poligen Debye-Modells, mit den in Tabelle 7.1 zusammengefassten Parametern beschrieben (vgl. Gleichung 7-1).

	ϵ_s	ϵ_∞	σ_0	A_1	τ_1	A_2	τ_2	A_3	τ_3
	[1]	[1]	[S/m]	[1]	[s]	[1]	[s]	[1]	[s]
Muskel	95000	4,0	0,90	0,0005	$7,23 \cdot 10^{-12}$	0,07	$3,54 \cdot 10^{-7}$	12	0,0003181

Tabelle 7.1: Debye-Parameter für das untersuchte homogene Muskel-Modell in Abbildung 7.3

Abbildung 7.4 und Abbildung 7.5 zeigen einen Vergleich des verwendeten Debye-Modells (durchgezogene Linien) mit dem von Gabriel 1996 [36] verwendeten Cole Cole Modell (einzelne Symbole). Im interessierenden Frequenzbereich zeigt sich hinreichend gute Übereinstimmung (Abweichungen < 3%).

FDTD-Berechnungen wurden mit der Simulationsplattform SEMCAD X (Version 13.2) für eine seitlich einfallende ebene Welle gemäß Abbildung 7.3 durchgeführt. Für die Diskretisierung des Feldraumes wurde ein FDTD-Gitter mit variabler Schrittweite verwendet, wobei im Gewebeblock die maximale Schrittweite mit 0,4 mm (d.h. auf < 10% der minimalen, noch relevanten Wellenlänge) begrenzt wurde. Die Berechnung der resultierenden SA bzw. SAR aus den Zeitbereichs-Ergebnisdaten erfolgte in MATLAB, da gegenwärtig kommerziell verfügbare FDTD-Simulationsplattformen diesbezüglich (noch) keine Möglichkeiten bieten.

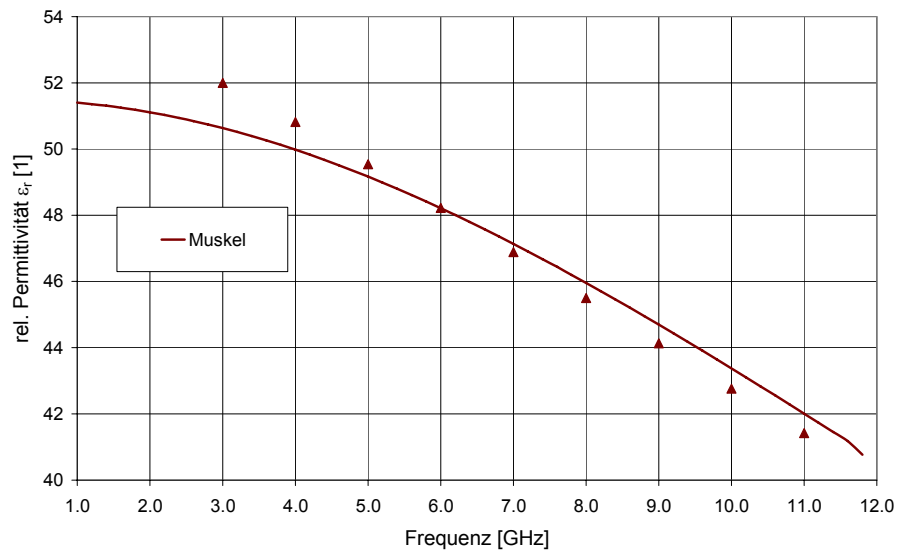


Abbildung 7.4: Verwendetes Debye-Dispersionsmodell (relative Permittivität ϵ_r) für Muskelgewebe im Vergleich zum Cole Cole Modell nach Gabriel 1996 [36]

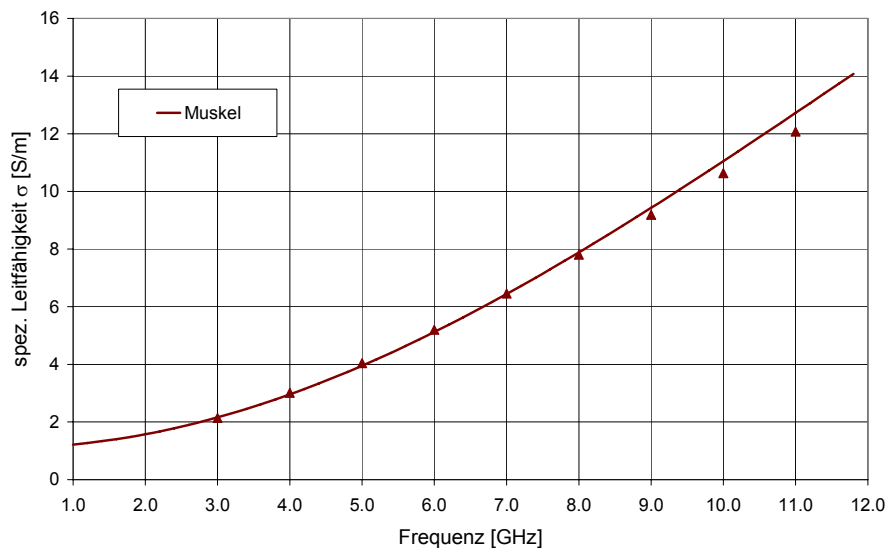


Abbildung 7.5: Verwendetes Debye-Dispersionsmodell (Leitfähigkeit σ) für Muskelgewebe im Vergleich zum Cole Cole Modell nach Gabriel 1996 [36]

Abbildung 7.6 zeigt zunächst spektrale Dichtefunktionen der spezifischen Absorption SA an fünf unterschiedlichen Punkten entlang einer Geraden normal zur Modelloberfläche. Das linke Teilbild zeigt die Ergebnisse bei korrekter Berücksichtigung der dispersiven Gewebeparameter in der Berechnung, das rechte Teilbild die Ergebnisse bei Vernachlässigung der dispersiven Gewebeeigenschaften (frequenzunabhängige Gewebeeigenschaften bei der Mittenfrequenz). Der Abstand der betrachteten Punkte zur Modelloberfläche beträgt 1 mm (blaue Kurven), 3 mm (grüne Kurven), 5 mm (orange Kurven), 10 mm (violette Kurven) und 20 mm (rosa Kurven). Der Vergleich der beiden Teilbilder in Abbildung 7.6 macht deutlich, dass der korrekten Berücksichtigung der dispersiven Gewebeeigenschaften in dosimetrischen Berechnungen bei UWB-Befeldung große Bedeutung zukommt. Erst durch sie werden die physikalischen Tatsachen der hauptsächlich oberflächennahen Absorption der höheren Frequenzanteile und das tiefere Eindringen niederfrequenter Spektralanteile ins Gewebe im ganzen Ausmaß korrekt erfasst.

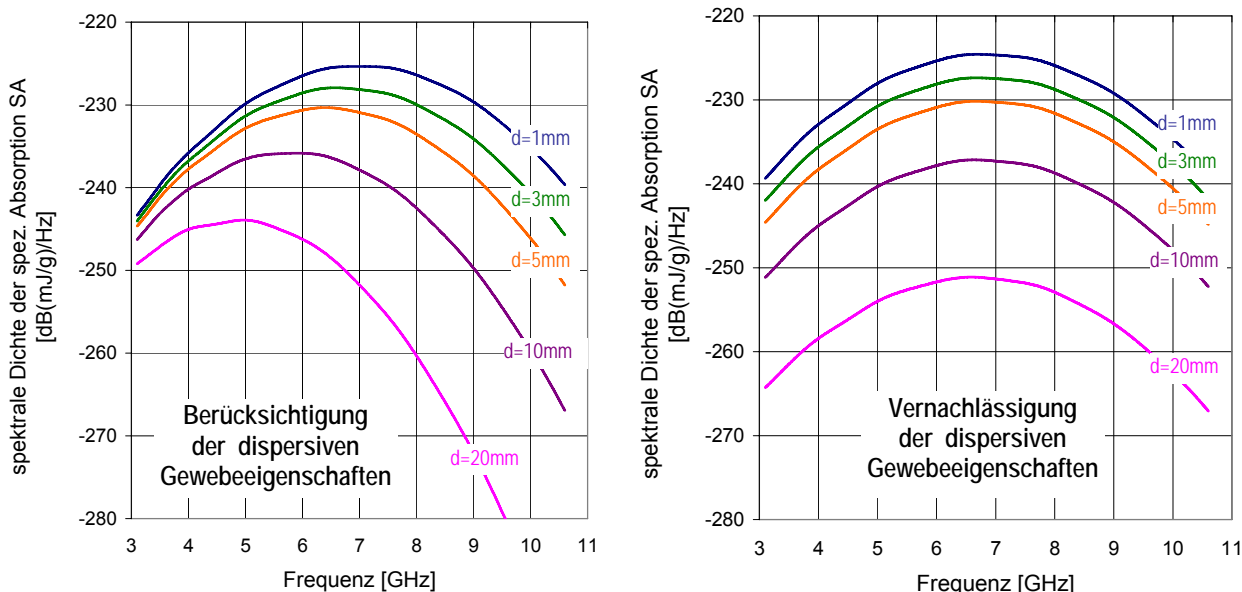


Abbildung 7.6: Ortsabhängigkeit der spektralen Zusammensetzung der spezifischen Absorption im homogenen Gewebemodell. Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse bei Berücksichtigung (links) und bei Vernachlässigung (rechts) der dispersiven Gewebeparameter. Dargestellt sind jeweils die spektralen Dichtefunktionen der spezifischen Absorption SA in dB(mJ/g)/Hz für unterschiedlich tief im Gewebe liegende Punkte (d ... Distanz zur Gewebeoberfläche).

Weiters wird durch Abbildung 7.7 deutlich, dass es bei Vernachlässigung der dispersiven Gewebeigenschaften vor allem in tieferen Gewebeschichten zu einer Unterschätzung der Absorption bei UWB-Befeldung kommt.

Im Hinblick auf den Absolutwert der spezifischen Absorption, bei der hier betrachteten Expositionssituation in 0,25 m Entfernung zu einem FCC konformen UWB-Gerät mit etwa mittlerer spektraler Effizienz (ca. 46% der maximal nach FCC theoretisch möglichen Sendeleistung, d.h. ca. 0,26 mW) zeigt sich, wie gering die in der Praxis von UWB-Geräten zu erwartende Exposition ist. Die maximale spezifische Absorption SA an der Oberfläche liegt gemäß Abbildung 7.7 bei ca. $1,43 \cdot 10^{-13}$ mJ/g. Die zugehörigen max. 1g- bzw. 10g- Mittelwerte ergeben sich zu $4,51 \cdot 10^{-14}$ mJ/g bzw. $2,30 \cdot 10^{-14}$ mJ/g.

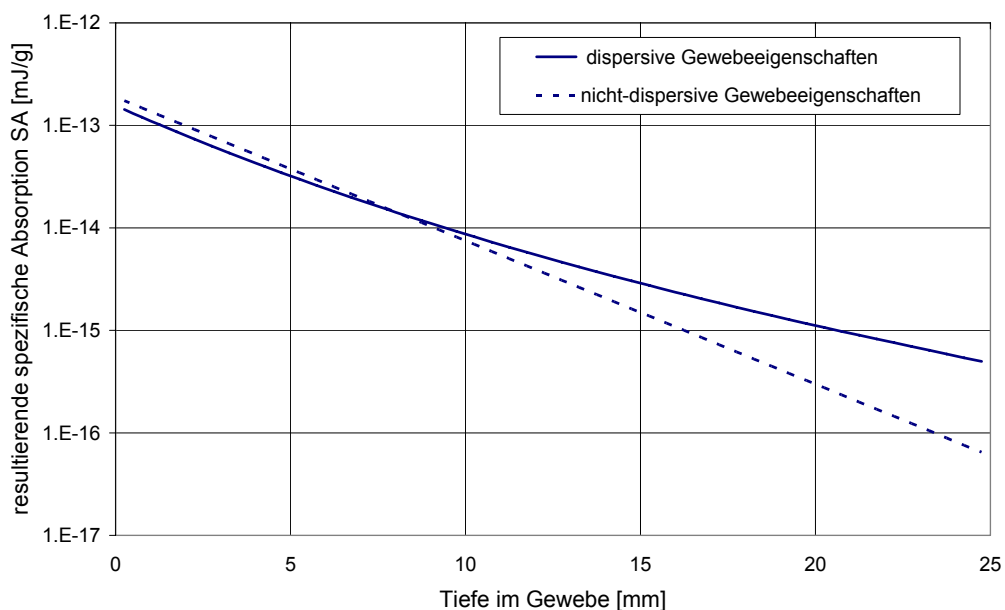


Abbildung 7.7: Resultierende spezifische Absorption SA (Integral über die spektrale Dichte) in Abhängigkeit von der Tiefe im Gewebe (entlang der x-Achse gemäß Abbildung 7.3)

Unter der Annahme kontinuierlichen Sendens des betrachteten hypothetischen UWB-Gerätes mit einer mittleren Impulswiederholzeit von z.B. 10 ns, entsprechen die genannten SA-Werte SAR-Werten von $1,43 \cdot 10^{-5}$ mW/g (Maximalwert an der Oberfläche), $4,51 \cdot 10^{-6}$ mW/g (max. 1g Mittelwert) und $2,30 \cdot 10^{-6}$ mW/g (max. 10g Mittelwert).

Zu Vergleichszwecken stellt Abbildung 7.8 die normierten SAR-Verläufe für UWB-Anregung mit Berücksichtigung der dispersiven Gewebeeigenschaften (durchgezogene dunkelblaue Kurve), für UWB-Anregung bei Vernachlässigung der dispersiven Gewebeeigenschaften (strichlierte dunkelblaue Kurve), sowie für eine schmalbandige, sinusförmige Anregung bei der Mittenfrequenz dar.

Berechnet man die maximalen 1g- und 10g- Mittelwerte der SAR für eine zur oben getroffenen Annahme (10 ns Impulswiederholzeit) leistungsäquivalenten sinusförmigen Exposition, so ergeben sich $4,45 \cdot 10^{-6}$ mW/g und $2,21 \cdot 10^{-6}$ mW/g. D.h., die Annäherung der UWB-Befeldungssituation durch eine leistungsäquivalente schmalbandige Befeldung führt zu einer Unterschätzung der tatsächlichen Exposition. Dies gilt besonders für tiefer liegende Gewebeschichten, wie aus Abbildung 7.8 unschwer zu erkennen ist.

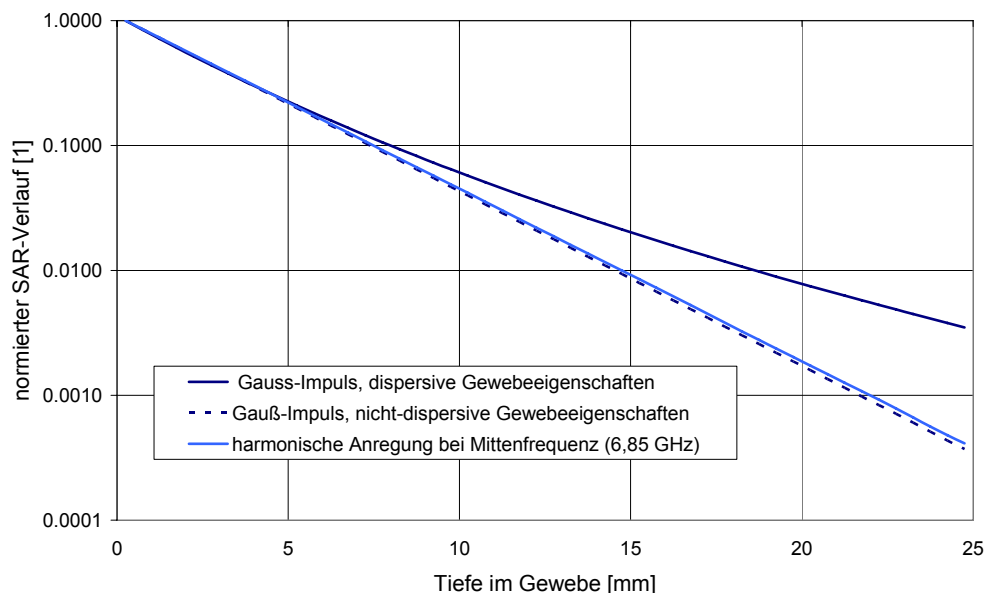


Abbildung 7.8: Normierter Vergleich der SAR-Verläufe entlang der x-Achse (vgl. Abbildung 7.3) für UWB-Anregung und schmalbandiger Anregung bei der Mittenfrequenz

7.2.2 Modell eines geschichteten Halbraumes

In Erweiterung des im vorangegangenen Abschnitt untersuchten homogenen Gewebemodells werden im Folgenden die Verhältnisse für ein geschichtetes flaches Modell, bestehend aus Haut (0,5 mm), Fett (3,0 mm), Muskel (9,0 mm), Knochen (4,5 mm) und „inneres Gewebe“ (entsprechend Niere) betrachtet. Die Schichtdicke des „inneren Gewebes“ wurde ausreichend groß gewählt, so dass Reflexionen von der quellenfernen Begrenzung des Gewebemodells vernachlässigt werden können.

Die frequenzabhängigen Eigenschaften des Muskelgewebes wurden mittels eines 3-poligen Debye-Modells, mit den in Tabelle 9.5 zusammengefassten Parametern beschrieben (vgl. Gleichung 7-1).

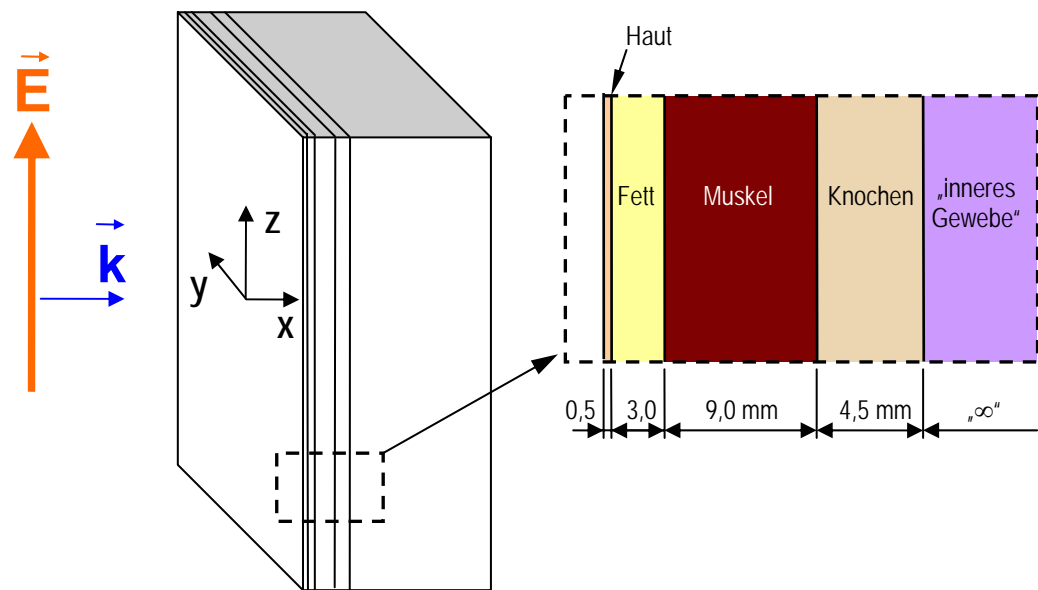


Abbildung 7.9: Schematische Darstellung des ebenen Schichtenmodells

	ϵ_s	ϵ_∞	σ_0	A_1	τ_1	A_2	τ_2	A_3	τ_3
	[1]	[1]	[S/m]	[1]	[s]	[1]	[s]	[1]	[s]
Haut	107000	4,0	0,75	0,00035	$7,96 \cdot 10^{-12}$	0,0028	$1,59 \cdot 10^{-8}$	30	0,000159
Fett	92000	3,6	0,00	0,00007	$7,96 \cdot 10^{-12}$	0,0010	$1,59 \cdot 10^{-8}$	33	0,000159
Muskel	95000	4,0	0,90	0,00050	$7,23 \cdot 10^{-12}$	0,070	$3,54 \cdot 10^{-7}$	12	0,0003181
Knochen	122000	2,5	0,03	0,00007	$1,33 \cdot 10^{-11}$	0,0018	$7,96 \cdot 10^{-8}$	0,05	0,000159
Niere	98000	4,0	0,05	0,00047	$7,96 \cdot 10^{-12}$	0,035	$1,59 \cdot 10^{-8}$	2,5	0,000159

Tabelle 7.2: Debye-Parameter für das untersuchte ebene Schichtenmodell in Abbildung 7.9

Abbildung 7.10 und Abbildung 7.11 zeigen Vergleiche der verwendeten Debye-Modelle für die betrachteten Gewebetypen (durchgezogene Linien) mit den von Gabriel 1996 [36] verwendeten Cole Cole Modellen (einzelne Symbole). Im interessierenden Frequenzbereich zeigt sich hinreichend gute Übereinstimmung (Abweichungen < 8%).

Wie im Fall des homogenen Gewebeblocks wurden auch mit dem Schichtmodell FDTD-Berechnungen für eine seitlich einfallende ebene Welle gemäß Abbildung 7.9 durchgeführt. Die Diskretisierung des Feldraumes erfolgte wieder mit einem FDTD-Gitter variabler Schrittweite, wobei die maximale Schrittweite im Gewebeblock mit 0,4 mm (auf < 10% der minimalen, noch relevanten Wellenlängen) begrenzt wurde. Die Berechnung der resultierenden SA bzw. SAR aus den Zeitbereichs-Ergebnisdaten erfolgte wieder in MATLAB.

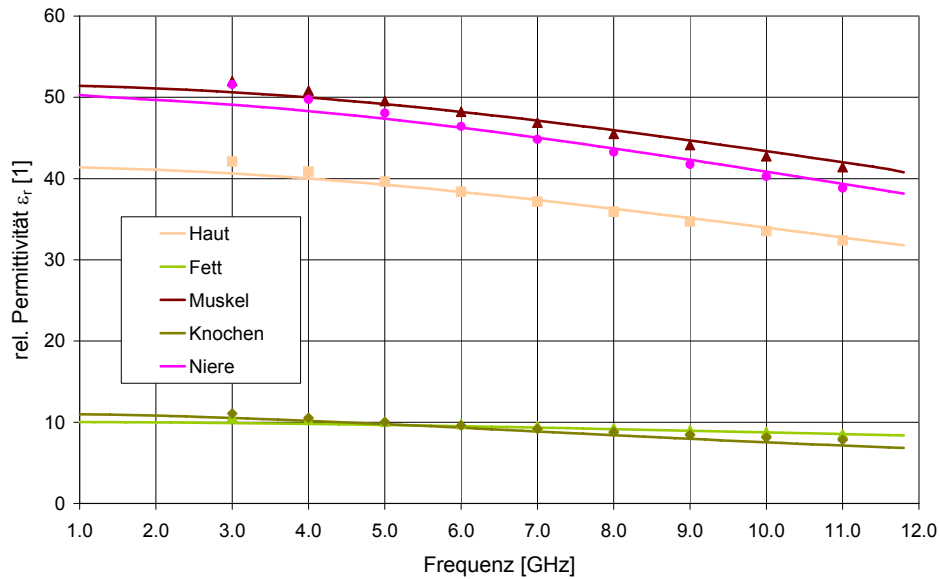


Abbildung 7.10: Verwendete Debye-Dispersionsmodelle (relative Permittivität ϵ_r) für die 5 betrachteten Gewebetypen im Vergleich zu den Cole Cole Modellen nach Gabriel 1996 [36]

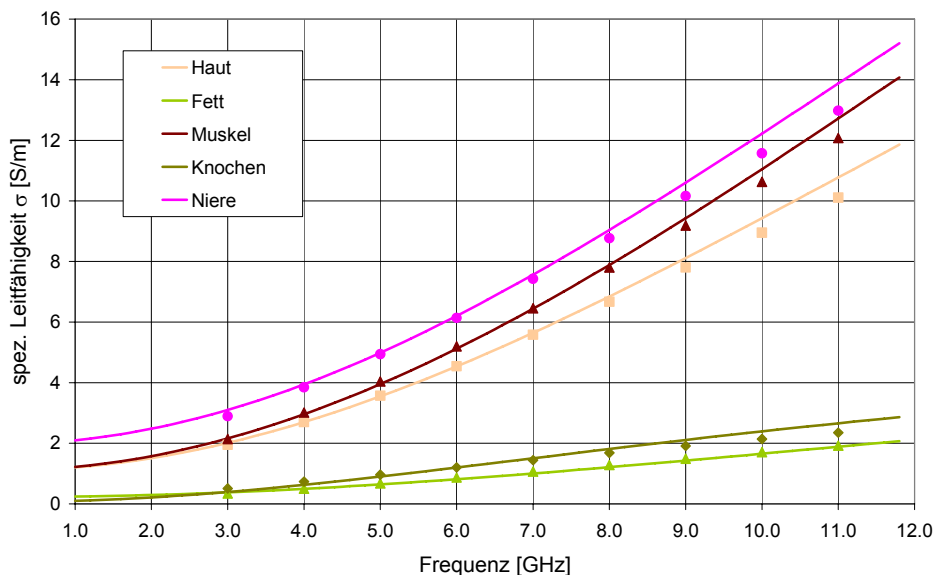


Abbildung 7.11: Verwendete Debye-Dispersionsmodelle (spezifische Leitfähigkeit σ) für die 5 betrachteten Gewebetypen im Vergleich zu den Cole Cole Modellen nach Gabriel 1996 [36]

Abbildung 7.12 zeigt zunächst spektrale Dichtefunktionen der spezifischen Absorption SA in den 5 unterschiedlichen Gewebeschichten entlang einer Geraden normal zur Modelloberfläche. Das linke Teilbild zeigt die Ergebnisse bei korrekter Berücksichtigung der dispersiven Gewebeparameter in der Berechnung, das rechte Teilbild die Ergebnisse bei Vernachlässigung der dispersiven Gewebeigenschaften (frequenzunabhängige Gewebeigenschaften bei der Mittenfrequenz). Der Abstand der betrachteten Punkte zur Modelloberfläche beträgt 0,25 mm (Haut, blaue Kurven), 2,0 mm (Fett, grüne Kurven), 8,0 mm (Muskel, orange Kurven), 14,25 mm (Knochen, violette Kurven) und 20 mm („inneres Gewebe“, rosa Kurven). Der Vergleich der beiden Teilbilder in Abbildung 7.12 macht, wie schon im Fall des homogenen Gewebemodells deutlich, dass der korrekten Berücksichtigung der dispersiven Gewebeigenschaften in dosimetrischen Berechnungen bei UWB-Befeldung essentielle Bedeutung zukommt. Erst dadurch

werden die physikalischen Tatsachen der hauptsächlich oberflächennahen Absorption der höheren Frequenzanteile und das tiefere Eindringen niederfrequenter Spektralanteile ins Gewebe korrekt in ihrem gesamten Ausmaß erfasst.

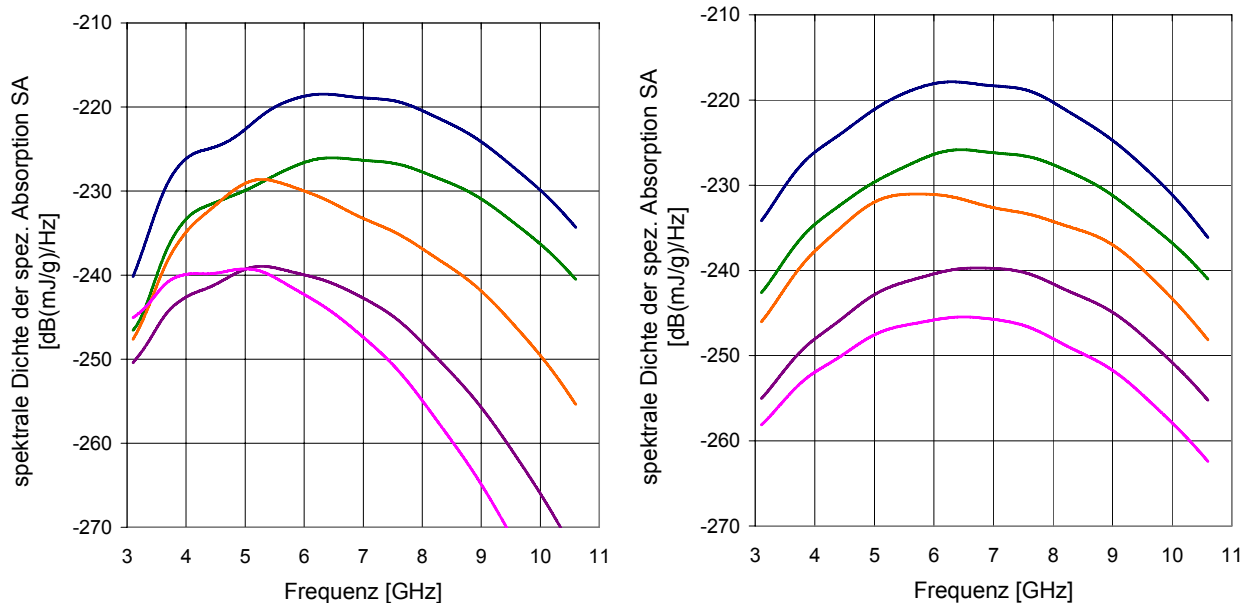


Abbildung 7.12: Ortsabhängigkeit der spektralen Zusammensetzung der spezifischen Absorption im geschichteten Gewebemodell. Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse bei Berücksichtigung (links) und bei Vernachlässigung (rechts) der dispersiven Gewebeparameter. Dargestellt sind jeweils die spektralen Dichtefunktionen der spezifischen Absorption SA in dB(mJ/g)/Hz für unterschiedlich tief im Gewebe liegende Punkte (d ... Distanz zur Gewebeoberfläche).

Die in Abbildung 7.12 zutage tretende „Deformierung“ der ursprünglich (seitens des Anregungssignals) Gauß-förmigen Kurven der spektralen Dichtefunktionen ist eine Folge von Signalreflexionen an den Grenzen der einzelnen Gewebeschichten. Die in den einzelnen Punkten im Gewebe auftretende elektrische Feldstärke folgt dadurch keinem Gauß-förmigen Zeitverlauf mehr, sondern ist eine Überlagerung des einfallenden und ein oder mehreren reflektierten Signalanteile, was naturgemäß gleichzeitig zu den beobachtbaren Verschiebungen in der spektralen Zusammensetzung („Deformationen“ des Signals) führt.

Die erwartungsgemäße Tatsache, dass die Absorptionsverhältnisse im geschichteten Modell wesentlich komplexer sind als im Fall des homogenen Modells zeigt Abbildung 7.13. Auch in diesem Fall wird deutlich, dass es bei Vernachlässigung der dispersiven Gewebeeigenschaften vor allem in tieferen Gewebeschichten zu einer Unterschätzung der Absorption bei UWB-Befeldung kommt.

Für die Absolutwerte der spezifischen Absorption, bei der hier betrachteten Expositionssituation in 0,25 m Entfernung zu einem FCC konformen UWB-Gerät mit etwa mittlerer spektraler Effizienz (ca. 46% der maximal nach FCC theoretisch möglichen Sendeleistung, d.h. ca. 0,26 mW), ergeben sich $4,82 \cdot 10^{-13}$ mJ/g (max. SA-Wert an der Hautoberfläche) und $7,48 \cdot 10^{-14}$ mJ/g bzw. $3,89 \cdot 10^{-14}$ mJ/g für die zugehörigen maximalen 1g- bzw. 10g- SA-Mittelwerte.

Unter der Annahme kontinuierlichen Sendens des betrachteten hypothetischen UWB-Gerätes mit einer mittleren Impulswiederholzeit von z.B. 10 ns, entsprechen die genannten SA-Werte SAR-Werten von $4,82 \cdot 10^{-5}$ mW/g (Maximalwert an der Oberfläche), $7,48 \cdot 10^{-6}$ mW/g (max. 1g Mittelwert) und $3,89 \cdot 10^{-6}$ mW/g (max. 10g Mittelwert).

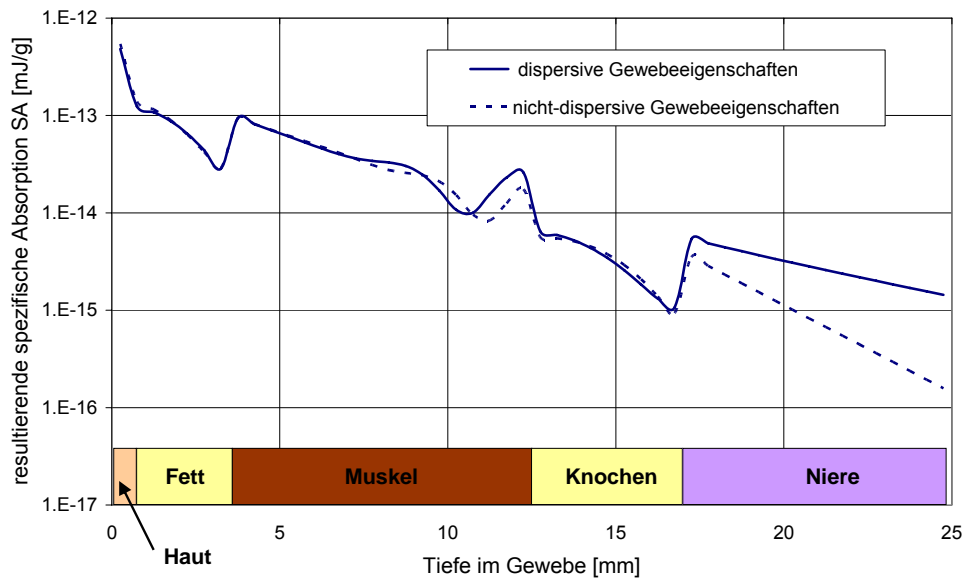


Abbildung 7.13: Resultierende spezifische Absorption SA (Integral über die spektrale Dichte) in Abhängigkeit von der Tiefe im Schichtenmodell (entlang der x-Achse gemäß Abbildung 7.9)

Zu Vergleichszwecken stellt Abbildung 7.14 die normierten SAR-Verläufe im Schichtenmodell für UWB-Anregung mit Berücksichtigung der dispersiven Gewebeeigenschaften (durchgezogene dunkelblaue Kurve), für UWB-Anregung bei Vernachlässigung der dispersiven Gewebeeigenschaften (strichlierte dunkelblaue Kurve), sowie für eine schmalbandige, sinusförmige Anregung bei der Mittenfrequenz dar. Berechnet man die maximalen 1g- und 10g- Mittelwerte der SAR für eine zur oben getroffenen Annahme (10 ns Impulswiederholzeit) leistungsäquivalente sinusförmigen Exposition, so ergeben sich $7,03 \cdot 10^{-6}$ mW/g und $3,46 \cdot 10^{-6}$ mW/g. D.h., die Annäherung der UWB-Befeldungssituation durch eine leistungsäquivalente schmalbandige Befeldung führt wieder zu einer Unterschätzung der tatsächlichen Exposition. Wie in Abbildung 7.14 zu erkennen, gilt dies wieder besonders für tiefer liegende Gewebeschichten.

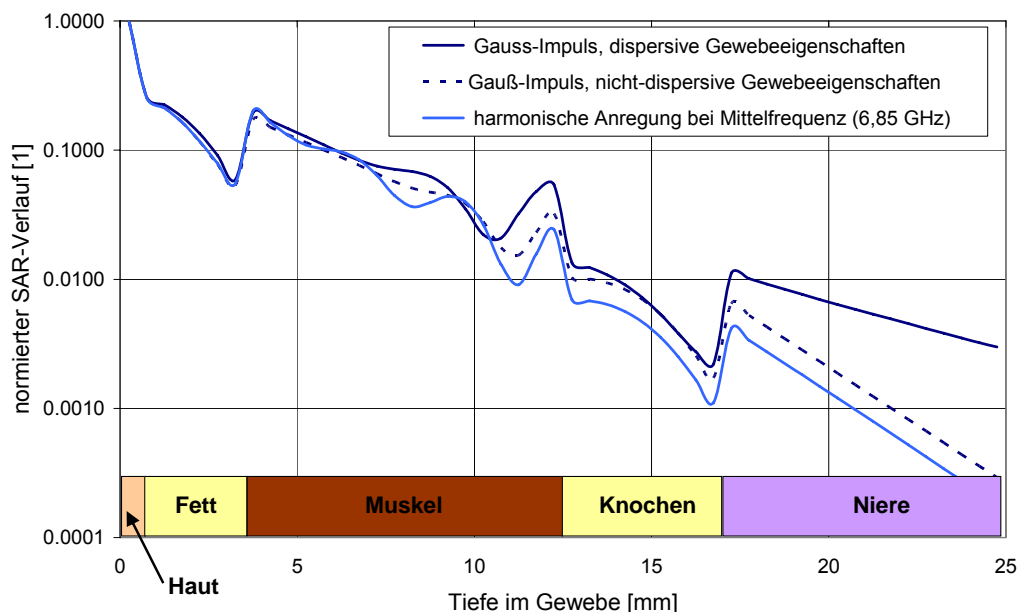


Abbildung 7.14: Normierter Vergleich der SAR-Verläufe entlang der x-Achse (vgl. Abbildung 7.9) für UWB-Anregung und schmalbandiger Anregung bei der Mittenfrequenz im Fall des Schichtenmodells

7.3 SAR, SA oder E als Bewertungsgröße der Exposition

Im Zusammenhang mit der Exposition gegenüber UWB-Feldern wird häufig die Frage diskutiert, welche physikalische Größe für die Beurteilung der Exposition am „zweckmäßigsten“ ist. Diese Frage ist jedoch nicht pauschal, sondern nur differenziert zu beantworten.

Unter „Zweckmäßigkeit“ der Beurteilungsgröße ist wohl zu verstehen, dass auf Basis der Beurteilungsgröße Aussagen über die biologisch wirksamen Vorgänge im Gewebe gemacht werden können. D.h., der Frage nach der zweckmäßigsten Beurteilungsgröße muss zunächst die Frage nach den biologisch relevanten Wirkungsmechanismen vorangestellt werden. Diese Frage wiederum ist auf dem Gebiet hochfrequenter elektromagnetischer Felder seit vielen Jahren einer der zentralen Punkte der wissenschaftlichen Diskussion, um nicht zu sagen sie ist der Stein des Anstoßes für eine Spaltung der Wissenschaft in zwei Lager. Als unumstritten gesicherte biologisch relevante Wirkungsmechanismen gelten im Hochfrequenzbereich bekanntlich die thermische Wirkung (Geweberwärmung) und die auf thermoelastische Expansionseffekte zurückzuführende akustische Wahrnehmbarkeit von kurzen energiereichen Hochfrequenzimpulsen. Für andere Effekte, üblicherweise unter Begriffen wie „nicht-thermische Effekte“ oder „Niedrigdosiseffekte“ subsumiert⁹ gibt es in der Literatur vereinzelt Hinweise, eine wissenschaftliche Absicherung bzw. anerkannte Wechselwirkungsmodelle stehen gegenwärtig jedoch noch aus.

Aus rein physikalischer Sicht ist eine Betrachtung der elektrischen Feldstärke E als Beurteilungsgröße bei UWB-Exposition nur dann notwendig, wenn man von der Existenz von Effekten ausgeht, bei denen direkte elektrische Wechselwirkungen zwischen dem elektrischen Feld und den biologisch relevanten Strukturen (Zellen, Zellmembranen, Makromoleküle, usw.) eine signifikante Rolle spielen. Solche Effekte sind eindeutig den oben letztgenannten „nicht-thermischen Effekten“ bzw. „Niedrigdosiseffekten“ zuzuordnen und daher gegenwärtig, zumindest was ein möglicherweise zugrunde liegendes Wechselwirkungsmodell betrifft, Gegenstand von Spekulationen. Eine wissenschaftlich begründete Notwendigkeit die elektrische Feldstärke als Beurteilungsgröße bei UWB-Exposition heranzuziehen ist daher zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht unmittelbar gegeben. Dies gilt übrigens nicht nur speziell für UWB-Exposition, sondern ganz allgemein für die Exposition in hochfrequenten elektromagnetischen Feldern.

Bilden die gegenwärtig wissenschaftlich gesicherten Effekte den Ausgangspunkt der Überlegungen, so spielen nur der Leistungs- bzw. Energieeintrag ins Gewebe eine Rolle, und die Detailinformation (Zeitverlauf, Richtung, Phasenlage) der elektrischen Feldstärke im Gewebe ist daher aus physikalischer Sicht ohne Bedeutung. Für die Exposition in „konventionellen“ (schmalbandigen) hochfrequenten elektromagnetischen Feldern wurde bekanntlich, z.B. in [61], die SAR als die adäquate Beurteilungsgröße festgelegt, um eine biologisch bedenkliche Gewebeerwärmung durch die Exposition zu vermeiden. Formal

⁹ Die Begriffsbildungen „nicht-thermische Effekte“ und „Niedrigdosiseffekte“ sind relativ unscharf. Beispielsweise sollte „nicht-thermisch“ in diesem Zusammenhang nicht den Eindruck vermitteln, dass die damit beschriebenen möglichen Effekte nicht doch unter signifikanter Beteiligung thermischer bzw. thermodynamischer Vorgänge im Gewebe ausgelöst werden. Vielmehr sind darunter mögliche Effekte zu verstehen, die nicht auf Vorgänge im Gewebe zurückzuführen sind, wie sie bei Gewebeerwärmungen im Ausmaß von ca. 1°C bekannt sind. Eine andere, relativ pragmatische und auch weit verbreitete Auffassung der Begriffe „nicht-thermische Effekte“ bzw. „Niedrigdosiseffekte“ ist jene, alle Effekte die bei Expositionen unterhalb der Expositionsgrenzwerte nach ICNIRP 1998 [61] auftreten zu verstehen, da diese Grenzwerte auf Basis der gesicherten thermischen Wirkungsmechanismen abgeleitet wurden.

ist die SAR als die Zeitrates des Eintrages elektromagnetischer Energie ins Gewebe pro Masseneinheit definiert:

$$SAR = \frac{dW}{dt \cdot m} \quad (7.10)$$

Für kontinuierliche Exposition, z.B. in Form einer zeitlich sinusförmigen Befeldung ergibt sich im eingeschwungenen Zustand daher ein konstanter SAR-Wert, der als adäquater Beurteilungswert für die thermische Belastung des Gewebes und damit für die Exposition herangezogen werden kann.

Im Fall von gepulsten elektromagnetischen Feldern mit sehr kurzen Impulsdauern (Impuls-UWB) wird die SAR-basierte Grenzwertfestlegung teilweise als nicht adäquat angesehen. Beispielsweise wird in einem kürzlich publizierten Artikel [49] behauptet: „*When the standards defined for continuous radiofrequency waves are applied to the short UWB pulses, their meaning loses its clarity*“. Zur Untermauerung seiner Aussage, dass die SAR in diesem Fall kein adäquates Maß für die thermische Gewebelastung ist, bringt der Autor von [49] ein Beispiel eines ca. 100 ps langen Impulses mit einer Amplitude von 2500 V/m, der in einem Gewebemodell eine SAR von 4 W/kg verursacht, während die spezifische Absorption SA nur $4 \cdot 10^{-10}$ J/kg beträgt und dadurch auch die thermische Belastung des Gewebes praktisch vernachlässigbar ist. Diese Aussage muss allerdings relativiert werden, da sie nicht praxisgerecht ist und die in der Grenzwertgebung nach ICNIRP [61] ebenfalls festgeschriebene zeitliche Mittelung der SAR völlig ignoriert.

In der Praxis wird man in der Umgebung von UWB-Geräten nicht einem einzelnen Impuls ausgesetzt sein, sondern einer mehr oder weniger regelmäßigen Folge von (sehr kurzen) UWB-Impulsen. In diesem Fall führt die Zeitmittelung sehr wohl wieder auf SAR-Werte, die ein adäquates Maß für die mittlere absorbierte Strahlungsleistung und damit für die thermische Belastung des Gewebes darstellen. Eine Bevorzugung der SA gegenüber der SAR, mit dem Ziel einer Überbewertung der Exposition vorzubeugen, wie in [49] suggeriert, ist demnach aus praktischer Sichtweise nicht nachvollziehbar.

Allerdings bleibt festzuhalten, dass die zeitgemittelte SAR zwar eine adäquate Bewertungsgröße für die thermische Belastung des Gewebes darstellt, allerdings nicht für die ebenfalls als gesichert geltenden thermoelastischen Expansionseffekte, wie z.B. das so genannte Mikrowellenhören [62]. Im Falle energiereicher Impulse können solche Effekte auftreten, obwohl die zeitlich gemittelte SAR und damit die thermische Gewebelastung noch deutlich unterhalb kritischer Werte liegen. Aus diesem Grund legt ICNIRP [61] zusätzlich zu den Grenzwerten für die zeitgemittelte SAR für gepulste elektromagnetische Felder auch Grenzwerte für die maximale spezifische Absorption SA pro Impuls fest (2 mJ/kg für die Allgemeinbevölkerung, 10 mJ/kg für berufliche Exposition, jeweils gemittelt über 10 g Gewebe).

Grundsätzlich sind daher für eine umfassende Beurteilung der Exposition in UWB-Feldern sowohl die SAR, als auch die SA notwendige (und nicht alternative) Beurteilungsgrößen. Welche der beiden Größen das strengere Kriterium bei der Beurteilung darstellt, hängt von den jeweiligen Eigenschaften der UWB-Immissionen (Energieinhalt des Impulses, Impulsdauer, Impulswiederholzeit) ab.

Für die in Kapitel 7.2.2 betrachtete hypothetische Befeldungssituation mit einer maximalen SAR_{10g} von $3,89 \cdot 10^{-6}$ mW/g und maximalen SA_{10g} von $3,89 \cdot 10^{-14}$ mJ/g stellt

aufgrund der relativ kleinen Impulsamplitude bei gleichzeitig relativ großem Verhältnis von Impulsdauer zu Impulswiederholzeit, die SAR das bei weitem strengere Kriterium dar, wenngleich die Absolutwerte dieser SAR und SA im Vergleich zu den Grenzwerten deutlich zeigen, wie gering die zu erwartende typische Exposition von regulierungskonformen UWB-Geräten für Kommunikationszwecke in der Praxis sein wird.

8 MESSTECHNISCHE EXPOSITIONSERFASSUNG IN DER UMGEBUNG VON UWB-GERÄTEN

8.1 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 [2] bzw. Deutschland [3], andererseits stehen UWB-Anwendungen auch in den USA, wo die Funkregulierung bereits seit 2001 [1] 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 [8], [9] 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 [3] 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.

8.2 Messtechnisch untersuchte UWB-Geräte

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

8.2.1 Gerät 1: Cable Free USB Hub und Adapter (Belkin, Inc.) [16]

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 8.1 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 8.1: 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 [8],[9] 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), 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.

8.2.2 Gerät 2: Wireless USB Hub und Adapter (IOGEAR, Inc.) [17]

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

8.2.3 Gerät 3: PulsON Reference Design (Time Domain, Inc.) [38]

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 8.3 zeigt die beiden Sendeempfänger. Als Strahlungselement dient eine extern montierte, gedruckte Breitbandantenne.



Abbildung 8.3: PulsON P210 Reference Design Kit

8.2.4 Gerät 4: Ubisense Serie 7000 (Ubisense AG) [14]

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 8.4 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 8.4: In einer Raumecke montierter Sensor (links) und ein Tag (rechts) des Ubisense Systems 7000

8.3 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 8.5) 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 8.5).

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 [40]. 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.

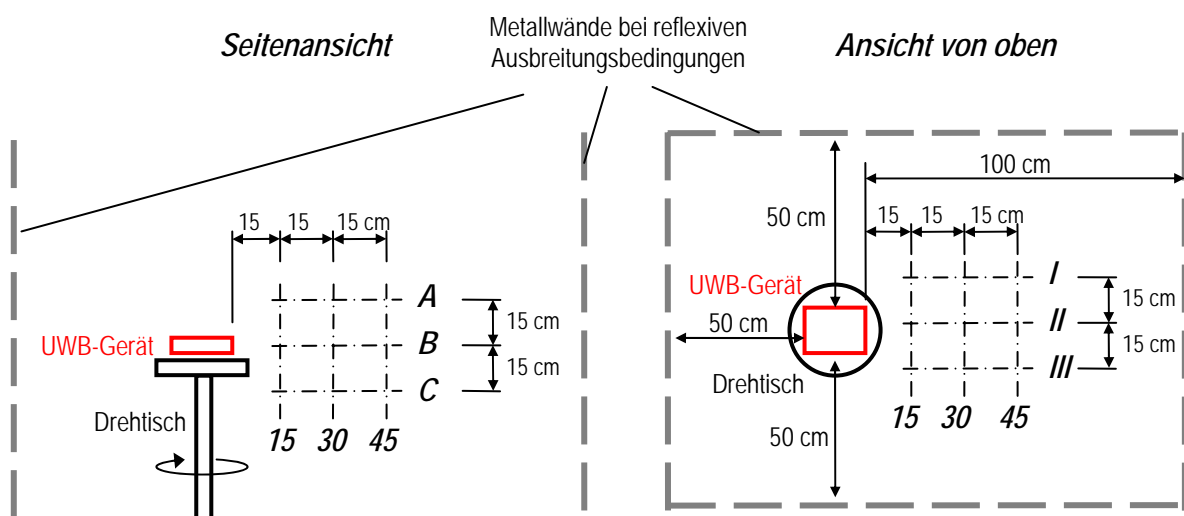


Abbildung 8.5: Definition des Messrasters für die Messungen der räumlichen Immissionsverteilung

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 8.4.4).

Weitere Details hinsichtlich der bei den einzelnen Geräten verwendeten Messmethodik finden sich in den jeweiligen Kapiteln mit den Messergebnissen (8.4.1 - 8.4.4).

8.3.1 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 6.2). 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 8.6 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 wurden¹⁰.

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 8.7 dargestellten Verlauf der gemessenen Feldstärke über der Distanz ist zu erkennen,

¹⁰ 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 8.7, 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.

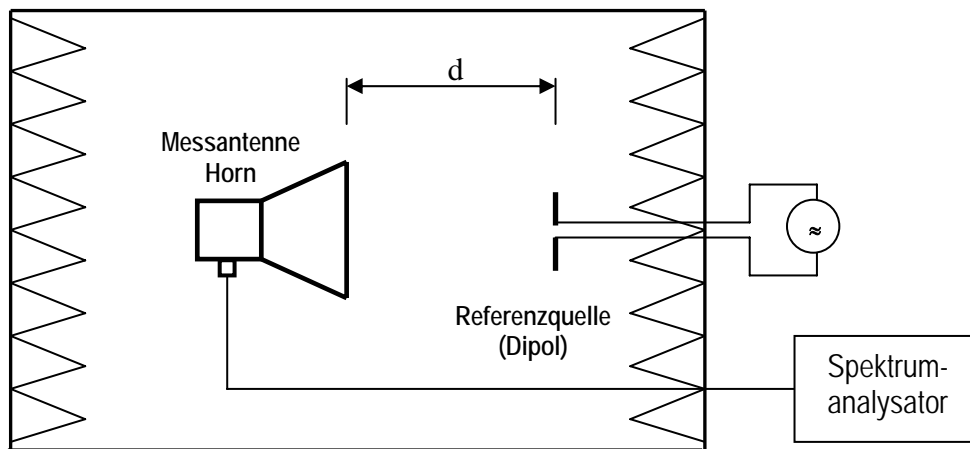


Abbildung 8.6: Schema zur Abschätzung der Unsicherheit zufolge der Messungen im Nahfeld der Messantenne

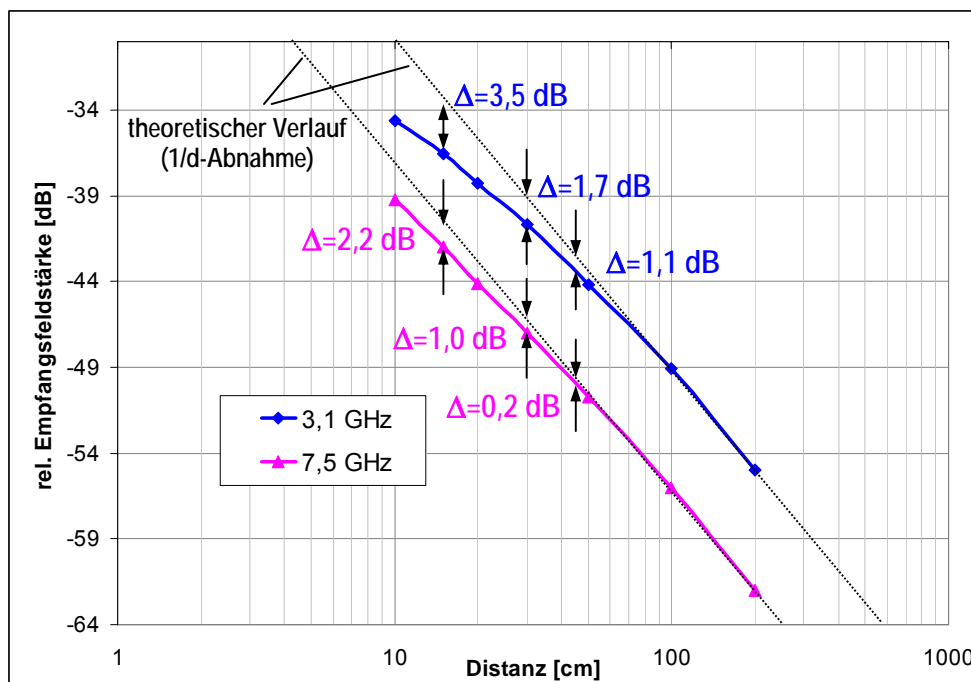


Abbildung 8.7: Mit Hornantenne gemessene Feldstärke in Abhängigkeit von der Distanz zu einer Referenzquelle

8.4 Messergebnisse

8.4.1 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 8.1 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 8.1: Ergebnis der Immissionsmessungen mit dem Belkin Cable Free USB Hub

Tabelle 8.2 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 8.2: 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 [61].

8.4.2 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 8.3 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.

IOGEAR Wireless 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	24.29	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
$S_{\text{sequ, max}}$ in Position B/II/15 cm: 353,4 $\mu\text{W}/\text{m}^2$					$S_{\text{sequ, max}}$ in Position B/II/15 cm: 395,2 $\mu\text{W}/\text{m}^2$				

Tabelle 8.3: Ergebnis der Immissionsmessungen mit dem IOGEAR Wireless USB Hub

Tabelle 8.4 fasst die Ergebnisse der Messungen in Hauptstrahlrichtung des USB Adapters zusammen.

IOGEAR Wireless 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
58,74	19,9	74,8	26,3
$S_{\text{sequ, max}}$ in 15 cm Entfernung: 364,3 $\mu\text{W}/\text{m}^2$		$S_{\text{sequ, max}}$ in 15 cm Entfernung: 445,7 $\mu\text{W}/\text{m}^2$	

Tabelle 8.4: 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 $10 \text{ W}/\text{m}^2$ für die Allgemeinbevölkerung gemäß ICNIRP [61].

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

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

Tabelle 8.5 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 8.5: 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 6.3).

Das absolute Ausmaß der Immissionswerte im Hinblick auf den Referenzwert für die Allgemeinbevölkerung nach ICNIRP [61] 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 [61] darf der Spitzenwert der Feldstärke nicht größer als das 32-fache des jeweils geltenden Referenzwertes sein¹¹. 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 8.5 zeigen eine maximale Feldstärkeamplitude (in 15 cm

¹¹ Gemäß dem Wortlaut in [61] 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.

8.4.4 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 8.8 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 8.8 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 8.8 nicht ohne weiteres erkennbar.

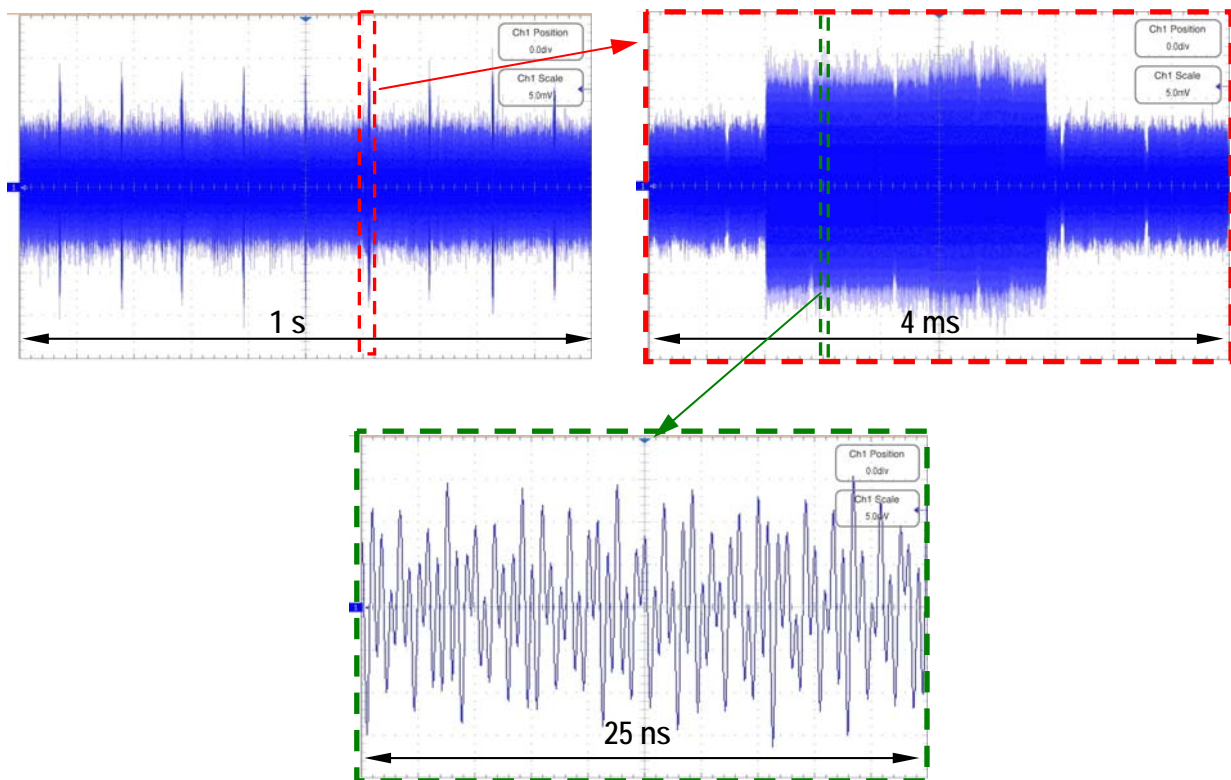


Abbildung 8.8: Qualitative Darstellung des Zeitverlauf des von den Ubisense 7000 Tags stammenden Immissionssignals, gemessen mit Antenne und 7 GHz-Oszilloskop

Die spektrale Dominanz des Kommunikationssignals zeigt auch das Ergebnis einer frequenzselektiven Überblicksmessung in 15 cm Abstand zu einem aktiven Tag (Abbildung 8.9). 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 8.9 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 8.10 dargestellte Ergebnis einer Zero Span Messung bei ca. der Mittenfrequenz des UWB-Signals (7 GHz).

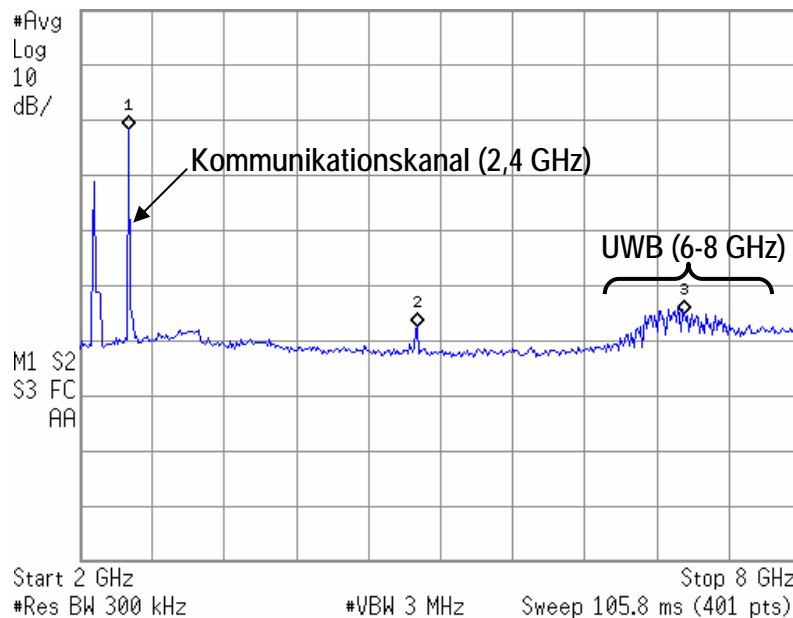


Abbildung 8.9: Spektrale Zusammensetzung (qualitativ) der Emissionen des Ubisense 7000 Tags. Die ganz links sichtbare Spektralkomponente stammt nicht vom Ubisense 7000 System, sondern von einer nahe gelegenen UMTS-Basisstation

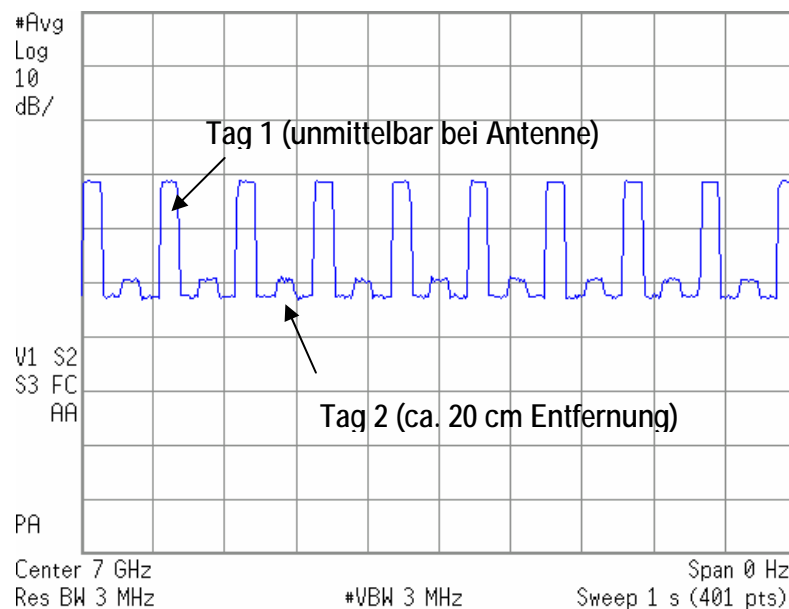


Abbildung 8.10: Zero Span Messung im UWB-Frequenzbereich des Ubisense 7000 Systems bei zwei gleichzeitig aktiven Tags, wobei sich Tag 1 unmittelbar vor der Empfangsantenne und Tag 2 in 20 cm Entfernung zur Empfangsantenne befand. Zu erkennen ist die Update-Rate von 10 Hz für jedes Tag.

Abbildung 8.11 zeigt qualitativ Detaildarstellungen des UWB-Kanals und des Kommunikationskanals im Frequenzbereich.

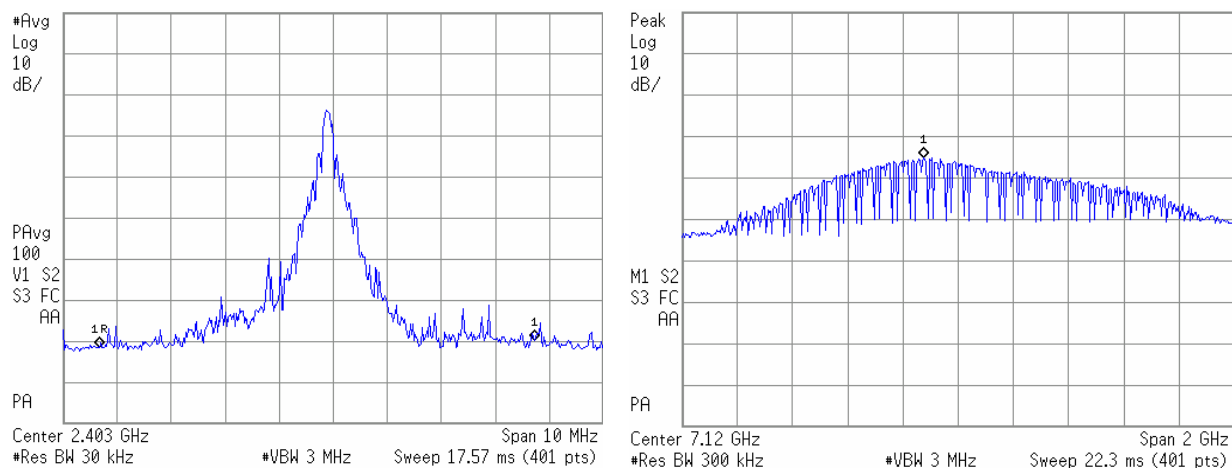


Abbildung 8.11: Qualitative Detail-Darstellung des 2,4 GHz Kommunikationskanals (links) und des UWB-Kanals (rechts) des Ubisense 7000 Systems

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 8.3 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 8.6 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 8.11 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 [61] 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 8.6: Immissionen in der Nähe der untersuchten Ubisense Tags

Anmerkung: Bei genauer Betrachtung der Messwerte in Tabelle 8.6 zu erkennen, dass das Verhältnis der Maximalwerte $Sequ,max$ zu den Mittelwerten $Sequ,avg$ in größerer Entfernung zur Quelle geringer ist, als nahe an der Quelle. Dieses, zunächst unerwartete Ergebnis, kann durch die extrem geringen Signalpegel erklärt werden, die in größerer Entfernung zur Quelle nur mehr geringfügig über dem Hintergrundrauschen liegen. Da das Hintergrundrauschen dem Immissionssignal additiv überlagert ist, strebt das Verhältnis $Sequ,max/Sequ,avg$ mit steigendem Hintergrundrauschen (oder äquivalent dazu: mit sinkendem Nutzsignal) der Zahl 1 zu. Solange sich das Nutzsignal ausreichend vom Hintergrundrauschen abhebt wird dieser Effekt vernachlässigbar bzw. überhaupt nicht bemerkbar sein. Im Fall von Nutzsignalen, die sich nur schwach vom Hintergrundrauschen abheben wird dies allerdings merkbar (wie hier zu sehen).

9 NUMERISCHE ABSORPTIONSSBERECHNUNGEN IN TYPISCHEN UWB-ANWENDUNGSFÄLLEN

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.

9.1 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 9.4.

9.2 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 7). 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.

9.2.1 Feldquellen-Modelle

Antennenmodell 1

Für alle betrachteten Expositionsszenarien wurde als Feldquelle ein Modell der in [63] 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 9.1 zeigt die Geometrie der verwendeten Breitbandantenne und Abbildung 9.2 den Frequenzgang des S11 Parameters.

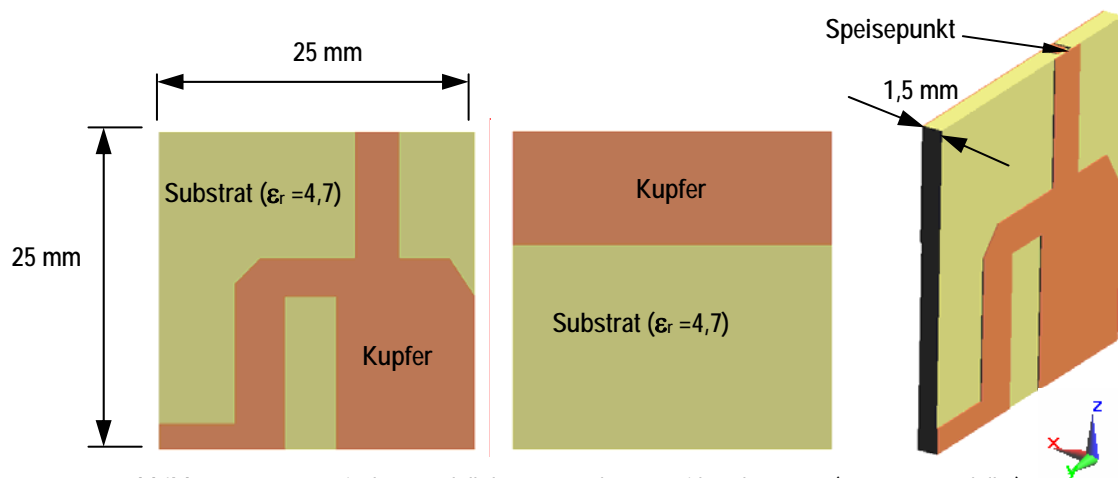


Abbildung 9.1: Numerisches Modell der verwendeten Breitbandantenne (Antennenmodell 1): Vorderseite (links), Rückseite (Mitte), 3D-Ansicht (rechts)

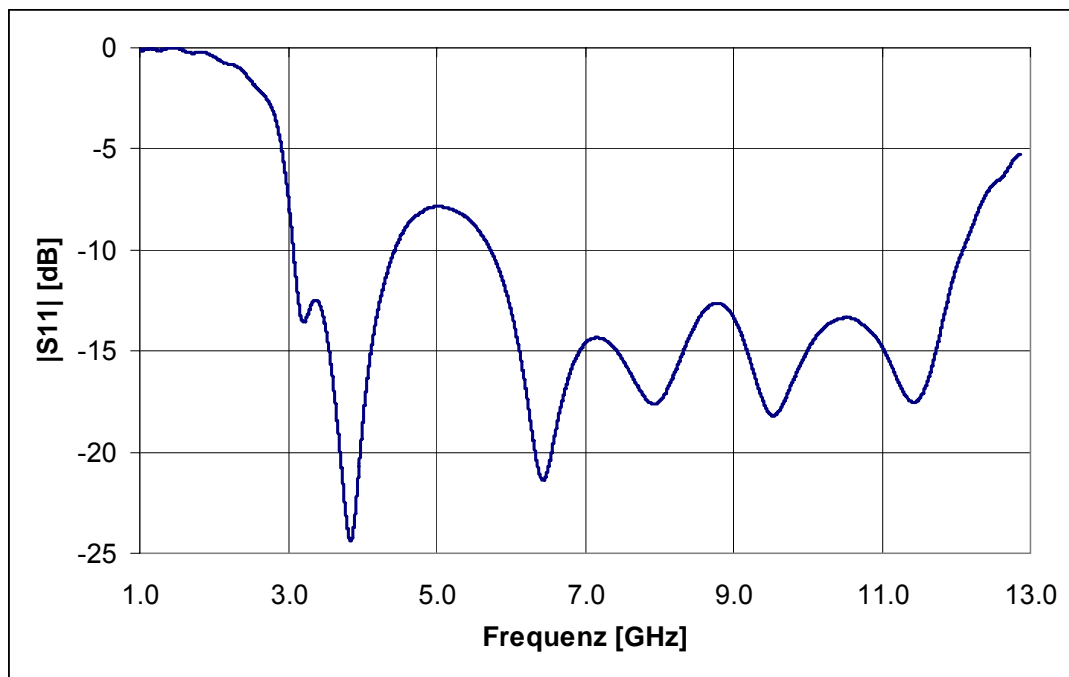


Abbildung 9.2: |S11| der verwendeten Breitbandantenne (Antennenmodell 1)

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

Abbildung 9.3 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).

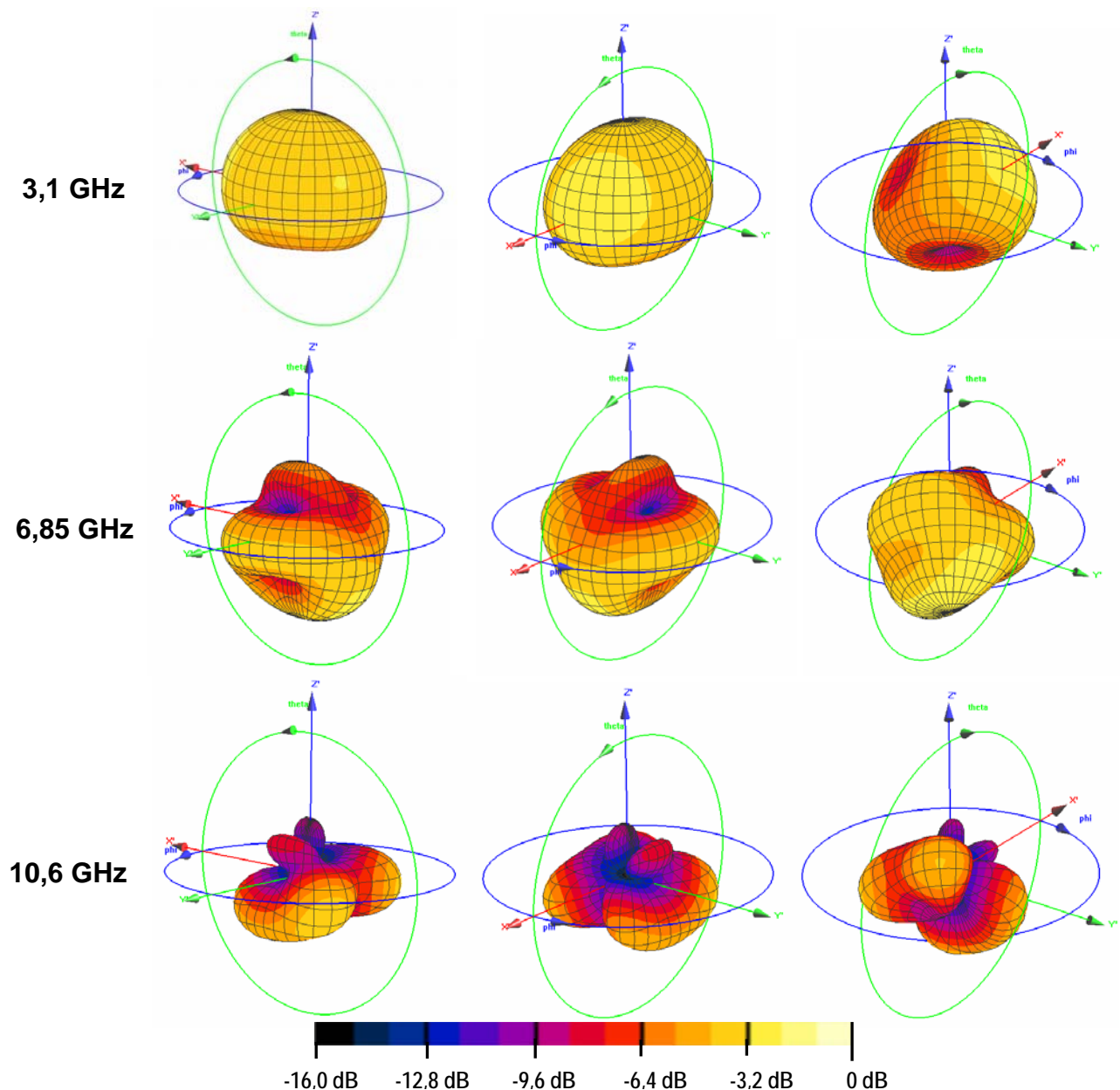


Abbildung 9.3: 3D-Abstrahlcharakteristika des verwendeten Breitband-Antennenmodells in unterschiedlichen Ansichten und bei unterschiedlichen Frequenzen

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 9.4 zeigt die Geometrie und Abbildung 9.5 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 9.6 zeigt 3D-Darstellungen der im Nutzfrequenzgang sich nur wenig ändernden Abstrahlcharakteristika 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).

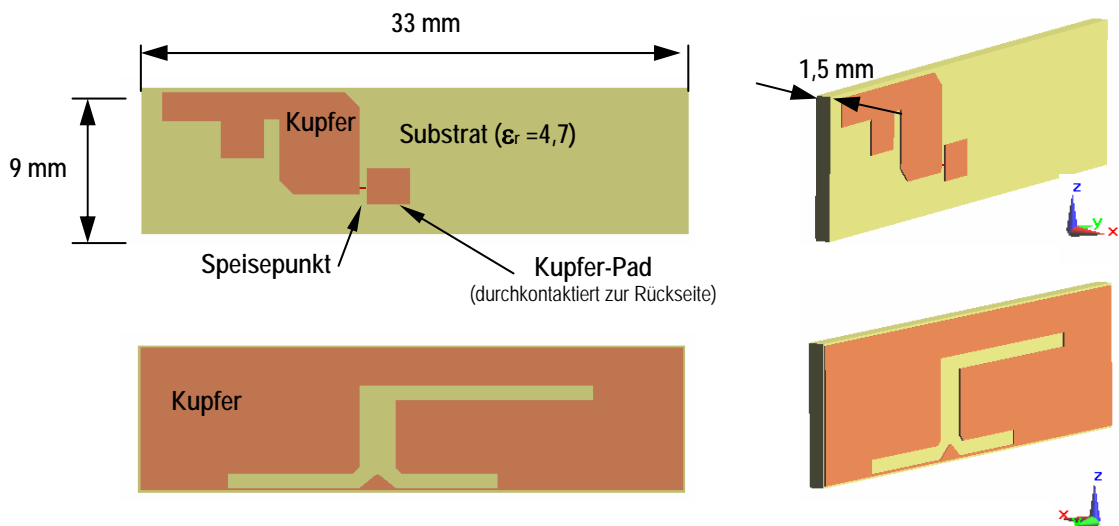


Abbildung 9.4: Numerisches Modell des Antennenmodells 2: Vorderseite (oben) und Rückseite (unten) in Draufsicht (links) und 3D-Ansicht (rechts).

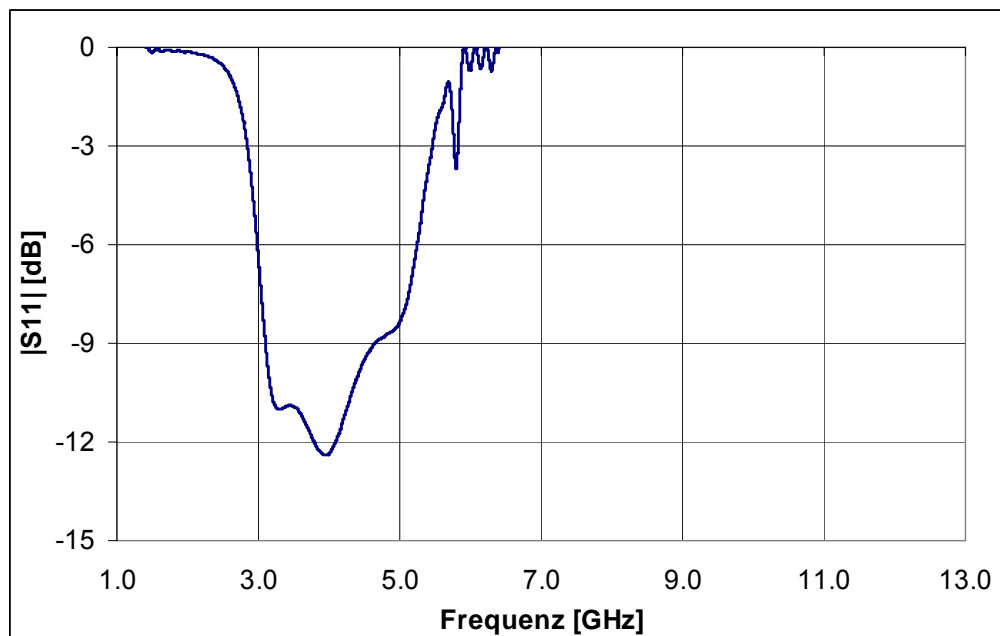


Abbildung 9.5: $|S_{11}|$ der Antennenmodells 2

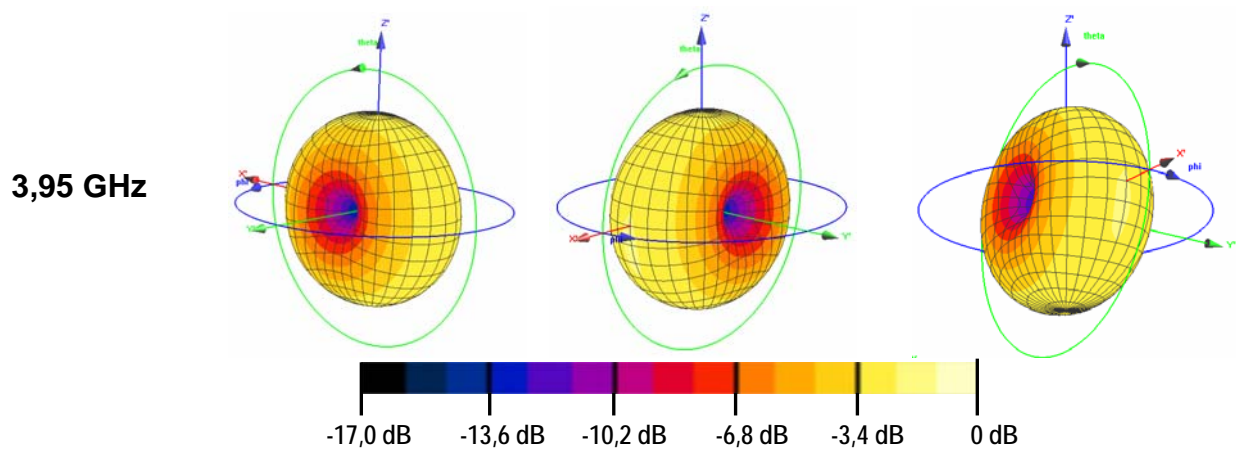


Abbildung 9.6: 3D-Abstrahlcharakteristik des Antennenmodells 2 bei der Mittenfrequenz in unterschiedlichen Ansichten

9.2.2 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 Kapitel 7.2.2 behandelte Modell eines ebenen geschichteten Gewebeblocks, der mit einer ebenen Welle beaufschlagt wird (Abbildung 9.7).

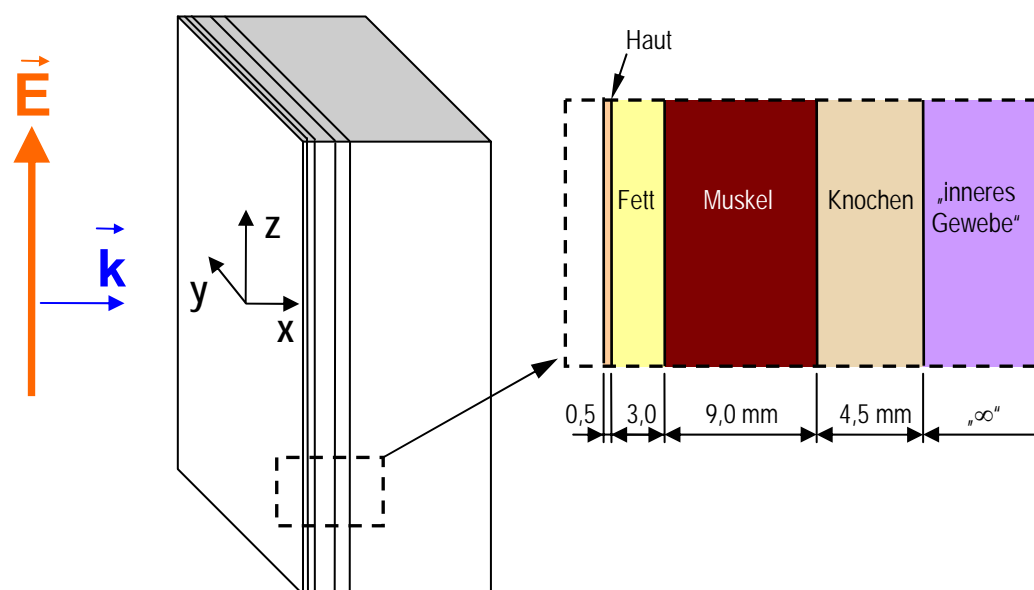


Abbildung 9.7: Schematische Darstellung des ebenen Schichtenmodells

Unter Berücksichtigung dispersiver Gewebeparameter werden zwei unterschiedliche spektrale Verteilungen der einfallenden ebenen Welle, gemäß den in Abbildung 9.8 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 9.9 zeigt die spektrale Verteilung der Leistungsflussdichten für die beiden Anregungsfälle.

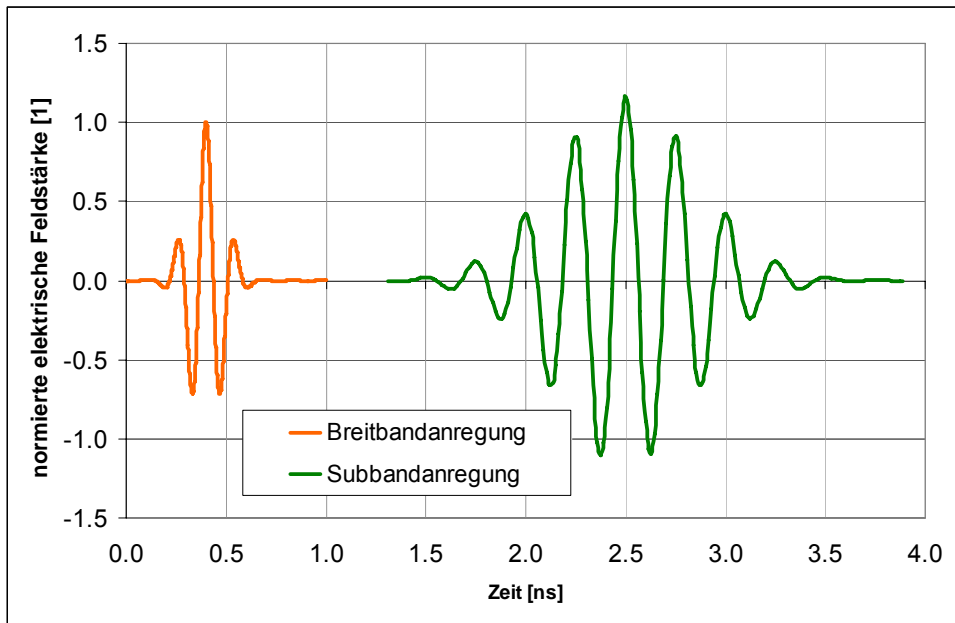


Abbildung 9.8: Zeitverläufe der beiden betrachteten Anregungen (normierte elektrische Feldstärke)

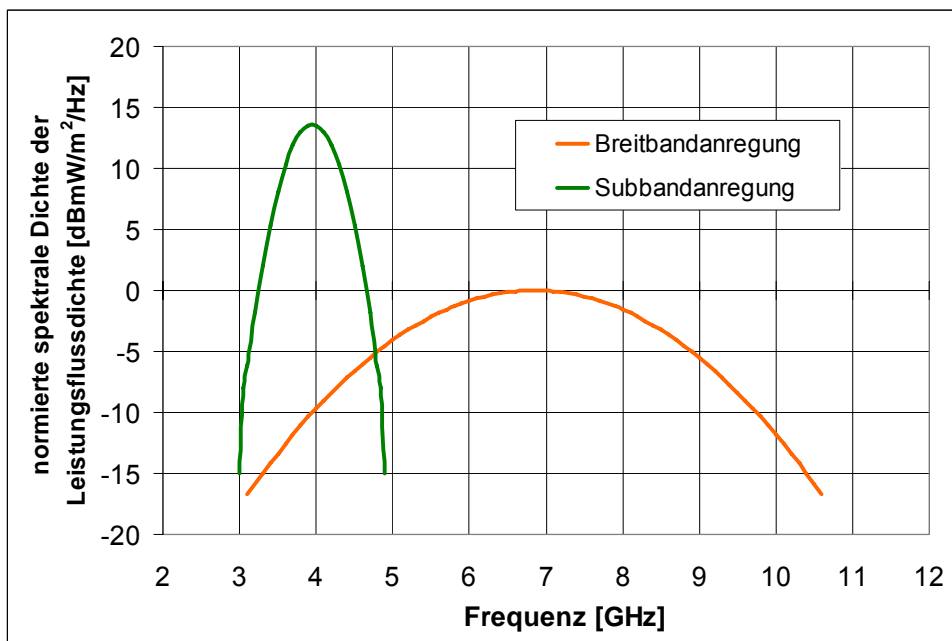


Abbildung 9.9: Normierte spektrale Verteilung der Leistungsflussdichte der einfallenden ebenen Welle für das Breitbandsignal und das Subbandsignal

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 9.10 zeigt den Verlauf der Berechnungsergebnisse für die auf den Maximalwert bei Breitbandanregung normierte Absorption entlang der x-Achse (vgl. Abbildung 9.7). 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.

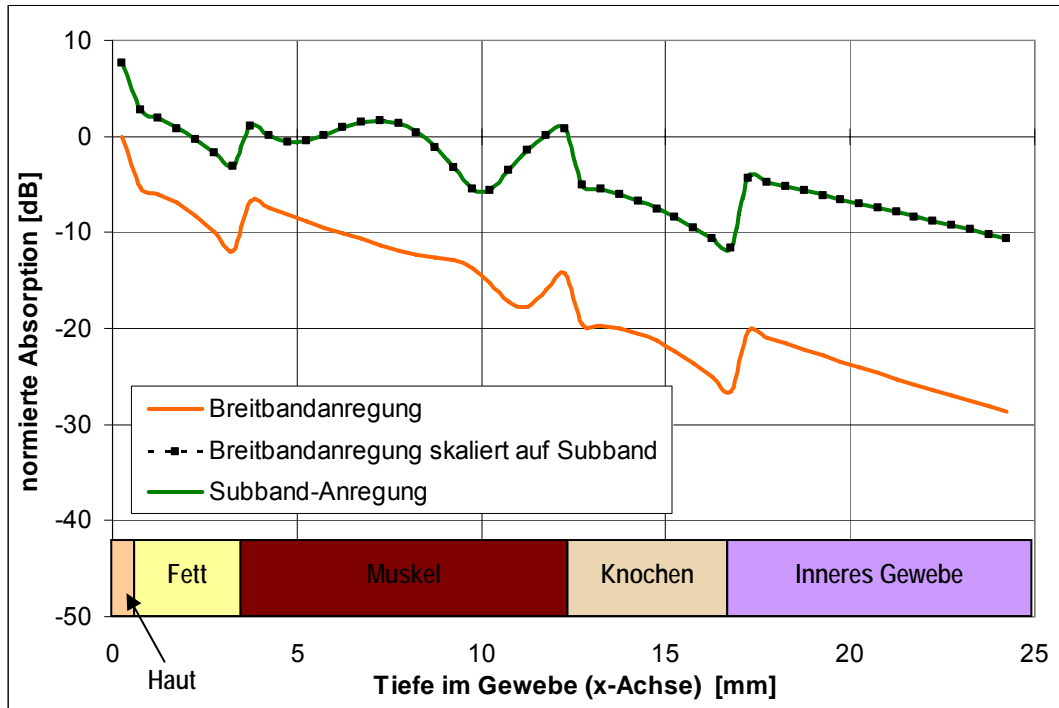


Abbildung 9.10: Vergleich von Berechnungsergebnissen für die normierte Absorption entlang der x-Achse (vgl. Abbildung 9.7).

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.

9.2.3 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 [3], [1] bzw. der Sendespektralmaske des WiMedia-Standards [8], [9] 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 ([3], [1]) 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 [3] und [1] 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 9.1 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 9.1 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 [1] bzw. zur Regulierung in Deutschland [3], 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 9.1: Gewählte Impulsparameter für die numerischen SAR-Berechnungen

Abbildung 9.11 und Abbildung 9.12 zeigen jeweils die Impulsformen und die spektrale EIRP Sendeleistungsdichte der in Tabelle 9.1 definierten Anregungsformen. Anzumerken ist, dass die Anregung „Vfg 1/2008 3,4-4,8 typisch“ in dieser Form nach [3] nur für Geräte mit Störminderungstechniken zulässig ist.

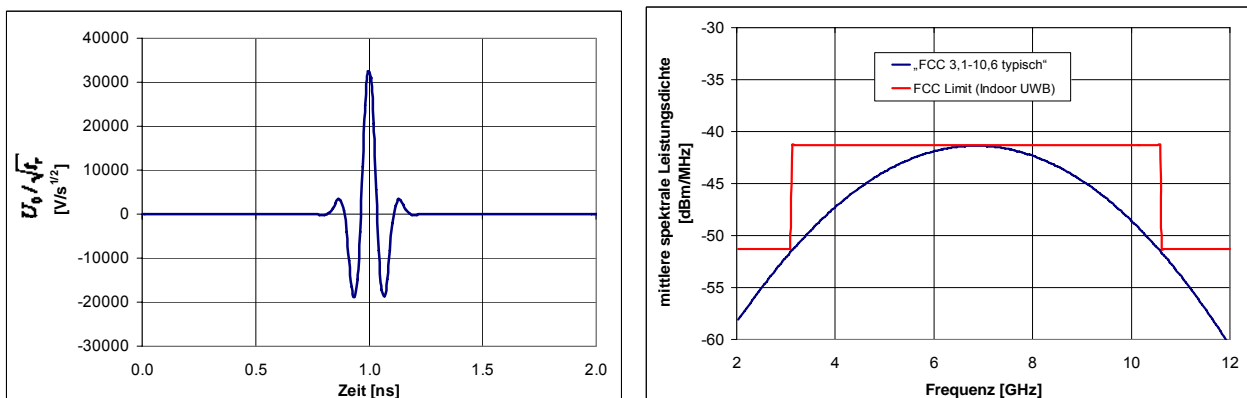


Abbildung 9.11: Impulsform und mittlere spektrale EIRP Sendeleistungsdichte der Anregung „FCC 3,1-10,6 typisch“

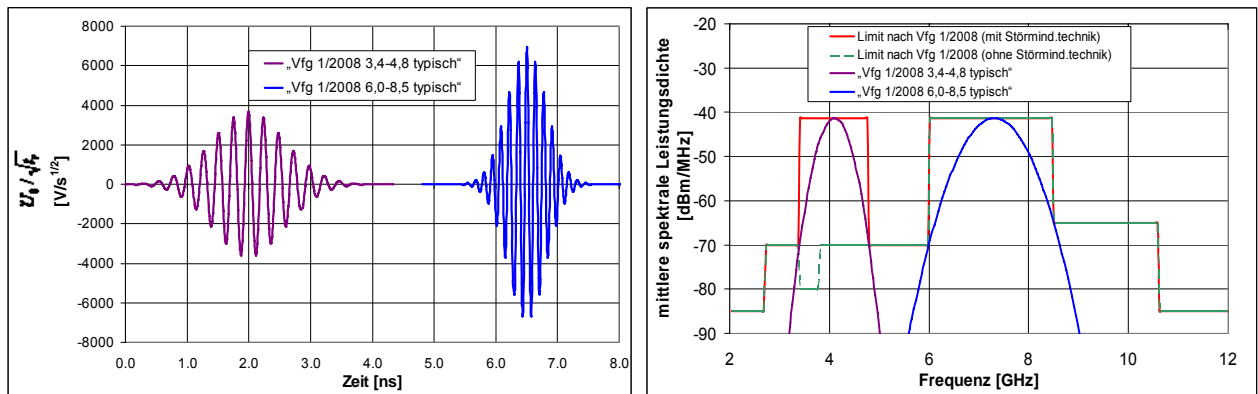


Abbildung 9.12: Impulsform und mittlere spektrale EIRP Sendeleistungsdichte der Anregungen „Vfg 1/2008 3,4-4,8 typisch“ und „Vfg 1/2008 6,0-8,5 typisch“

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 dBm/50MHz 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). 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 dBm/50 MHz liegt. Für die oben definierten Impulsformen führen die in Tabelle 9.2 angeführten Quellenleerlaufspannungs-Impulsamplituden U_0 auf diese maximal zulässige spektrale EIRP-Spitzensendeleistungsdichte von 0 dBm/50MHz. Dies gilt in einem 50 Ω System, wieder unter der Annahme von 0 dBi Antennengewinn und 100% Antenneneffizienz (keine Verluste in der Antenne). Weiters gibt Tabelle 9.2 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 9.2: Maximal zulässige Leerlauf-Quellenspannungs-Impulsamplituden (in einem 50 Ω System) der in Tabelle 9.1 definierten Impulsformen, die auf maximale spektrale EIRP-Spitzensendeleistungsdichten eines Einzelimpulses von 0 dBm/50MHz führen.

Die in Kapitel 9.4 zusammengefassten Ergebnisse hinsichtlich der maximal von regulierungskonformen UWB-Geräten verursachten SA im Körper beruhen auf Berechnungen mit den in Tabelle 9.2 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 9.3 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 9.1 und Tabelle 9.2) 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 9.3: 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 9.4: Theoretisch maximal mögliche Sendeleistungsdichtespektren von UWB-Geräten nach WiMedia Standard [8],[9] wie sie für die Absorptionsberechnungen verwendet wurden.

Tabelle 9.4 fasst schließlich in ähnlicher Weise die für die Absorptionsberechnungen betrachteten Spektren von MB-OFDM-UWB-Geräten nach WiMedia-Standard [8],[9] 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.

9.3 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. [36] 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 9.5: 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 9.5 zusammengefassten Dispersionsparametern lagen die Abweichungen von den Zielwerten nach Gabriel [36] innerhalb des interessierenden Frequenzbereichen von 3,1-10,6 GHz bei weniger als $\pm 5\%$.

9.4 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 [64] beschriebenen.

9.4.1 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 9.13 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 9.2.3. Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse wurden unter der Annahme der Ausschöpfung der Sendeleistungslimits der Regulierungen [3] und [1], 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.

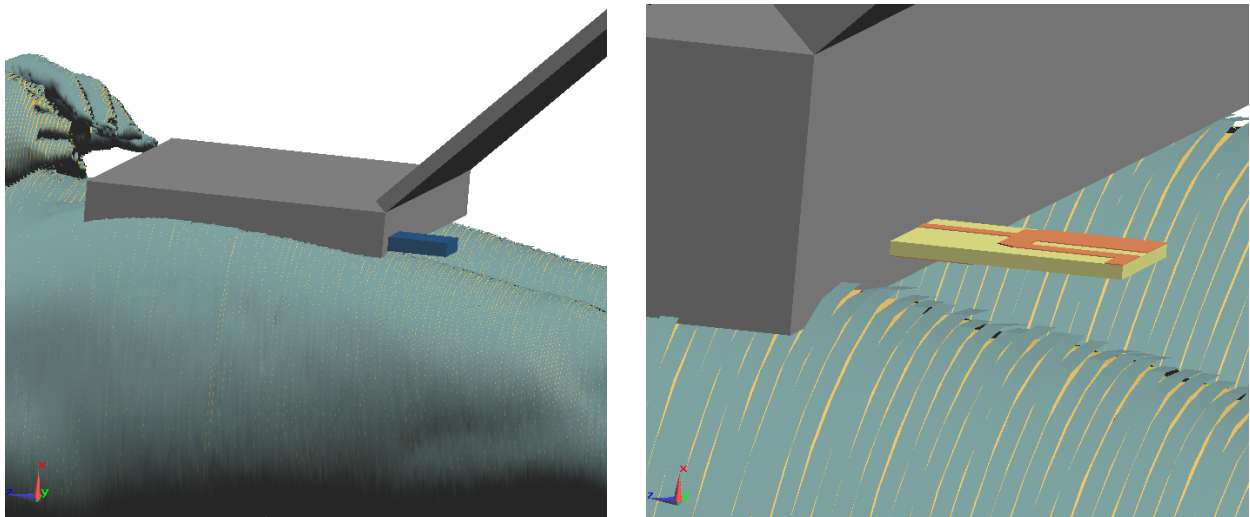


Abbildung 9.13: SEMCAD X Modell des Szenarios 1: Notebook mit externem UWB-Funkmodul auf Oberschenkel

Abbildung 9.14 und Abbildung 9.15 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.

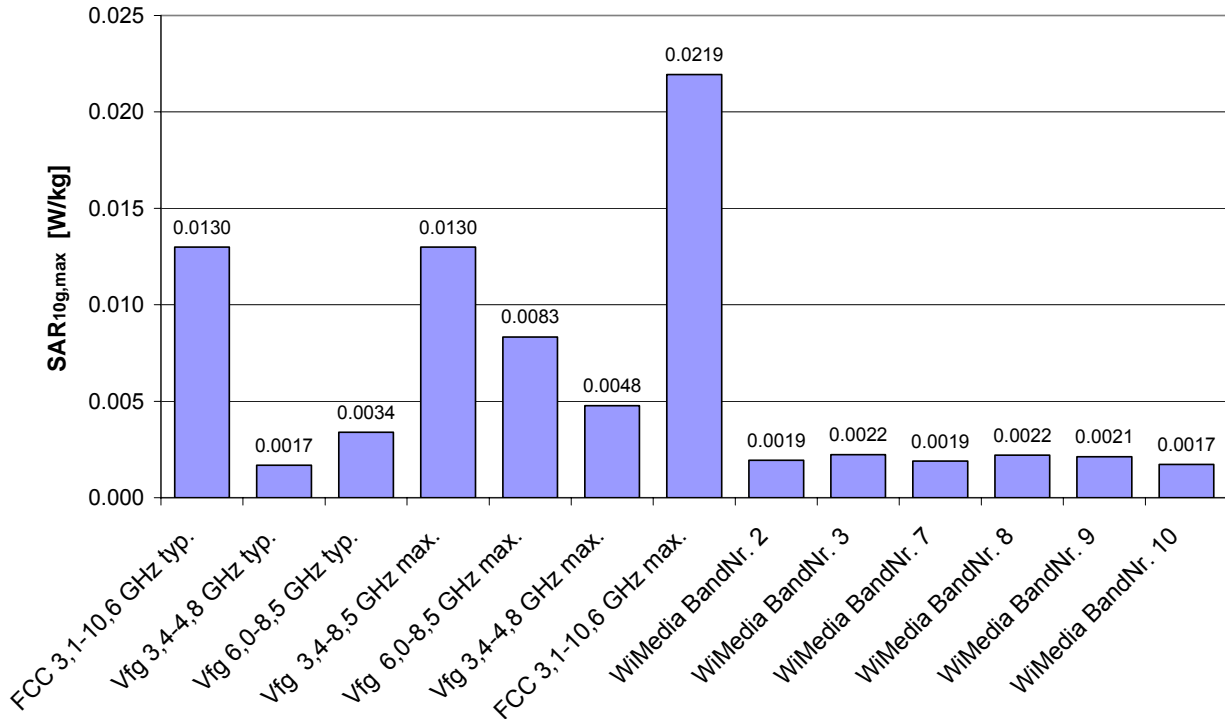


Abbildung 9.14: Maximale über 10g Gewebe gemittelte SAR in Szenario 1 für die unterschiedlichen betrachteten spektralen Anregungsformen (vgl. Kapitel 9.2.3)

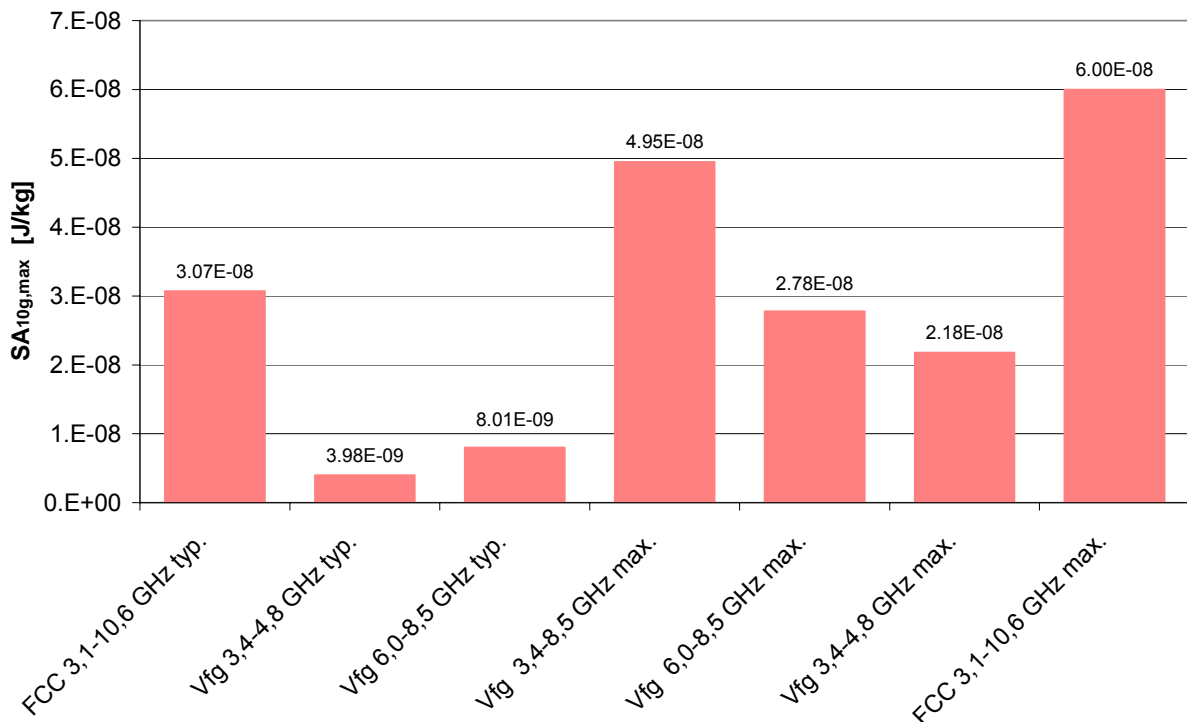


Abbildung 9.15: Maximale über 10g Gewebe gemittelte SA in Szenario 1 für die unterschiedlichen betrachteten spektralen Anregungsformen (vgl. Kapitel 9.2.3)

Die Berechnungsergebnisse zeigen erwartungsgemäß sehr geringe SAR_{10g} und SA_{10g} Werte. Speziell für die zu Vfg 1/2008 [3] 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 [61] 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 9.16 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.“.

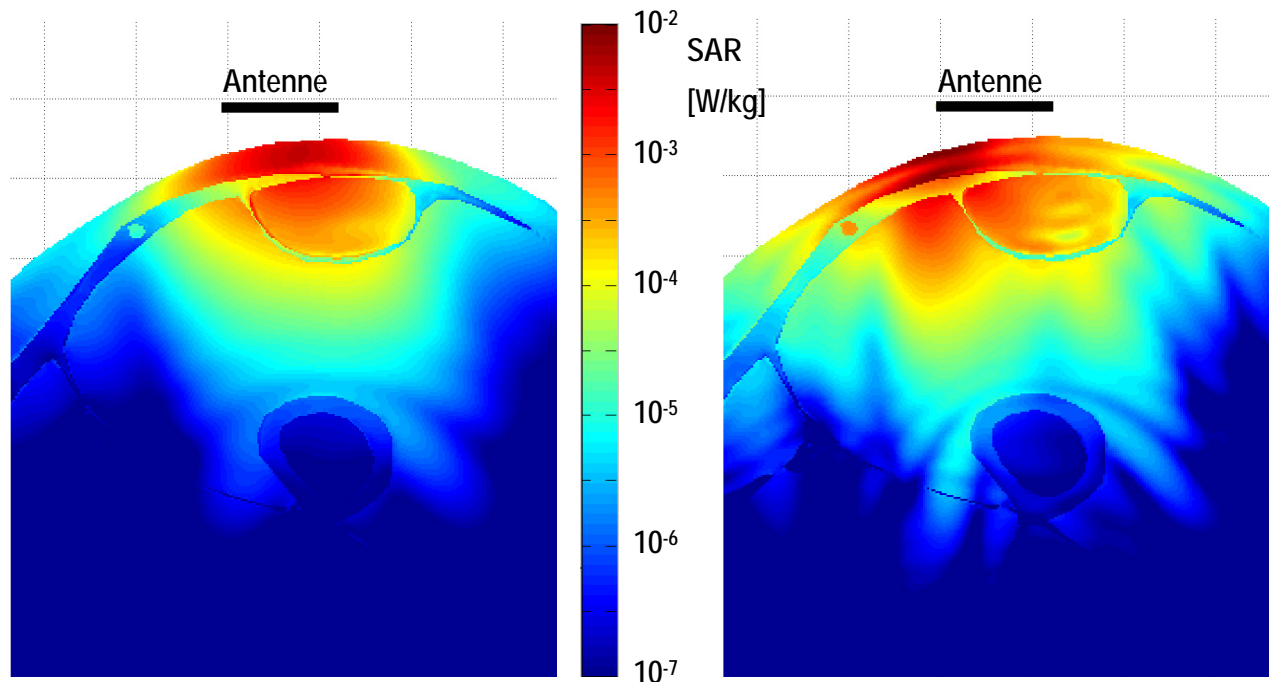


Abbildung 9.16: SAR-Verteilung in einem Querschnitt des Oberschenkels unterhalb der Antenne für die Anregungsformen „Vfg 1/2008 3,4-4,8 GHz, typ.“ (links) und „Vfg 1/2008 6,0-8,5 GHz, typ.“ (rechts)

9.4.2 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. [65], [66]). 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 9.17 zeigt das in SEMCAD X erstellte Modell einer derartigen Anwendung unter Verwendung des breitbandigen Antennenmodells 1. Zusätzlich zur Antenne wurden auch zwei elektrisch ideal leitende EEG-Elektroden nahe dem Funkmodul modelliert. Der ebenfalls in Abbildung 9.17, links erkennbare Befestigungsgurt für die EEG-Elektroden (zwischen Antenne und Kopf) wurde als verlustloses 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 9.2.3. Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse wurden unter der Annahme der Ausschöpfung der Sendeleistungslimits der Regulierungen [3] und [1], 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.

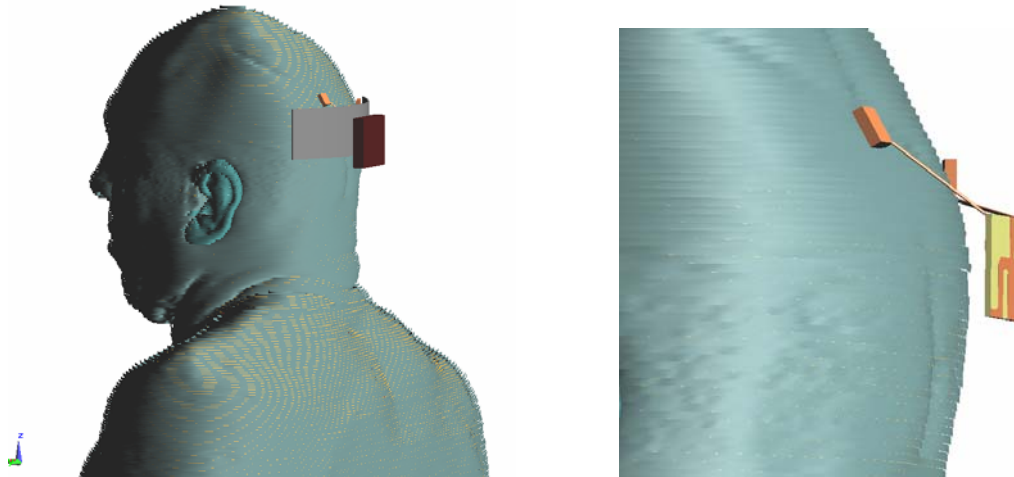


Abbildung 9.17: SEMCAD X Modell des Szenarios 2: EEG-System mit UWB-Funkmodul im Hinterkopfbereich

Abbildung 9.18 und Abbildung 9.19 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.

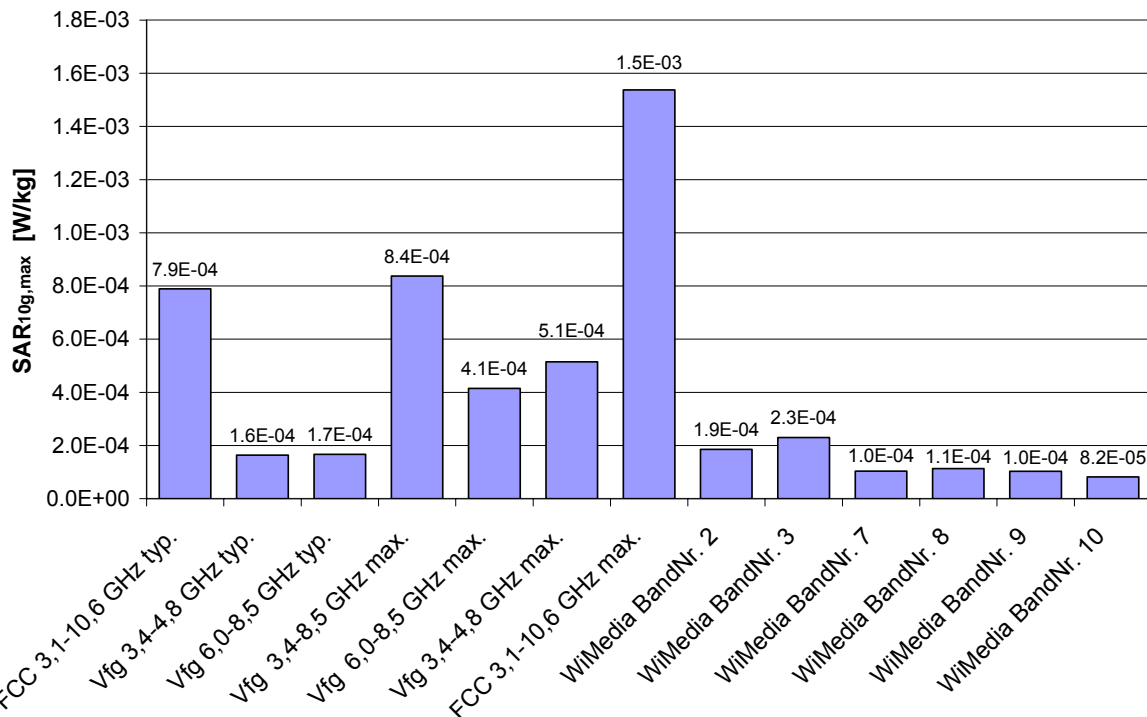


Abbildung 9.18: Maximale über 10g Gewebe gemittelte SAR in Szenario 2 für die unterschiedlichen betrachteten spektralen Anregungsformen (vgl. Kapitel 9.2.3)

Die Berechnungsergebnisse zeigen wieder sehr geringe SAR_{10g} und SA_{10g} Werte. Speziell für die zu VfG 1/2008 [3] 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 [61] von 2 W/kg (Allgemeinbevölkerung, Kopf). Das Verhältnis der maximalen SA_{10g} zum entsprechenden Basiswert nach ICNIRP beträgt sogar weniger als 0,0002%.

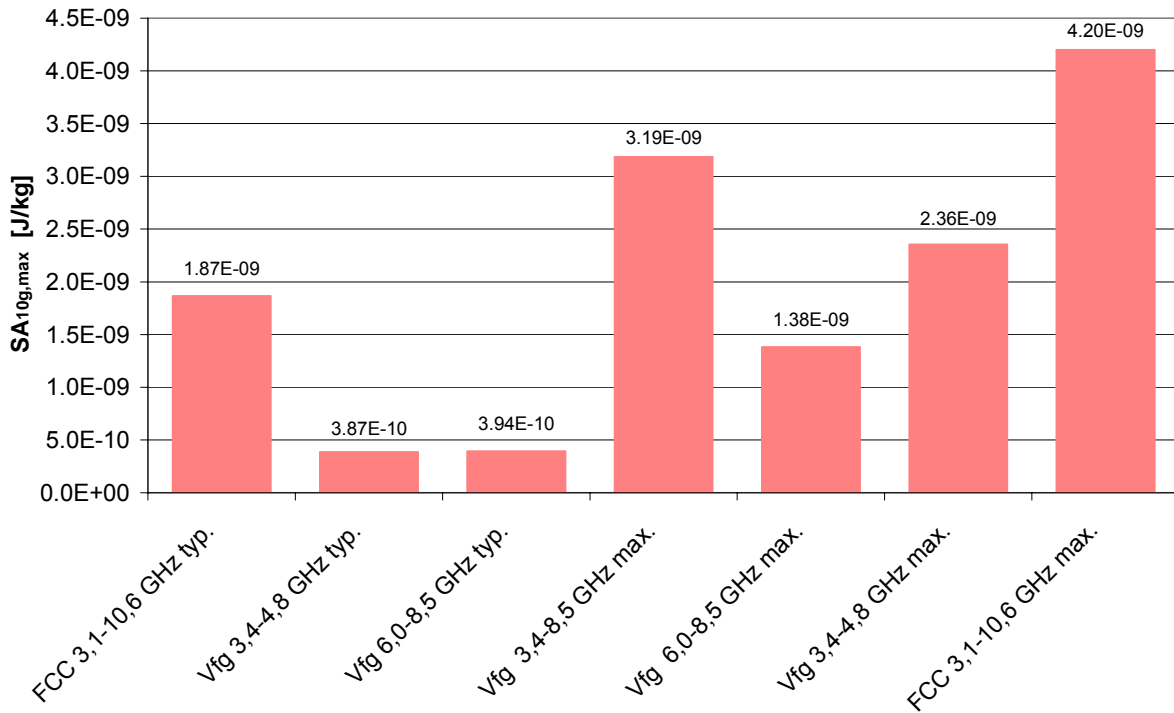


Abbildung 9.19: Maximale über 10g Gewebe gemittelte SA in Szenario 2 für die unterschiedlichen betrachteten spektralen Anregungsformen (vgl. Kapitel 9.2.3)

Abbildung 9.20 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.“.

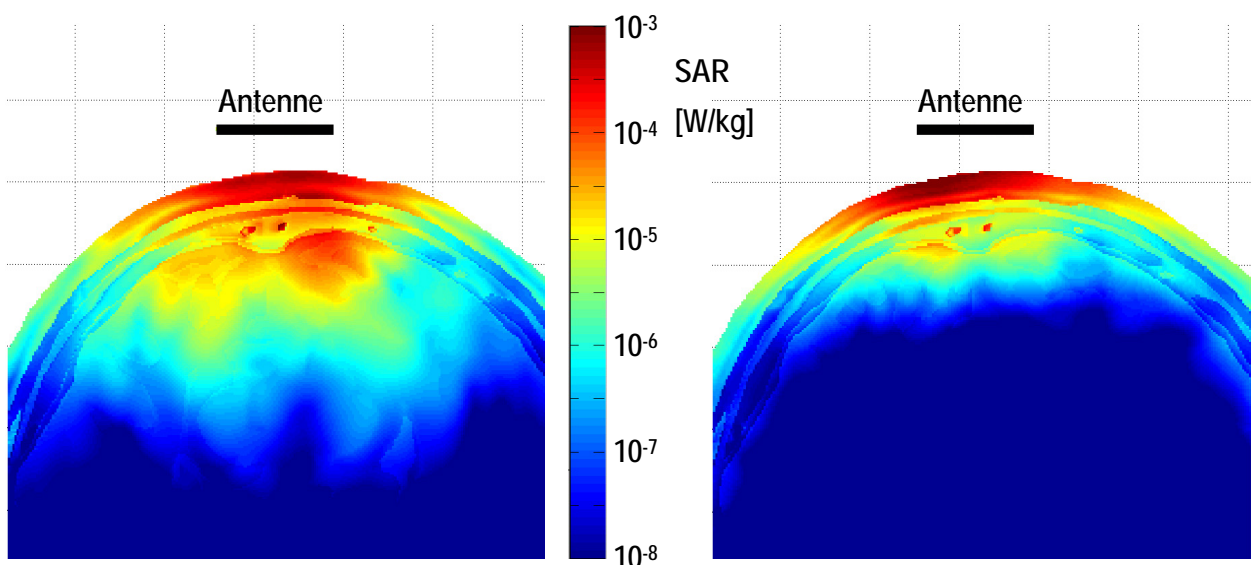


Abbildung 9.20: SAR-Verteilung in einem Horizontalschnitt durch den Kopf auf Höhe der Antennenmitte für die Anregungsformen „VfG 1/2008 3,4-4,8 GHz, typ.“ (links) und „VfG 1/2008 6,0-8,5 GHz, typ.“ (rechts)

9.4.3 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. [67]). 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 9.21 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 9.2.3. Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse wurden unter der Annahme der Ausschöpfung der Sendeleistungslimits der Regulierungen [3] und [1], 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.

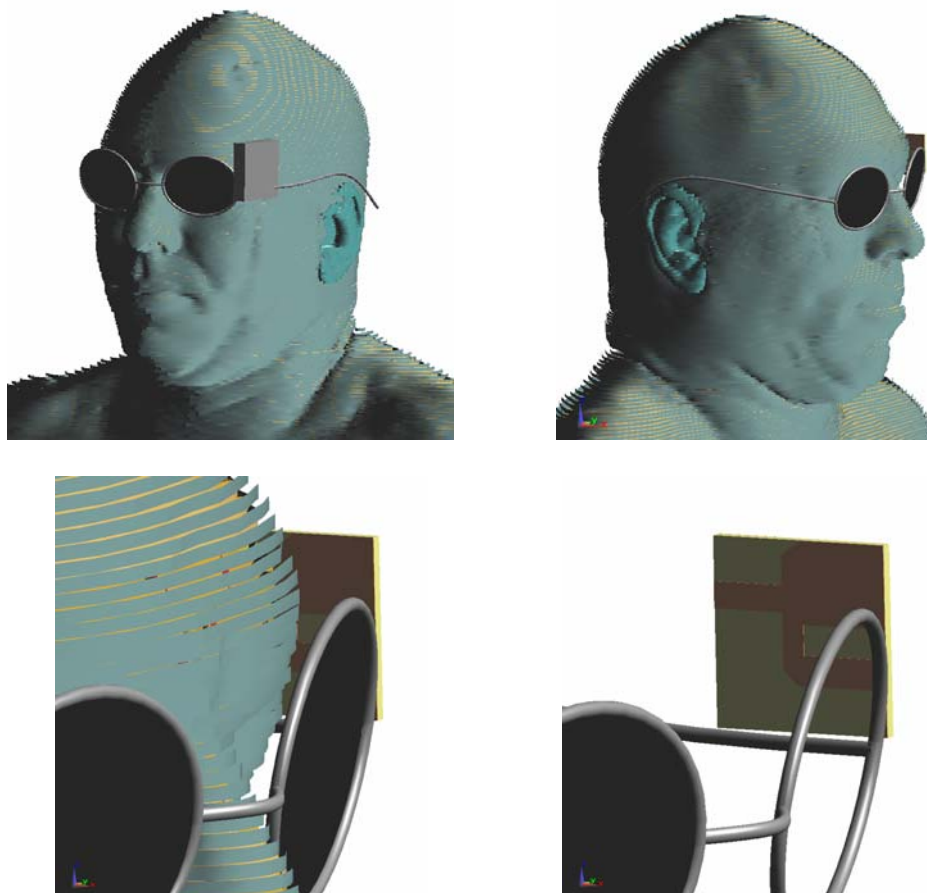


Abbildung 9.21: SEMCAD X Modell des Szenarios 3: Videobrille mit UWB-Funkmodul

Abbildung 9.22 und Abbildung 9.23 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.

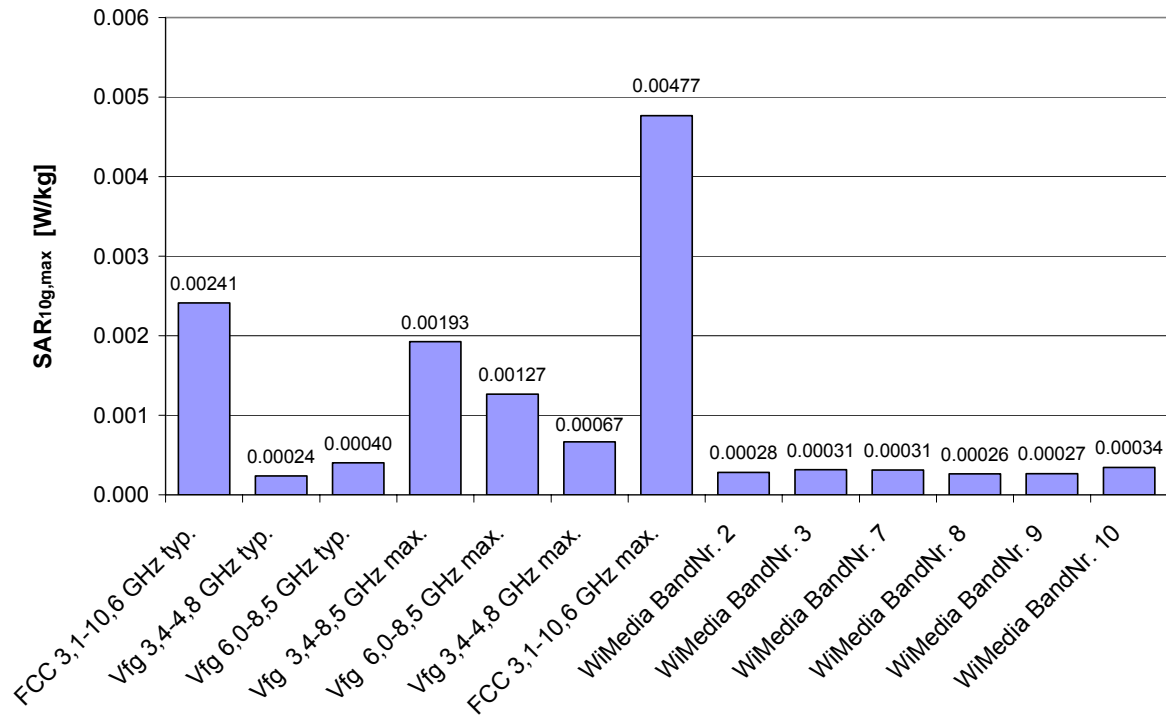


Abbildung 9.22: Maximale über 10g Gewebe gemittelte SAR in Szenario 3 für die unterschiedlichen betrachteten spektralen Anregungsformen (vgl. Kapitel 9.2.3)

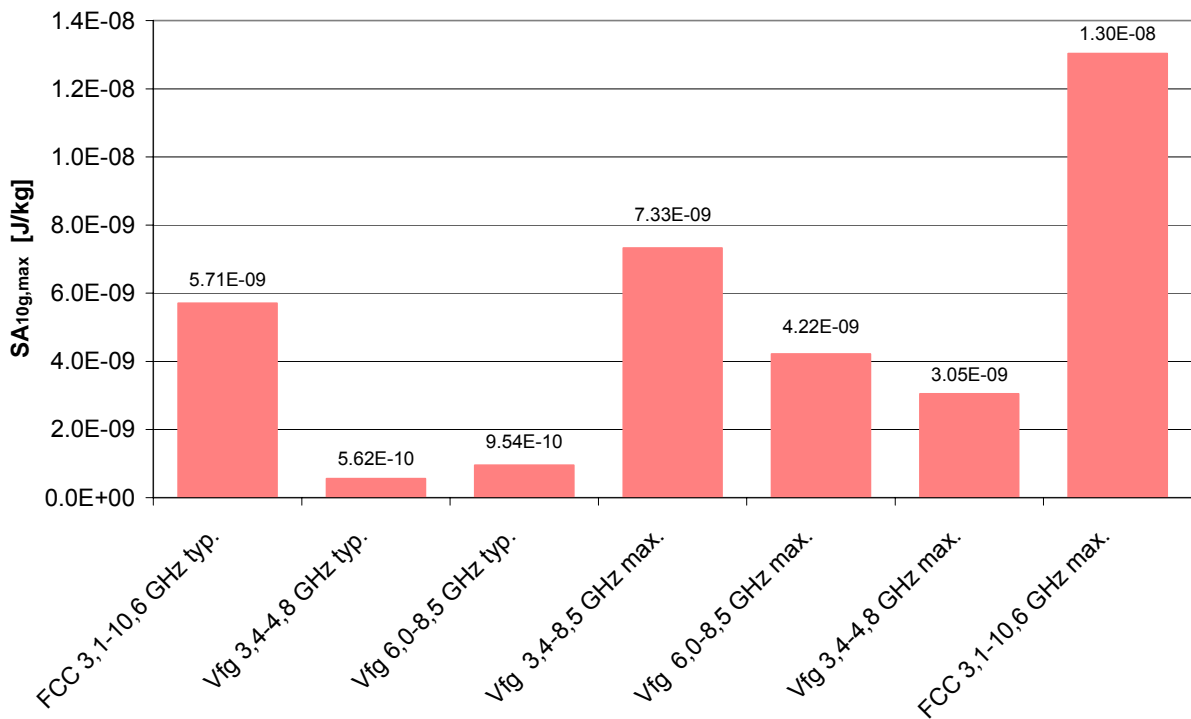


Abbildung 9.23: Maximale über 10g Gewebe gemittelte SA in Szenario 3 für die unterschiedlichen betrachteten spektralen Anregungsformen (vgl. Kapitel 9.2.3)

Die Berechnungsergebnisse zeigen wieder sehr geringe SAR_{10g} und SA_{10g} Werte. Speziell für die zu VfG 1/2008 [3] 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 [61] von 2 W/kg (Allgemeinbevölkerung, Kopf). Das Verhältnis der maximalen SA_{10g} zum entsprechenden Basiswert nach ICNIRP beträgt sogar weniger als 0,0004%.

Abbildung 9.24 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.“.

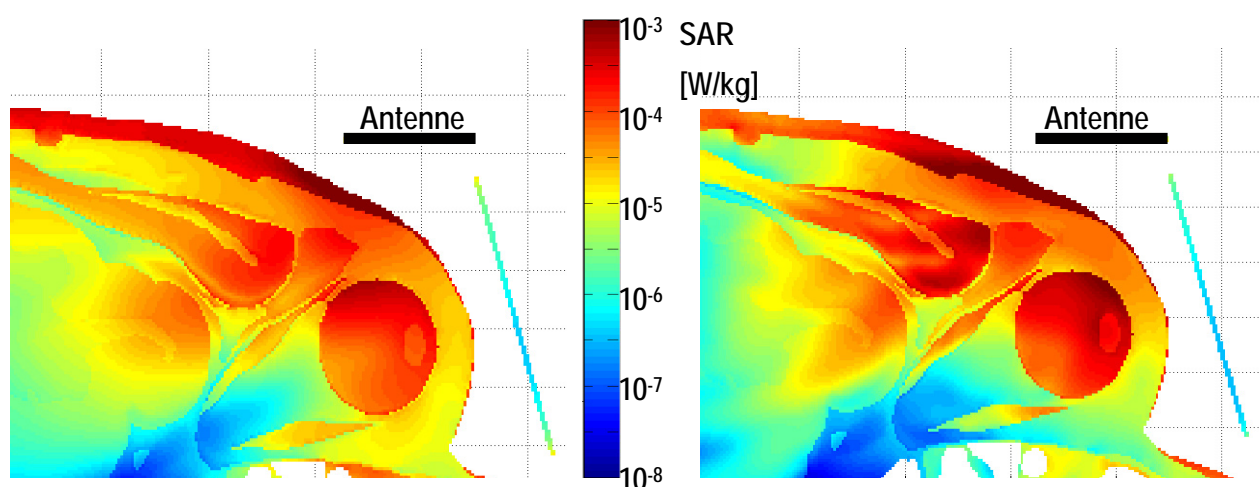


Abbildung 9.24: SAR-Verteilung in einem Horizontalschnitt durch den Kopf im Bereich des linken Auges auf Höhe der Antennenmitte für die Anregungsformen „Vfg 1/2008 3,4-4,8 GHz, typ.“ (links) und „Vfg 1/2008 6,0-8,5 GHz, typ.“ (rechts)

9.4.4 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 WBAN¹²-Anwendungen).

Abbildung 9.25 zeigt das in SEMCAD X erstellte Modell dieses Szenarios, wobei hier 2 unterschiedliche Varianten unter Verwendung beider Antennenmodelle aus Kapitel 9.2.1 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 9.2.3, wobei bei den Berechnungen mit Antennenmodell 2 naturgemäß nur spektrale Anregungen im Frequenzbereich zwischen 3,1 GHz und 4,8 GHz betrachtet wurden.

¹² 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.

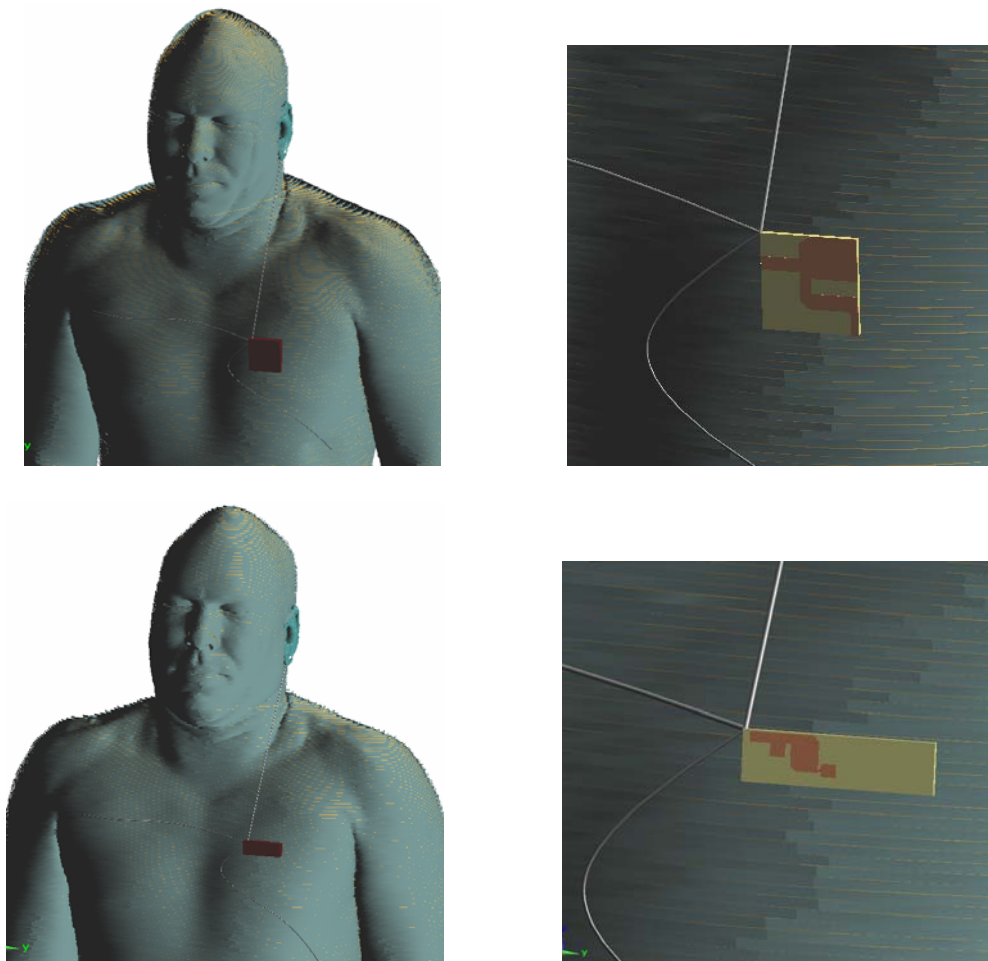


Abbildung 9.25: SEMCAD X Modell des Szenarios 4: UWB-Funkmodul im Brustbereich, oben: Variante mit breitbandigem Antennenmodell 1, unten: Variante mit Antennenmodell 2

Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse wurden unter der Annahme der Ausschöpfung der Sendeleistungslimits der Regulierungen [3] und [1], 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 Gewinne (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 9.26 und Abbildung 9.27 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 9.28 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.

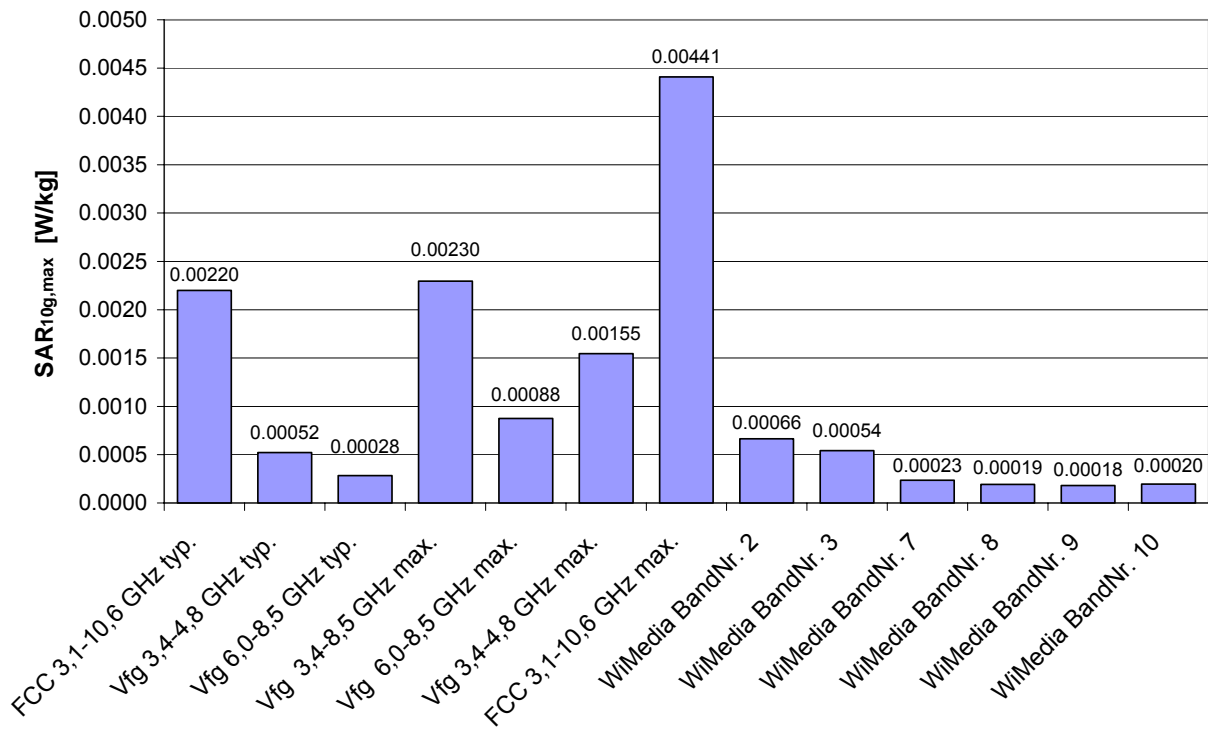


Abbildung 9.26: Maximale über 10g Gewebe gemittelte SAR in Szenario 4 bei Verwendung des breitbandigen Antennenmodells 1 für die unterschiedlichen betrachteten spektralen Anregungsformen (vgl. Kapitel 9.2.3)

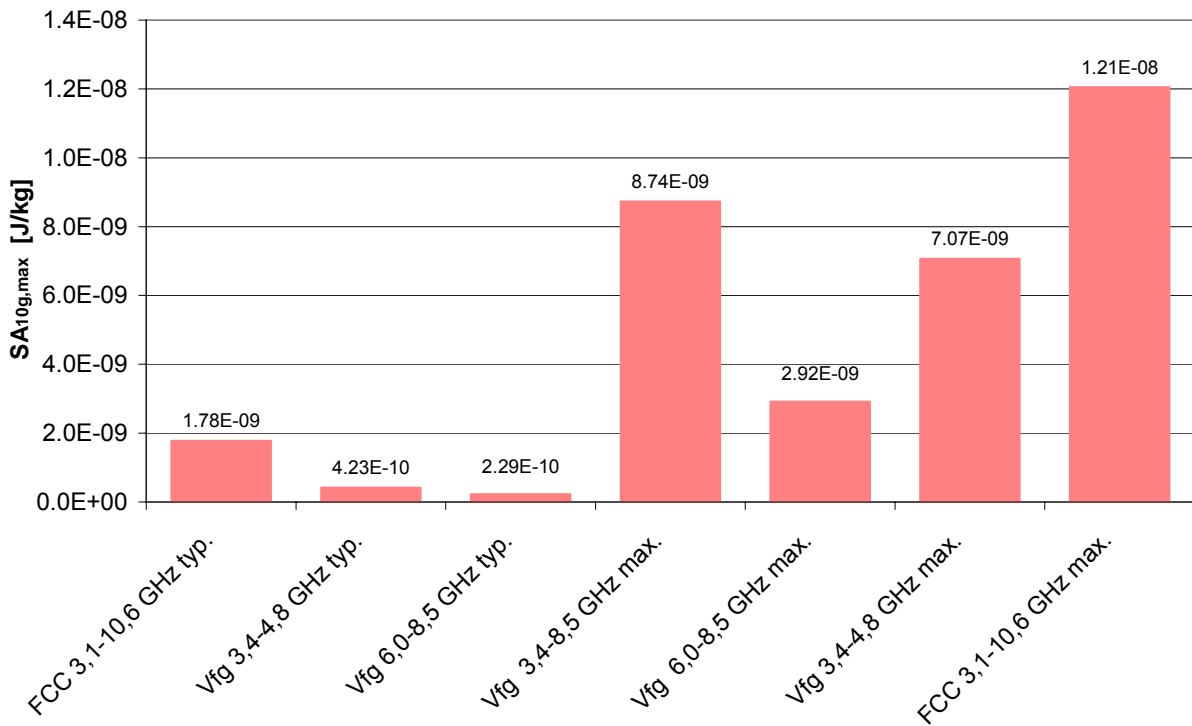


Abbildung 9.27: Maximale über 10g Gewebe gemittelte SA in Szenario 4 bei Verwendung des breitbandigen Antennenmodells 1 für die unterschiedlichen betrachteten spektralen Anregungsformen (vgl. Kapitel 9.2.3)

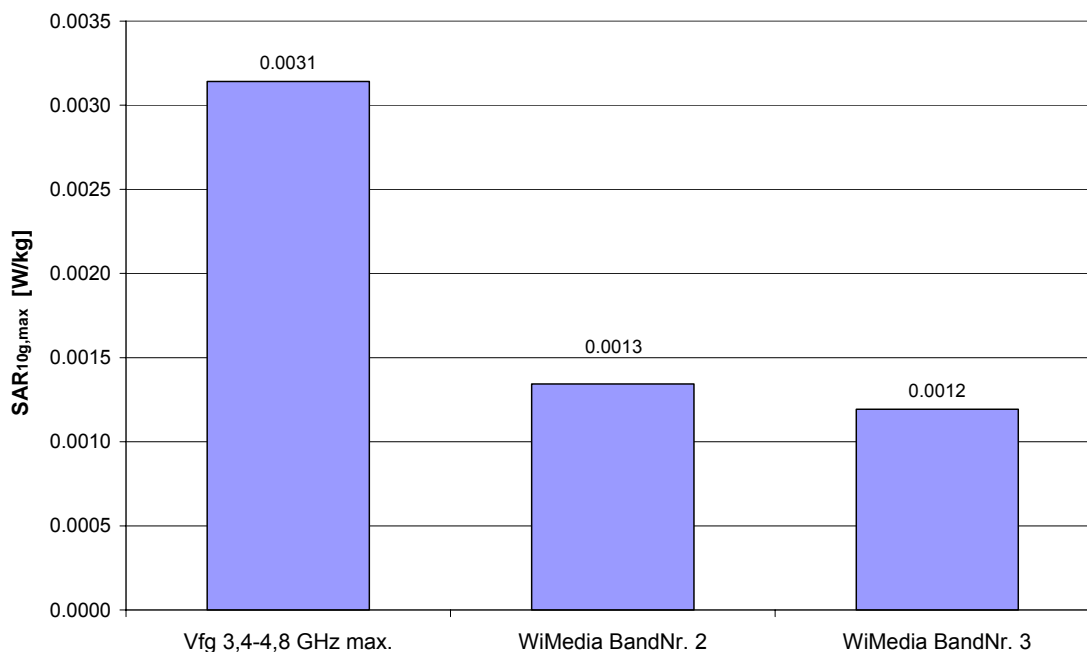


Abbildung 9.28: Maximale über 10g Gewebe gemittelte SAR in Szenario 4 bei Verwendung des Antennenmodells 2 für die unterschiedlichen betrachteten spektralen Anregungsformen im Nutzfrequenzbereich des Antennenmodells (vgl. Kapitel 9.2.3)

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 [3] konformen Anregungsformen ergeben sich selbst bei Annahme von 100% spektraler Effizienz maximale SAR_{10g} Werte von weniger als 0,12% des Basiswertes nach ICNIRP [61] 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 9.29 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 9.29 dargestellten Schnittbildern um die (anatomisch) gleiche Schnittebene handelt. Im Bereich dieser Ebene führt Antennenmodell 2 offensichtlich wesentlich höhere Ströme als Antennenmodell 1.

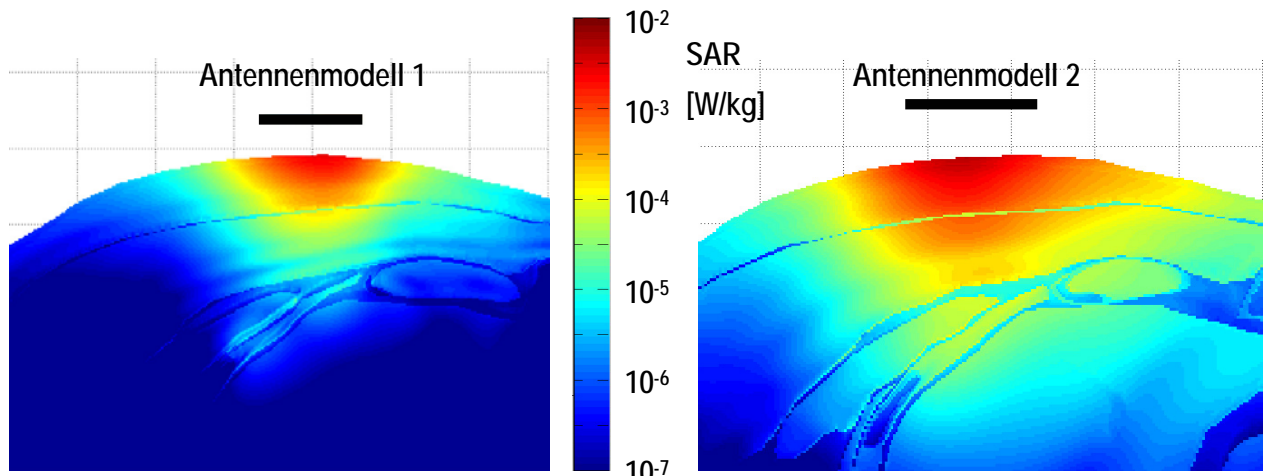


Abbildung 9.29: SAR-Verteilungen in einem Horizontalschnitt durch den Brustkorb im Bereich des Herzens auf Höhe der Antennenmitte für die Anregungsform „Vfg 1/2008 3,4-4,8 GHz, max.“, links: Befeldung mit Antennenmodell 1, rechts: Befeldung mit Antennenmodell 2

9.4.5 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 9.30 zeigt das in SEMCAD X erstellte Modell.

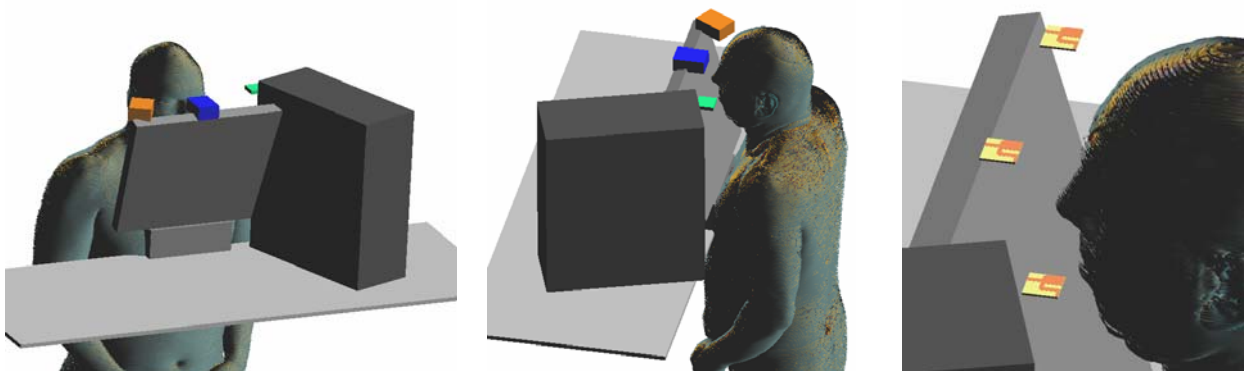


Abbildung 9.30: SEMCAD X Modell des Szenarios 5: Exposition des Kopfes mit 3 gleichzeitig aktiven UWB-Quellen.

Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse wurden unter der Annahme der Ausschöpfung der Sendeleistungslimits der Regulierungen [3] und [1], bei Berücksichtigung eines mittleren Antennengewinns von 3 dBi berechnet.

Abbildung 9.31 zeigt zur Illustration eine Sequenz von Momentaufnahmen der elektrischen Feldstärkeverteilung in einer Horizontalebene durch den Kopf in Zeitschritten von 0,5 ns.

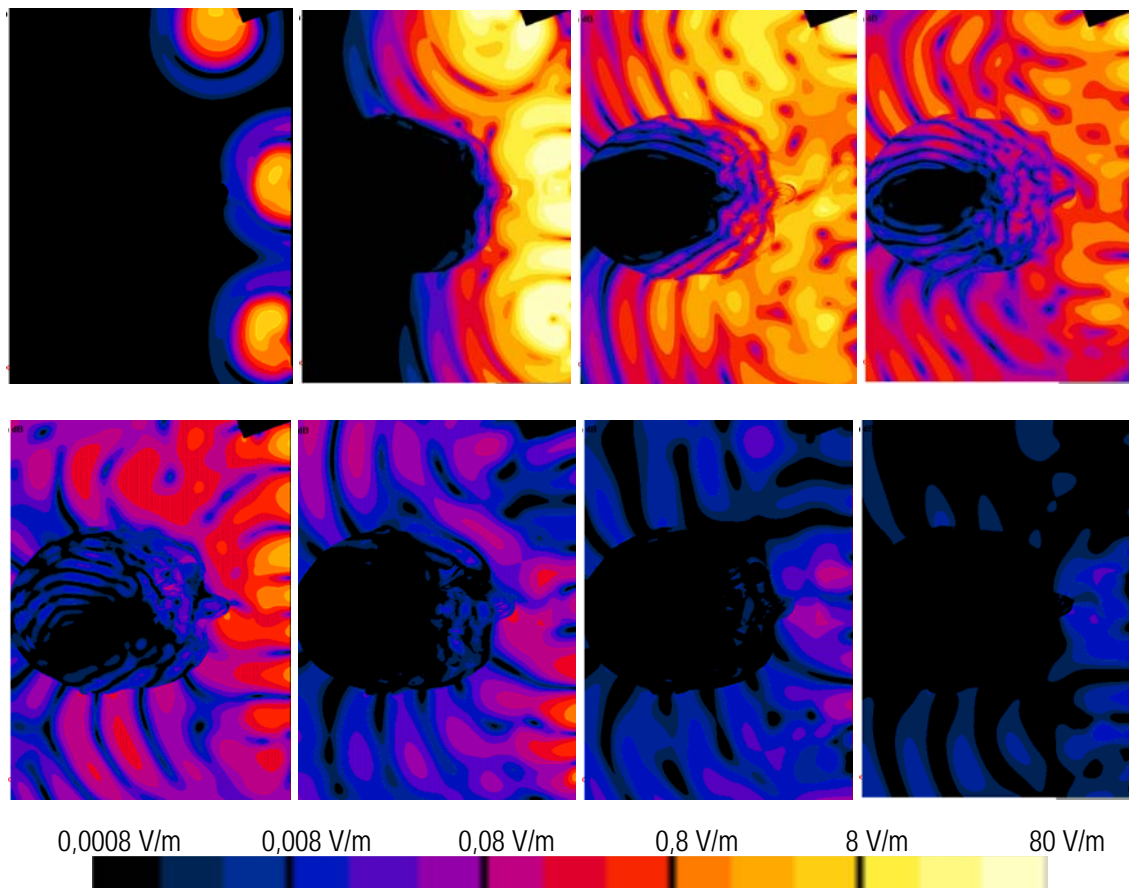


Abbildung 9.31: Sequenz von Momentaufnahmen (Zeitschritt 0,5 ns) der elektrischen Feldstärke in einer Horizontalebene durch den Kopf (Quellen-Leerlaufspannungsamplitude 7,9 V pro Quelle)

Die maximale über 10g Gewebe gemittelte SAR trat in dieser Situation im Bereich der Nasenspitze auf. Abbildung 9.32 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 [61] 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%.

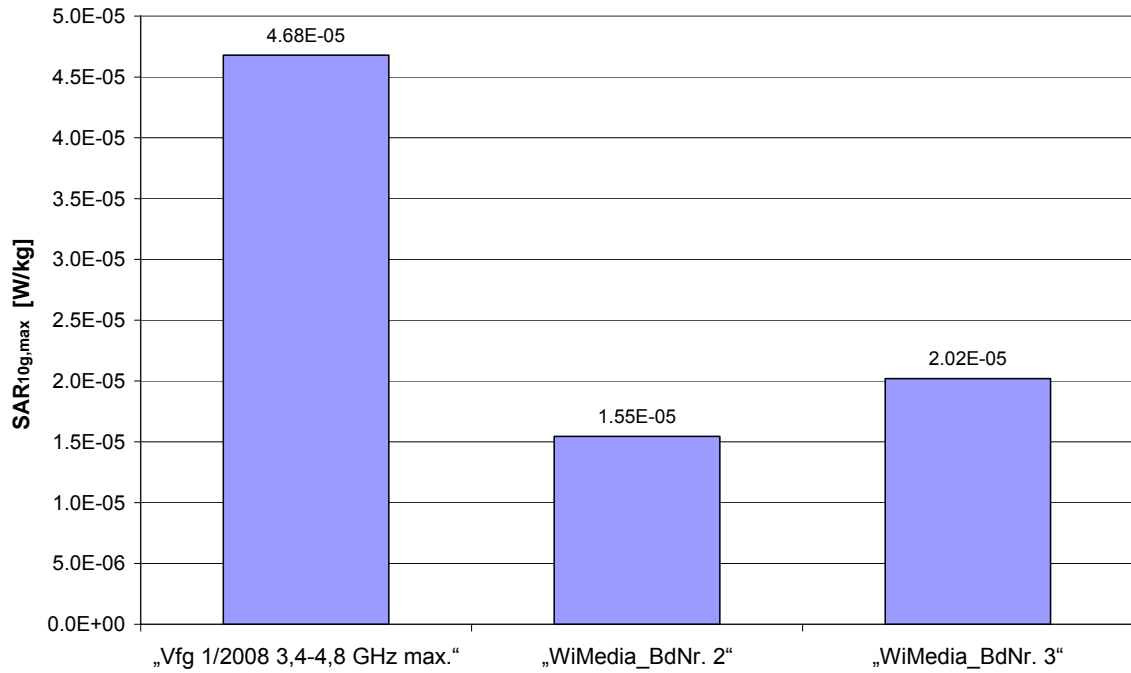


Abbildung 9.32: Maximale über 10g Gewebe gemittelte SAR in Szenario 5 für die unterschiedlichen betrachteten spektralen Anregungsformen (vgl. Kapitel 9.2.3)

Abbildung 9.33 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.“.

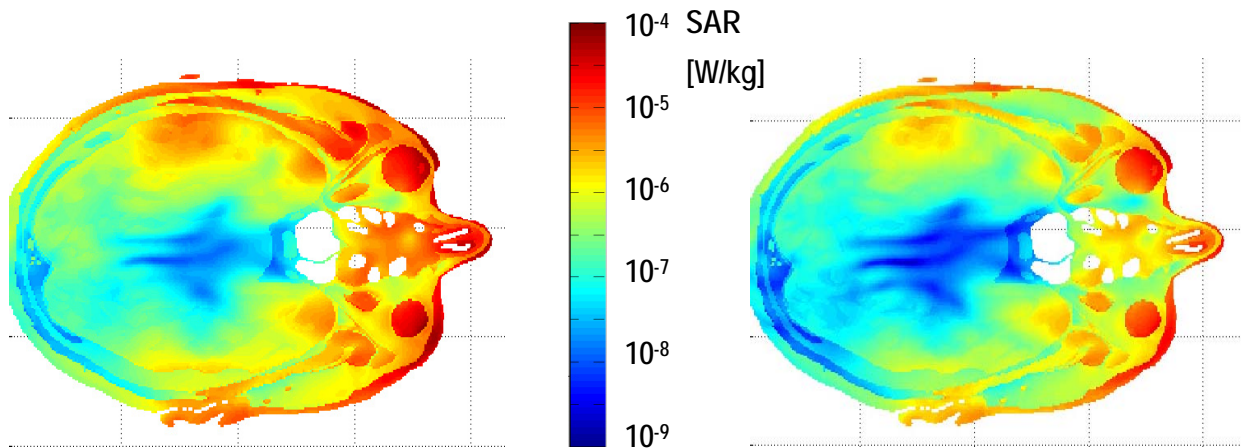


Abbildung 9.33: SAR-Verteilung in einem Horizontalschnitt durch den Kopf auf Höhe der Antennen für die Anregungsformen „Vfg 1/2008 3,4-4,8 GHz, typ.“ (links) und „WiMedia Band 2.“ (rechts)

10 BEURTEILUNG DER MESS- UND BERECHNUNGSERGEBNISSE

10.1 Exposition im Fernfeld von UWB-Geräten

Die durchgeführten Messungen und numerischen Berechnungen bestätigen die bereits auf Basis theoretischer Überlegungen ableitbare Erkenntnis (vgl. Kapitel 6.1), dass zur Funkregulierung (nach [1],[2],[3]) konforme UWB-Geräte im Frequenzbereich von 3,1-10,6 GHz Hochfrequenzimmissionen verursachen, die mehrere Größenordnungen unterhalb der derzeit anerkannten Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung (z.B. nach ICNIRP [61]) 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 [61] 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 [61] 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 [61].

Zum Vergleich der von UWB-Geräten zu erwartenden Immissionen mit anderen „Short Range“ Übertragungsverfahren fasst Tabelle 10.1 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-Geräten werden demnach deutlich

unterhalb dieses Wertes, typischerweise im Bereich von ca. 0,005-0,05 mW/m² liegen (vgl. Messergebnisse in Kapitel 8.4). Dies entspricht 0,00005-0,0005% des Referenzwertes. Aus einer ausführlichen Arbeit zum Thema der DAB und DVB-T Immissionen in Deutschland [73], [74] wurde das 50. Perzentil (p50) der Gesamtimmissionen von DAB und DVB-T zu ca. 0,0051 mW/m² bestimmt (basierend auf der Auswertung von 200 Immissionspunkten in Deutschland). Unter der Annahme eines mittleren Referenzwertes ([61]) im DAB- und DVB-T Frequenzbereich von ca. 3 W/m², entspricht der ermittelte p50 Wert daher ca. 0,00017% 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	[68],[69]
DECT Basisstation (1 Gespräch)	10-65	0,24-17	9700	[68],[69],[71],[72]
WLAN Access Point	4-183	2,7-6	10000	[39],[70],[71],[72]
WLAN Einsteckkarten	12-150	0,06-8	10000	[72]
Bluetooth Klasse 1	40	0,54	10000	[71]
Bluetooth Klasse 2	0,42	0,06	10000	[71]
Drahtlose Kopfhörer (Sender)	-	0,05-0,33	4320	[68],[69]
Drahtlose Maus/Tastatur	< 6	<< 6	2000	[71]
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 10.1: 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 [1],[2],[3]) 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 [61] 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 [61] beurteilte tatsächliche relative Impuls-Belastung wird sogar noch geringer sein.

10.2 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 ([45]-[52]), 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 [2], bzw. deutscher [3] UWB-Regulierung zulässige Sendespektrum zu 0,013 W/kg. Bei Zugrundelegung des Basiswertes für lokale Befeldung von Kopf und Rumpf nach [61] 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 10.2. 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	[71]
WLAN Access Point ^a	0,1-0,81	[71],[72]
WLAN Einsteckkarten ^a	0,05-0,43	[68],[72]
Bluetooth Class 1 ^a	0,09-0,47	[68],[71]
Bluetooth Class 2 ^a	0,0092	[71]
Bluetooth Class 3 ^a	0,001-0,003	[71]
Drahtlose Maus/Tastatur ^a	≤ 0,005	[71]
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 anatomischen Körpermodell

Tabelle 10.2: Typische maximale SAR_{10g} Werte unterschiedlicher in unmittelbarer Körpennähe betriebene Funkanwendungen

10.3 Erhöhung des Immissionshintergrundes durch UWB-Geräte

In einer kürzlich erschienenen Publikation [75] wird schließlich die potenzielle Erhöhung des elektromagnetischen Immissionshintergrundes bei intensiver lokaler Konzentration von UWB-Anwendungen angedeutet. In [75] 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 [2],[3] 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 [75] 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 [75] 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.

11 ZUSAMMENFASSUNG

Nachdem 2002 in den USA die *Federal Communications Commission (FCC)* Bedingungen für die allgemeine Nutzung des elektromagnetischen Spektrums durch Ultra-Wideband (UWB) Anwendungen im Frequenzbereich 3,1 - 10,6 GHz veröffentlicht hat, erfolgte im Februar 2007 auch in Europa eine entsprechende Entscheidung der Europäischen Kommission (2007/131/EG) zur Gestattung der harmonisierten Frequenznutzung durch UWB Geräte in der Europäischen Gemeinschaft. Die nationale funkregulatorische Umsetzung durch die deutsche Bundesnetzagentur war schließlich im Jänner 2008 abgeschlossen und wurde in der Verfügung Vfg 1/2008 veröffentlicht. Damit steht einer breiten Einführung von UWB Geräten formal rechtlich nichts mehr im Wege und die ersten Produkte im Anwendungsbereich der Echtzeitlokalisierung sind bereits auf dem Markt. Mehr noch als Geräte zur Ortung bzw. Identifikation von Objekten und Personen werden sich UWB-Anwendungen im Bereich der Kurzstrecken-Datenkommunikation als drahtlose Schnittstellen für Computer und zugehöriger Peripherie, wie z.B. Drucker, externe Harddisks, Mobiltelefone, PDAs, MP3-Player, Video-Beamer, Kameras, Scanner, usw. am Massenmarkt verbreiten. Weiters werden der Home-Entertainment Bereich (z.B. drahtloses „Home Cinema“) und auch die Medizin (z.B. drahtloses Monitoring von Patientendaten bzw. die drahtlose Kommunikation mit bzw. zwischen am Körper positionierten Sensoren) als potenzielles Einsatzgebiet für UWB angesehen. Schließlich bilden die *Wireless Body Area Networks (WBANs)*, bei denen drahtlose Datenverbindungen zwischen mehreren am Körper getragenen Netzwerkknoten bestehen, ein Anwendungsfeld, bei dem sich die speziellen Eigenschaften der UWB Technologie als vorteilhaft erweisen könnten.

Hinsichtlich der technischen Ausprägung der zu erwartenden UWB-Technologie ist zwischen *Direct Sequence UWB (DS-UWB)* und *Multiband-OFDM-UWB (MB-OFDM-UWB)* zu unterscheiden. DS-UWB arbeitet direkt im Basisband mit Sequenzen von kurzen Impulsen (Impulsdauer typ. < 5 ns), wobei zwischen den einzelnen Impulsen relativ große Pausen bestehen (Duty Cycle $< 0,5\%$). Die kurzen Impulse bewirken ein sehr breites Spektrum (bis zu mehreren GHz) und der geringe Duty Cycle ermöglicht eine zeitliche und räumliche Auflösung der Impulse mit geeigneten Empfangseinrichtungen, sodass DS-UWB Übertragungsverfahren nicht nur zu Kommunikationszwecken, sondern gleichzeitig auch zu Ortungs- bzw.- Lokalisationszwecken eingesetzt werden können. MB-OFDM-UWB arbeitet auf Basis des *Orthogonal Frequency Division Multiplex (OFDM)*. Das Prinzip des OFDM-Verfahrens ist weit verbreitet und wird beispielsweise auch bei WLAN (IEEE 802.11g) oder dem digitalen terrestrischen Fernsehrundfunk DVB-T verwendet. Dabei werden die zu übertragenden Daten auf eine Vielzahl einzelner, dicht nebeneinander liegender, orthogonaler (d.h. sich gegenseitig nicht störender) Trägerfrequenzen aufgeteilt, die gleichzeitig übertragen werden. Speziell bei MB-OFDM-UWB werden ca. 120, jeweils ca. 4 MHz breite Einzelfrequenzträger verwendet, die auf insgesamt ca. 528 MHz Bandbreite des abgestrahlten Signals führen. Der Zeitverlauf der elektromagnetischen Emissionen von MB-OFDM-UWB Geräten besitzt daher nicht den Impulscharakter der Emissionen von DS-UWB Geräten, sondern ist vielmehr durch die Protokollebene bestimmt, wie dies beispielsweise von WLAN bekannt ist. Die HF-Energie wird bei MB-OFDM-UWB Geräten daher in Form von HF-Bursts mit Längen im Bereich von mehreren zehn Mikrosekunden abgestrahlt.

Identisch für beide technischen UWB-Ausprägungen sind die sehr restriktiven funkregulatorischen Voraussetzungen, die in den grundsätzlich für UWB nutzbaren

Frequenzbereichen (in Europa 3,4-4,8 GHz und 6,0-8,5 GHz) eine maximale spektrale Dichte der mittleren EIRP-Sendeleistung von $-41,3$ dBm/MHz und eine maximale spektrale Dichte der Spitzensendeleistung von 0 dBm/50 MHz vorschreiben. Alleine auf Basis dieser Randbedingungen kann durch einfache Rechnung abgeleitet werden, dass die Sendeleistungen von regulierungskonformen UWB-Geräten in Europa in der Praxis deutlich geringer als $0,29$ mW sein werden. Dies ist beispielsweise weniger als ein Drittel der maximalen Sendeleistung von Bluetooth Klasse 3 Geräten. Dementsprechend gering sind daher auch die zu erwartenden Zeitmittelwerte der Immissionsgrößen, die, wieder auf Basis einfacher Rechnungen, z.B. in $0,5$ m Abstand zu regulierungskonformen UWB-Geräten in Europa typischerweise deutlich weniger als $0,1$ mW/m², also deutlich weniger als $0,001\%$ des entsprechenden ICNIRP-Referenzwertes für die äquivalente Strahlungsleistungsdichte betragen werden. UWB-Geräte fallen daher hinsichtlich der Zulassungsbedingungen aus der Sicht des Schutzes von Personen vor nichtionisierender Strahlung in den Geltungsbereich von [37]. D.h., es ist für die Zulassung kein expliziter Nachweis der Einhaltung der Personenschutzgrenzwerte notwendig, weil aufgrund der geringen Sendeleistung eine Überschreitung der Basisgrenzwerte physikalisch unmöglich ist.

Um das Ausmaß der Exposition von Personen durch UWB Geräte anhand von konkreten, zukünftig zu erwartenden Expositionssituationen zu ermitteln, wurden einerseits Immissionsmessungen in der Nähe von bereits verfügbaren UWB-Geräten und andererseits numerische Berechnungen der HF-Absorption in Situationen mit körpernahe Betrieb von UWB-Geräten durchgeführt.

Für die Immissionsmessungen wurde zunächst nach einem praxistauglichen Verfahren gesucht. Konkret wurden Messmethoden mit breitbandigem Digitaloszilloskop und mit Spektrumanalysator gegenübergestellt. Aus der Sicht der strahlenschutztechnischen Praxis erwies sich die Messung mit direkter Messantenne und Spektrumanalysator, nicht zuletzt aus Gerätekostengründen, als besser geeignet, weshalb diese Messmethode auch für die durchgeführten Immissionsmessungen in 15 cm - 50 cm Abstand zu zwei unterschiedlichen MB-OFDM-UWB Geräten und zwei unterschiedlichen DS-UWB Geräten eingesetzt wurde. Bei den beiden MB-OFDM-UWB Geräten handelte es sich um die ersten, am US-amerikanischen Markt erhältlichen UWB-Geräte, die drahtlose Datenverbindungen mit USB-Geschwindigkeit (480 Mbit/s) realisieren. Bei den beiden DS-UWB Geräten handelte es sich einerseits um ein in Europa zugelassenes Echtzeit-Ortungssystem und andererseits um ein UWB-Referenzdesign (Developer Kit), konform zur US amerikanischen Regulierung.

Die messtechnischen Untersuchungen ergaben in 15 cm Abstand maximale, zeitlich gemittelte Werte der äquivalenten Strahlungsleistungsdichte von nicht mehr als ca. $0,32$ mW/m², was $0,0032\%$ des entsprechenden ICNIRP-Referenzwertes für die Allgemeinbevölkerung von 10 W/m² entspricht. Zeitliche Spitzenwerte der äquivalenten Strahlungsleistungsdichte lagen in 15 cm Abstand zu den Geräten bei weniger als $2,4$ mW/m² (Impuls-Spitzenwerte bei DS-UWB Geräten, bzw. Burst-Effektivwerte bei MB-OFDM-UWB Geräten).

Die numerischen Berechnungen auf Basis der FDTD-Methode wurden mit einem anatomischen Körpermodell unter Berücksichtigung der dispersiven Gewebeeigenschaften durchgeführt. Als Expositionsszenarien wurden Situationen betrachtet, wie sie potenziell bei körpernaher Verwendung diverser UWB-Geräte in Zukunft erwartet werden können, wobei darauf geachtet wurde möglichst unterschiedliche Körperregionen zu befallen. Als Feldquelle wurden numerische Modelle integrierter Breitbandantennen, bei unterschiedlicher spektraler

Zusammensetzung des Anregungssignals (zur Nachbildung unterschiedlicher Realisierungskonzepte der betrachteten Anwendungen) verwendet. Konkret wurden die Situationen bei Befeldung des Oberschenkelbereiches durch ein Notebook mit UWB-Transceiver, Befeldung des Hinterkopfes durch ein drahtloses EEG-System, Befeldung des Brustkorbes durch ein drahtloses Biosignal-Monitoringsystem, sowie die Befeldung des Auges durch eine Brille mit Videoübertragungsmöglichkeit in den Berechnungen nachgestellt. Der Abstand zwischen Antenne und Körperoberfläche lag in allen betrachteten Szenarien zwischen 8 und 12 mm.

Die Ergebnisse der numerischen Berechnungen führten auf maximale über 10g Gewebe gemittelte SAR-Werte von bis zu maximal 0,013 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 davon auszugehen, dass die maximalen SAR_{10g}-Werte deutlich geringer sein werden. Beispielsweise liegen die maximalen Sendeleistungen der messtechnisch untersuchten Geräte im Bereich von weniger als ca. 40 µW. 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 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. D.h., die in Zusammenhang mit DS-UWB Geräten teilweise geäußerten Bedenken hinsichtlich hoher Impuls-Spitzenwerte der Immissionen bzw. hinsichtlich hoher spezifischer Absorption trotz geringer (zeitgemittelter SAR) sind für regulierungskonforme UWB-Geräte aufgrund der (zusätzlich zur mittleren Sendeleistungsdichte) sehr restriktiv begrenzten Spitzensendeleistungsdichte nicht gerechtfertigt.

12 SUMMARY

In the USA the *Federal Communications Commission (FCC)* released the conditions for the usage of the radio spectrum by Ultra-Wideband (UWB) applications in the frequency range 3.1-10.6 GHz in 2002. More recently, the European Commission published its decision 2007/131/EC on the harmonized use of the radio spectrum by UWB devices in the European Community. Finally, the corresponding decree Vfg 1/2008 on the national level in Germany was issued in January 2008 by the Federal Network Agency. This means that the necessary formal acts have been finalized and that, from a purely formal point of view, UWB technology can be introduced to the European (and German) market. First UWB systems for Real Time Location (RTL) purposes are already available. Even more potential for wide spread deployment than RTL systems can be expected from UWB devices related to short range wireless interfaces between computers and several kinds of other electronic devices, e.g., printers, external disks, mobile phones, PDAs, MP3 player, video beamer, cameras, scanner, etc. Furthermore, the market segment of home entertainment (e.g. wireless home cinema) as well as the medical field (e.g. wireless transmission of biosignals and other patient-related data) are potential areas for UWB applications. Last but not least UWB seems to be one of the most favourable technologies for *Wireless Body Area Networks (WBANs)*, where several on-body network nodes are wirelessly connected together.

With respect to the physical characteristics of the expected UWB devices the two basically different principles of *Direct Sequence UWB (DS-UWB)* and *Multiband-OFDM-UWB (MB-OFDM-UWB)* have to be distinguished. DS-UWB operates in the base band and uses sequences of short pulses (pulse duration < 5 ns) and a relatively large pulse repetition times (duty cycle < 0.5%). The short pulses lead to broad spectrum in frequency domain (up to several GHz) while the low duty cycle allows a fine resolution of the pulses both in space and time, making this principle suitable not only for data communications but at the same time also for RTL purposes. In contrast, MB-OFDM-UWB uses *Orthogonal Frequency Division Multiplex (OFDM)*. The principle of OFDM is widely used and deployed, e.g. in WLAN (IEEE 802.11g) devices or in case of the digital terrestrial video broadcast technology (DVB-T). In OFDM the data to be transmitted is modulated onto a high number of closely spaced, simultaneously transmitted carrier frequencies which are orthogonal to each other in order to minimize intrinsic interference. MB-OFDM-UWB uses approximately 120 carrier frequencies, approximately 4 MHz bandwidth each, leading to a total transmit bandwidth of approximately 528 MHz. Therefore, in contrast to DS-UWB, signals emitted by MB-OFDM-UWB signals do not have the character of narrow pulses. The shape of the MB-OFDM-UWB signals in time domain is primarily determined by the protocol level, similar as in case of WLAN. This means in case of MB-OFDM-UWB devices the RF energy is transmitted as RF bursts of lengths in the order of several tens of microseconds.

Identical for both the DS-UWB as well as the MB-OFDM-UWB are the restrictions regarding the maximum transmit power spectral density defined by the regulatory authorities. In the appropriable UWB frequency bands (3.4-4.8 GHz and 6.0-8.0 GHz in Europe) a maximum average spectral power density of -41.3 dBm/MHz EIRP and a maximum peak spectral power density of 0 dBm/50 MHz EIRP are allowed. Based on these definitions it can be derived that the total transmit power of UWB devices compliant to the European regulation will be clearly below 0.29 mW, which, for example, is less than one third of the maximum transmit power of a Bluetooth class 3 device. The expected average exposure level will therefore be correspondingly low. Based on a

simple calculation the equivalent power flux density at 0.5 m distance to an UWB device compliant to the European regulation can be expected to be clearly less than 0.1 mW/m^2 , corresponding to less than 0.001% of the reference level for the general public according to ICNIRP. Due to their low transmit power UWB devices can be inherently deemed compliant to the basic restrictions of current safety standards according to [37]. This means that no explicit compliance testing is necessary for UWB devices, because it is physically impossible that they can cause personal exposure above the basic restrictions.

In order to assess the extent of personal exposure caused by UWB devices field strengths measurements close to already available UWB devices and numerical computations of RF absorption in situations where UWB transmitters are operated close to the body were carried out.

For the field strengths measurements a practically suitable measurement procedure was selected in a first step. Methods using a broadband digital oscilloscope were compared with approaches using a spectrum analyzer. A procedure using a directive measurement antenna in combination with a spectrum analyzer was identified as the preferable measurement method from the practical point of view (not only due to the significantly lower price of a suitable spectrum analyzer compared to the price of the required digital oscilloscope). This measurement procedure was then used for field strengths measurements close to (15 cm -50 cm) two different types of MB-OFDM-UWB devices and two different devices of DS-UWB devices, respectively. The two MB-OFDM-UWB devices belong to the first products appearing on the US market enabling a wireless data link at USB speed (480 Mbit/s). The investigated DS-UWB devices were one of the first available RTL systems compliant to the European regulation and a UWB reference design (developer kit) compliant to the US regulation, respectively.

The measurements yielded maximum average equivalent power flux densities at 15 cm distance of not more than approximately 0.32 mW/m^2 , corresponding to less than 0.0032% of the ICNIRP reference level for public exposure (10 W/m^2). Temporal peak values of the equivalent power flux density at 15 cm distance were found to be less than 2.4 mW/m^2 (pulse-peak values for DS-UWB devices and burst-rms values for MB-OFDM-UWB devices).

For the numerical computations based on the FDTD method, an anatomical body model with dispersive dielectric tissue properties was used. As exposure scenarios close-to-body situations to be expected in future in a stage of widespread UWB deployment were considered. Additionally, considering several different body parts for illumination was one of the goals when selecting specific exposure scenarios. As radiation source numerical models of integrated broadband antennas with different spectral compositions of the UWB excitation signal were implemented in order to cover a wide variety of different UWB device classes. Specifically the situations of a notebook with a UWB transceiver located on the upper legs of its user, the illumination of the back head by a wireless (UWB-based) EEG assessment system, the irradiation of the thorax by an UWB-based wireless ECG system, as well as a situation with an UWB source close to the eye (carrying video transmitting spectacles) were considered for the computations. In these scenarios the distance between the antenna and the body surface varied in the range between 8 and 12 mm.

The results of the numerical computations yielded a maximum 10g averaged spatial peak SAR of up to 0.013 W/kg , if a 100% spectral efficiency of the source with respect to the European and the German UWB regulation was assumed. For real devices having less spectral efficiency, or using only sub-bands of the totally available bandwidth it can

be assumed that the maximum SAR_{10g}-values will be considerably less than this value. For example the maximum values of the total transmit power of the experimentally investigated UWB devices was less than 40 μ W. Even when assuming that this transmit power is entirely absorbed within a 10g cube (the averaging mass) this will result in a maximum SAR_{10g} of not more than 0.004 W/kg (corresponding to 0.2% of the basic restriction for the head of the general public according to ICNIRP).

Compared to other RF sources operated close to the body (mobile phones, DECT mobile parts, WLAN, Bluetooth class 1) the maximum SAR values to be expected from UWB devices are orders of magnitudes lower. Even compared to Bluetooth class 3 (1 mW transmit power) UWB devices will cause clearly less SAR, depending on the specific application.

Values of 10g averaged spatial peak specific absorption SA_{10g} will be an even lower fraction of the corresponding basic restriction than SAR_{10g}. Maximum SA_{10g} values can be typically expected to be less than 10^{-8} J/kg, corresponding to less than 0.0005% of the basic restriction of 2 mJ/kg. This means that the partially suggested concern of high SA values while the SAR remains low (due to the low duty cycle), which is often raised in the context of UWB exposure, is not justifiable for devices compliant to the current UWB regulation. This is a consequence of the regulation which provides restrictive limits not only for the average spectral power density but also for the peak spectral power density.

13 LITERATUR

- [1] 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>
- [2] 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.
- [3] 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
- [4] Wiesbeck W, Fügen, T, Porebska M, Sörgel W. Channel characterization and modeling for MIMO and other recent wireless technologies, Proceedings of EuCAP, Nice, France, 6-10 November 2006
- [5] Ghavami M, Michael LB, Kohno R: Ultra Wideband Signals and Systems in Communication Engineering, 2nd edition, John Wiley & Sons Ltd. , ISBN 978-0470-02763-9, January 2007
- [6] Aiello R, Batra A (editors): Ultra Wideband Systems, Technologies and Applications; Communications Engineering Series; Elsevier, Inc., ISBN: 0-7506-7893-3, 2006
- [7] Nekoogar F. Ultra-Wideband Communications-Fundamentals and Applications; Prentice Hall Communications Engineering and Emerging Technologies Series. ISBN: 0-13-146326-8, 2005
- [8] ISO/IEC 26907:2007: Information technology -- Telecommunications and information exchange between systems -- High Rate Ultra Wideband PHY and MAC Standard, March 2007
- [9] ISO/IEC 26908:2007: Information technology -- Telecommunications and information exchange between systems -- MAC-PHY Interface for ISO/IEC 26907, January 2007
- [10] 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.
- [11] European Telecommunications Standards Institute (ETSI).
<http://www.etsi.org/WebSite/Technologies/UltraWideBand.aspx>
- [12] Electronic Communications Committee, ECC Decision ECC/DEC/(07)01 on Building Material Analysis (BMA) devices using UWB technology,
<http://www.ero.dk/documentation/docs/doc98/official/Word/ECCDEC0701.DOC>

- [13] Electronic Communications Committee, ECC Decision on the conditions for use of the radio spectrum by Ground- and Wall- Probing Radar (GPR/WPR) imaging systems ECC/DEC/(06)08,
<http://www.ero.dk/documentation/docs/doc98/official/Word/ECCDEC0608.DOC>
- [14] Fa. Ubisense AG, System 7000 <http://www.ubisense.de/>
- [15] Fa. Y-E Data: Wireless USB Hub, Produktbeschreibung:
http://www.yedata.com/multi/yd_300.html
- [16] Fa. Belkin: Cable-Free USB Hub, User manual:
http://www.belkin.com/support/dl/P75325_F5U301_manual.pdf
- [17] IOGEAR, Inc.: Wireless USB Hub and Adapter
<http://www.iogear.com/product/GUWH104KIT/>
- [18] Fa. Audio-Technica: White Paper SpectraPulse wireless microphone system
http://www.audio-technica.com/cms/resource_library/files/adf45cbf16ed2b64/spectrapulse_uwb_white_paper.pdf
- [19] Texas Instruments, Inc.: http://focus.ti.com/pdfs/wtbu/TI_UWB_Brochure.pdf
- [20] Nokia: <http://research.nokia.com/research/programs/uwb/index.html>
- [21] Intel, Inc.: http://www.intel.com/standards/case/case_uwb.htm
- [22] Ghannoum H, D'Errico, Roblin C, Begaud X. Characterization of the UWB on-body propagation channel, Proceedings of EuCAP, Nice, France, 6-10 November 2006
- [23] Klemm M, Tröster G. Textile UWB antenna for on-body communications, Proceedings of EuCAP, Nice, France, 6-10 November 2006
- [24] Mittra R, Bringuir J, Wiart J, Yoo K. Modeling of interaction between body-mounted antennas, Proceedings of EuCAP, Nice, France, 6-10 November 2006
- [25] Time Domain Corp.: RadarVision™:
<http://www.timedomain.com/radarvision/index.html>
- [26] Time Domain Corp.: <http://www.timedomain.com>
- [27] Multispectral Solutions, Inc.: <http://www.multispectral.com/products/sapphire.htm>
- [28] Farran Technology, Ltd. : http://www.tadarvision.com/tadar_benefits.htm
- [29] Craddock IJ, Preece A, Leendertz J, Klemm M, Nilavalan R, Benjamin R, Development of a hemi-spherical wideband antenna array for breast cancer detection,, Proceedings of EuCAP, Nice, France, 6-10 November 2006
- [30] Kim J-L, Ko C-O, Choi J-I, Choi H-D, Lee A-K, Jang S-H, Kim J-J, Pack J-K, Feasibility study for development of a device for detecting breast cancer, Presentation at the 28th annual meeting of the Bioelectromagnetics Society, Cancun, Mexico, 2006, Abstract Book pp.558-560
- [31] Klemm M, Craddock I, Leendertz J, Benjamin R, Preece A, UWB microwave system for breast cancer detection, Presentation at the EBEA 2007 Conference, Bordeaux 2007, Book of Abstracts S10-1

- [32] Zastrow E, Davis SD, Hagness SC, Safety assessment of breast cancer detection via ultra-wideband microwave radar operating in pulsed-radiation mode, Microwave and Optical technology Letters, Vol. 49, No.1, January 2007
- [33] Eisenbacher M. Optimierung von Ultra-Wideband-Signalen (UWB). Forschungsberichte aus dem Institut für Nachrichtentechnik der Universität Karlsruhe, Band 16, ISSN: 1433-3821
- [34] Tektronix, Digital Storage Oscilloscopes TDS 6000 Series, Technical Specifications
- [35] Agilent, Infiniium DSO 80000 Series Oscilloscopes, Technical Specifications
- [36] 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)
- [37] EN 50371, Fachgrundnorm zum Nachweis der Übereinstimmung von elektronischen und elektrischen Geräten kleiner Leistung mit den Basisgrenzwerten für die Sicherheit von Personen in elektromagnetischen Feldern (10 MHz bis 300 GHz) – Allgemeine Öffentlichkeit, CENELEC, Brüssel, März 2002
- [38] Time Domain, Inc.: PulsON P210 Reference Design Kit
http://www.timedomain.com/product_p210.html
- [39] 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
- [40] 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
- [41] Austrian Research Centers GmbH, Precision Omnidirectional Dipole, Austrian Research Centers GmbH, Produkt-Datenblatt http://www.seibersdorf-rf.com/docs/leaflet/W_Products_POD16_POD618_engl.pdf
- [42] Rohde und Schwarz, Logarithmisch Periodische Antenne, Modell SAS-200/518, Produktbeschreibung
- [43] EMCO, Model 3115 Double Ridged Waveguide Horn Antenna, Produktspezifikationen, erhältlich z.B. unter http://www.leasametric.com/tem/datasheet/EMCO/3115_EN.pdf
- [44] Bornkessel C, Schubert M. Entwicklung von Mess- und Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Exposition der Bevölkerung durch elektromagnetische Felder in der Umgebung von Mobilfunk Basisstationen. Abschlussbericht 2005. http://www.emf-forschungsprogramm.de/forschung/dosimetrie/dosimetrie_abges/dosi_015_AB.pdf
- [45] 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.
- [46] Klemm M, Troester G, EM Energy absorption in the human body tissue due to UWB antennas, Progress In Electromagnetic Research, Vol. 62, pp. 261-280, 2006

- [47] 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
- [48] 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
- [49] 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
- [50] Simicevic N, Three-dimensional FDTD simulation of biomaterial exposure to electromagnetic nanopulses. Physics in Medicine and Biology, Vol. 50, pp.5041-5053, 2005
- [51] 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
- [52] Simicevic N, FDTD computation of human eye exposure to ultra-wideband electromagnetic pulses, published online [arXiv:0711.0932v1](https://arxiv.org/abs/0711.0932v1) [physics.med-ph]
- [53] Luebbers RJ, Hunsberger F, FDTD for Nth-order dispersive media, IEEE Transaction on Antennas and Propagation, Vol. 40, pp.1297-1301, 1992
- [54] Kelley DF, Luebbers RJ, Piecewise linear recursive convolution for dispersive media using FDTD, IEEE Transaction on Antennas and Propagation, Vol. 44, pp.792-797, 1996
- [55] Kashiwa T, Fukai I, A treatment by FDTD method of dispersive characteristics associated with electronic polarization, Microwave and Optics Technology Letters, Vol. 3, pp. 203-205, 1990
- [56] Joseph RM, Hagness SC, Taflove A, Direct time integration of Maxwell's equations in linear dispersive media with absorption for scattering and propagation of femtosecond electromagnetic pulses, Optics Letters, Vol. 16, pp.1412-1414, 1990
- [57] Okoniewski M, Mrozowski M, Stuchly MA, Simple treatment of multi-term dispersion in FDTD, IEEE Microwave and Guided Wave Letters, Vol. 7, pp.121-123, 1997
- [58] Sullivan DM, Frequency dependent FDTD methods using Z-transforms, IEEE Transaction on Antennas and Propagation, Vol. 40, pp.1223-1230, 1992
- [59] Taflove A, Hagness SC, Computational Electrodynamics. The finite difference time-domain method, second edition, 2000, Artech House, Inc., ISBN 1-58053-076-1
- [60] Ammann M., Schild S., Chavannes N., Kuster N., A Novel Approach to Model Linear and Nonlinear Dispersion with ADE-FDTD, PIERS 2007, Prague, Czech Republic, 27-30 Aug 2007
- [61] 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
- [62] Frey A, Messenger R. Human perception of illumination with pulsed ultra high frequency electromagnetic radiation. Science, Vol.181, pp.356-358, 1973.

- [63] Chen ZN. 2007. Antennas for portable devices. England: John Wiley & Sons Ltd., ISBN:0470030739
- [64] 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
- [65] http://www.imec.be/wwwinter/mediacenter/en/SSI_2008.shtml
- [66] 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
- [67] <http://www.heise.de/tp/r4/artikel/24/24285/1.html>
- [68] 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
- [69] 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.
- [70] 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.
- [71] 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
- [72] 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
- [73] 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.
- [74] 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
- [75] ICNIRP. 2008. ICNIRP Statement on EMF-emitting new technologies, Health Physics Vol. 94, No.4, pp.376-392