

Forschungsvorhaben

*Bestimmung der Exposition durch Ultra-  
Wideband Technologien*

Teil 2 (Arbeitspaket 2):

Mess- und Berechnungsverfahren

**Gernot Schmid, Luis Alberto Pérez**

Februar 2008  
Exemplar 1  
ARC-IT-0223

Verteiler:

- 1 Bundesamt für Strahlenschutz
- 2 DI. Lamedschwandner
- 3 DI. Schmid
- 4 Hr. Pérez, BSc.
- 5 Sekretariat ARCS/IT

# *Bestimmung der Exposition durch Ultra Wideband Technologien*

## **2. Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben Arbeitspaket 2 : Mess- und Berechnungsverfahren**

im Auftrag des

**Bundesamtes für Strahlenschutz  
38201 Salzburg, Deutschland**

**Gernot Schmid, 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

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

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

## ZUSAMMENFASSUNG

Im vorliegenden Bericht wurden sowohl messtechnische als auch numerische Methoden für die Expositionserfassung in UWB-Feldern diskutiert und ihre Tauglichkeit für den praktischen Einsatz bewertet.

Hinsichtlich der messtechnischen Methoden stellt die Kleinheit der von regulierungskonformen UWB-Geräten zu erwartenden Immissionen die größte Herausforderung dar. Messungen sind demnach nur mit hochempfindlichen Messmethoden sinnvoll durchführbar. Breitbandfeldsonden sind allein aus diesem Grund bereits als untauglich einzustufen. Möglichkeiten zur Immissionserfassung bieten vor allem frequenzselektive Methoden (Messantenne und Spektrumanalysator) bzw. in eingeschränktem Maß (hinsichtlich der erreichbaren Empfindlichkeit) auch Zeitbereichsmethoden (Messantenne und breitbandiges Digital-Speicheroszilloskop). Die für UWB-Immissionsmessungen erreichbare Empfindlichkeit der frequenzselektiven Messmethode ist jedoch typischerweise um mindestens zirka eine Größenordnung besser als jene der Zeitbereichsmethode. Ein weiterer Nachteil der Zeitbereichsmethode sind die wesentlich höheren Kosten für adäquates Messequipment. Grundsätzlich ist jedoch selbst bei Verwendung hochempfindlicher frequenzselektiver Messmethoden und empfindlicher (direktiver) Messantennen zu erwarten, dass die Messung der Immissionen von regulierungskonformen UWB-Geräten nur im Umkreis von weniger als ca. 1-2 m um die Quellen möglich sein wird. In größerer Entfernung ist davon auszugehen, dass die Immissionen unterhalb der Nachweisgrenze der gegenwärtig verfügbaren Messtechnik für die Immissionserfassung liegen. Zur korrekten Erfassung der mittleren UWB-Immissionen liefern zeitgemittelte Band Power Messungen mit RMS-Detektor gute Ergebnisse, Maximalimmissionen werden am besten mit RMS-Detektor und MAXHOLD-Funktion erfasst.

Auf dem Gebiet der numerischen Expositionsbestimmung bei UWB-Befeldung bieten moderne FDTD-Simulationsplattformen unbestritten die besten Möglichkeiten. Untersuchungen anhand einfacher Gewebemodelle haben gezeigt, dass neben der prinzipiellen Möglichkeit von Breitbandanregung auch die Möglichkeit der Modellierung der dispersiven (frequenzabhängigen) Gewebeeigenschaften eine notwendige Voraussetzung für eine korrekte Berechnung der Strahlungsabsorption ist. Vereinfachte Ansätze, wie Vernachlässigung der dispersiven Gewebeeigenschaften oder leistungsäquivalente Schmalbandanregung führen üblicherweise zu einer Unterschätzung der Absorption, vor allem in tieferen Gewebeschichten.

Im Hinblick auf die bei UWB-Exposition in der Praxis zweckmäßigste Beurteilungsgröße muss davon ausgegangen werden, dass nach gegenwärtigem Kenntnisstand sowohl die spezifische Absorption SA, als auch die spezifischen Absorptionsrate SAR als relevante Größen angesehen werden müssen. Welche der beiden Größen im Einzelfall das strengere Beurteilungskriterium darstellt, hängt von den Charakteristika der UWB-Immissionen ab (Impulsenergie, Impulsdauer, Impulswiederholrate).

Bezüglich der Markteinführung von UWB-Produkten ist festzuhalten, dass seit kurzem in Deutschland, der Schweiz und Österreich nun die letzte formale Hemmschwelle, die bislang nicht vorhandene Funkregulierung, überwunden ist. In allen drei Ländern existieren nun rechtsgültige funkregulatorische Vorschriften für den Betrieb von UWB-Produkten im Frequenzbereich zwischen 3,1 GHz und 10,6 GHz. Einer Verbreitung von entsprechenden Produkten steht nun rechtlich nichts mehr im Wege und es ist daher davon auszugehen, dass noch im Jahr 2008 erste Produkte auf dem Markt erscheinen werden.

# INHALT

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG.....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>MESSTECHNISCHE EXPOSITIONSERFASSUNG IN UWB-FELDERN .....</b>	<b>4</b>
2.1	<b>Größenordnung der zu erwartenden Immissionen .....</b>	<b>4</b>
2.1.1	Vorgaben durch die Funkregulierung .....	4
2.1.2	Einfache Abschätzung der Größenordnungen der Immissionen .....	6
2.2	<b>Tauglichkeit unterschiedlicher Messverfahren für die Expositionsbestimmung in UWB-Feldern .....</b>	<b>10</b>
2.2.1	Breitbandmessungen (Feldsonden).....	10
2.2.2	Messungen im Zeitbereich (mit Digital-Oszilloskop).....	10
2.2.3	Frequenzselektive Messungen (mit Spektrumanalysator).....	11
2.2.4	SAR-Messungen bei körpernahen UWB-Sendern .....	12
2.3	<b>Ermittlung praxistaugliche Messparameter anhand von Messungen unter Laborbedingungen .....</b>	<b>14</b>
2.3.1	Messungen an einer MB-OFDM-UWB Quelle nach dem WiMedia Standard.....	15
2.3.2	Messungen an einer Impuls-UWB-Quelle .....	22
<b>3</b>	<b>NUMERISCHE METHODEN FÜR DIE EXPOSITIONSERFASSUNG IN UWB-FELDERN .....</b>	<b>30</b>
3.1	<b>FDTD-Methode für UWB-Berechnungen.....</b>	<b>30</b>
3.1.1	Implementierung dispersiver Gewebeparameter in FDTD .....	30
3.2	<b>UWB-Absorption in biologischen Geweben.....</b>	<b>32</b>
3.2.1	Modell eines homogenen Gewebeblocks .....	34
3.2.2	Modell eines geschichteten Halbraumes .....	37
3.3	<b>SAR, SA oder E als Bewertungsgröße der Exposition .....</b>	<b>42</b>
<b>4</b>	<b>AKTUELLER STAND DER UWB-REGULIERUNG IN EUROPA.....</b>	<b>45</b>
4.1	<b>Situation in Deutschland.....</b>	<b>45</b>
4.2	<b>Situation in der Schweiz.....</b>	<b>46</b>
4.3	<b>Situation in Österreich .....</b>	<b>46</b>
<b>5</b>	<b>WEITERES VORGEHEN IM PROJEKT .....</b>	<b>47</b>
5.1	<b>Messtechnische Untersuchungen.....</b>	<b>47</b>
5.2	<b>Numerische Berechnungen .....</b>	<b>47</b>
<b>6</b>	<b>LITERATUR.....</b>	<b>48</b>

# 1 EINLEITUNG

Nachdem im ersten Zwischenbericht [1] die Grundzüge der UWB-Technologie zusammengefasst und der aktuelle Stand der Standardisierung, Funkregulierung und Produktverfügbarkeit erhoben wurden, widmet sich der vorliegende 2. Zwischenbericht den Methoden für die Expositionserfassung in UWB-Feldern.

Ausgehend von einfachen theoretischen Betrachtungen wird zunächst abgeschätzt in welcher Größenordnung UWB-Immissionen von regulierungskonformen Geräten zu erwarten sind. Aufbauend auf den Ergebnissen dieser Überlegungen werden anschließend die prinzipiell verfügbaren Messmethoden hinsichtlich ihrer Tauglichkeit für die UWB-Immissionserfassung diskutiert und für die als praxistauglich eingestuften Methoden optimierte Messparameter ermittelt.

Eine besondere Rolle bei der Beurteilung von Expositionen in UWB-Feldern kommt den numerischen Methoden zu, da sie die einzige Möglichkeit bieten Einblicke in die Absorption von UWB-Feldern im Gewebe zu gewinnen. Aufgrund der besonderen Charakteristika von UWB-Signalen (speziell geformte, sehr kurze Impulse mit dementsprechend hohen Bandbreiten) gelingt dies jedoch gegenwärtig nur mit modernsten und leistungsfähigen Methoden und Hardwareressourcen. Die gegenwärtig am besten geeignete Methode für numerische Absorptionsberechnungen bei UWB-Exposition wird daher in einem eigenen Kapitel diskutiert und in ihren Grundzügen erläutert. Anhand einfacher Beispiele werden die Bedeutung der korrekten Berücksichtigung der dispersiven (frequenzabhängigen) Gewebeeigenschaften und die Unterschiede zwischen schmalbandiger und UWB-Anregung hinsichtlich der Absorptionsverteilung im Gewebe demonstriert.

Schließlich wird kurz auf die Zweckmäßigkeit unterschiedlicher physikalischer Größen für die Expositionsbeurteilung in UWB-Feldern eingegangen und der aktuelle Stand der Funkregulierung in Deutschland, der Schweiz und Österreich zusammengefasst.



## 2 MESSTECHNISCHE EXPOSITIONSERFASSUNG IN UWB-FELDERN

### 2.1 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 und andere Sonderfälle von UWB-Anwendungen mit Leistungsdichten weit oberhalb der Werte der gegenwärtigen UWB-Funkregulierung können die folgenden Betrachtungen natürlich nicht gelten.

#### 2.1.1 Vorgaben durch die Funkregulierung

Ausgangspunkt der Überlegungen sind die bereits in [1] beschriebenen Vorgaben der Funkregulierung in Europa [2] für UWB-Anwendungen im Frequenzbereich 3,1 GHz – 10,6 GHz. Diese sind in Tabelle 2.1 und 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 2.1: Sendeleistungsdichtelimits für UWB-Geräte gemäß [2].

Gemäß der US-amerikanischen FCC-Funkregulierung für UWB [3], 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 2.1).

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 ganz allgemeinen elektronischen Geräten („unintentional radiators“) von 54 dB $\mu$ 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.

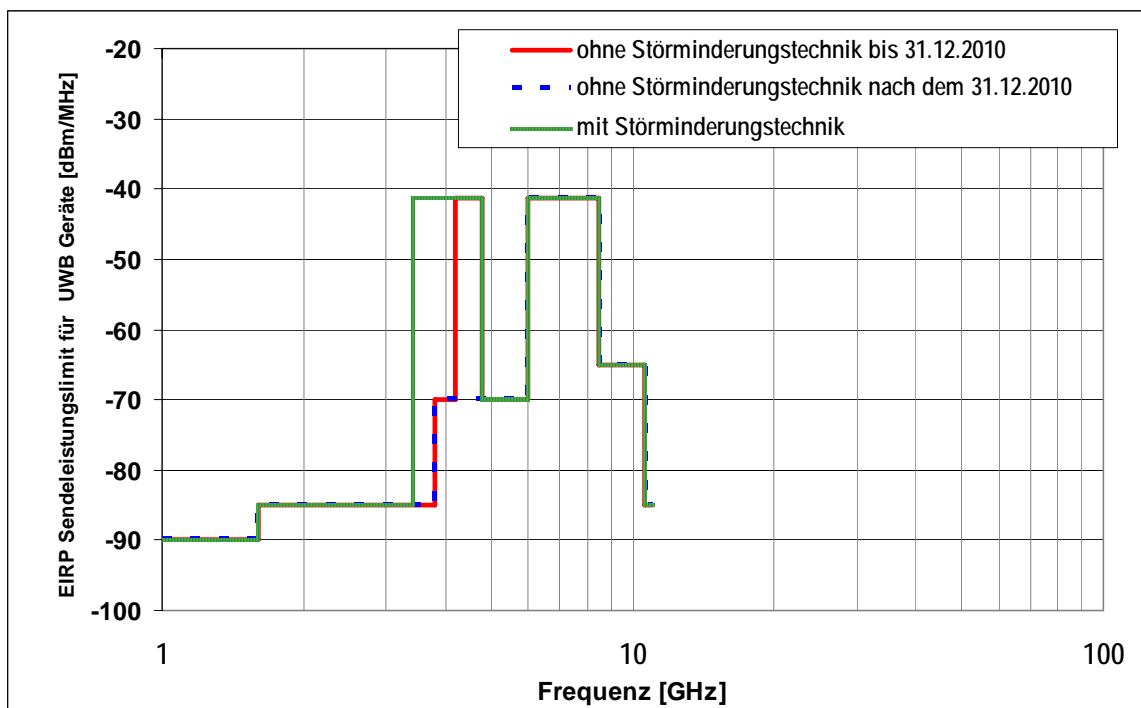


Abbildung 2.1: Graphische Darstellung der maximalen mittleren EIRP Sendeleistungsdichten für UWB-Geräte gemäß der aktuellen Entscheidung der Europäischen Kommission vom 21. Februar 2007 [2].

Eine einfache, auf der „Fernfeldbeziehung“

$$S = \frac{E^2}{Z_0} = \frac{P \cdot G}{4\pi d^2} \quad (2.1)$$

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

$$P_{[1\text{MHz}]} = 4\pi d^2 \frac{E^2_{[1\text{MHz}]}}{Z_0} = 4\pi \cdot (3\text{m})^2 \cdot \frac{(10^{-6} \cdot 10^{\frac{54}{20}})^2}{377\Omega} \approx 7,5 \cdot 10^{-8} \text{ W / MHz}, \quad (2.2)$$

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 beschlossen<sup>1</sup>.

## 2.1.2 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 2.1 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 2.2 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

$$S_{SD} = \frac{P_{SD}}{4\pi d^2} \quad (2.3)$$

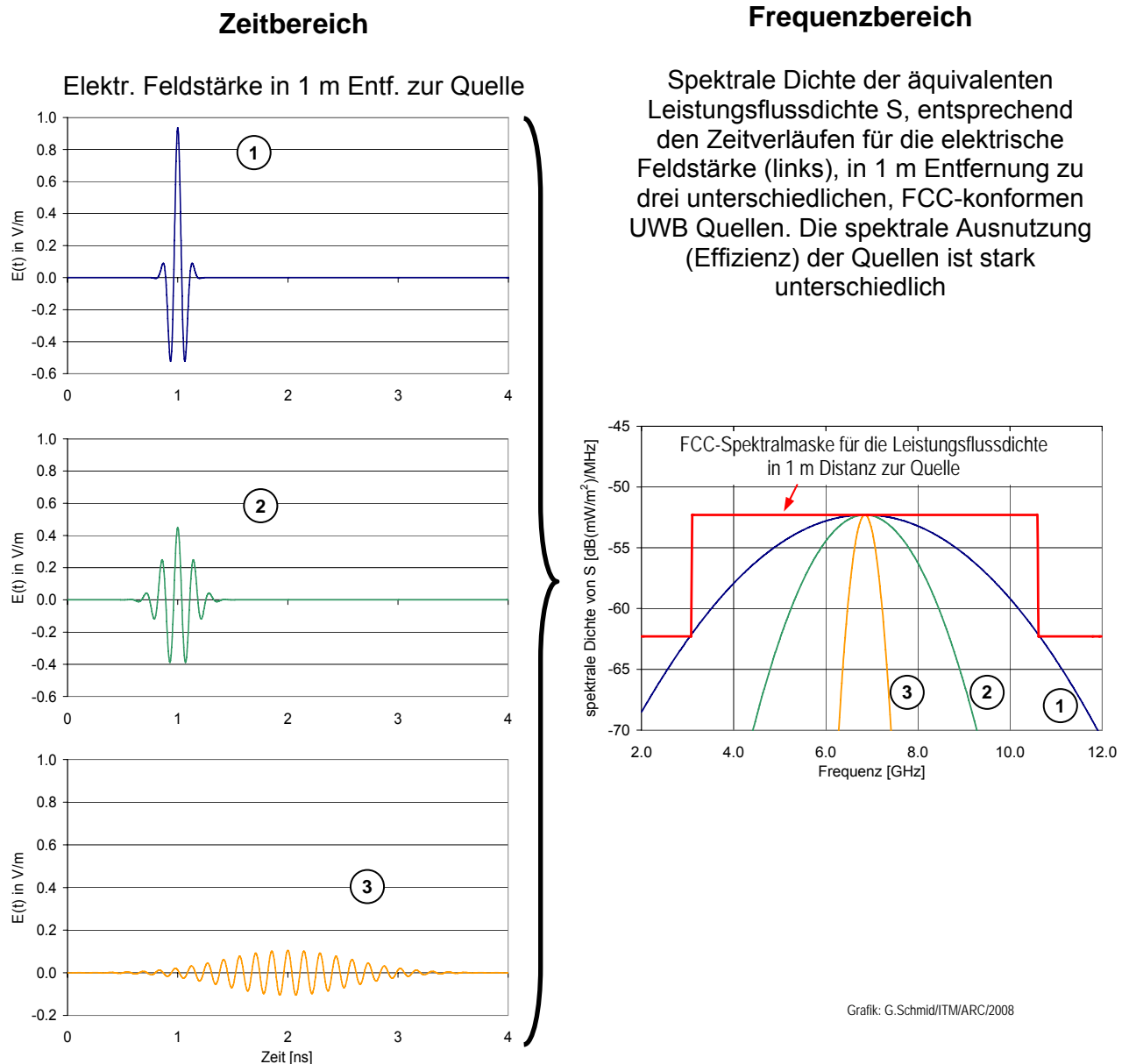
einfach in den zugehörigen Leistungsflussdichtepegel  $S_{SD}$  in Entfernung  $d$  zur Quelle umgerechnet werden. Beispielsweise ergibt sich für  $d = 1$  m Entfernung zur Quelle für den maximalen mittleren spektralen Dichte-Pegel der Leistungsflussdichte  $S$  (vgl. Abbildung 2.2)

$$S_{SD(1m)} = 10 \cdot \log\left(\frac{10^{(-41,3dBm/MHz)/10}}{4\pi(1m)^2}\right) = -52,3dB(mW/m^2)/MHz \quad (2.4)$$

Die linke Seite der Abbildung 2.2 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

<sup>1</sup> 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 $\mu$ V/m (AVG) bzw. 70 dB  $\mu$ V/m (PEAK). Auf diesen Vorschlag konnte man sich jedoch bisher nicht einigen.

gerade noch unterhalb des maximal zulässigen Niveaus von  $-52,3\text{dB}(\text{mW}/\text{m}^2)/\text{MHz}$  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 2.2:** 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  $-41.3\text{ dBm}/\text{MHz}$  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 2.3 die unter Anwendung der Fernfeldbeziehung (2.1)

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.

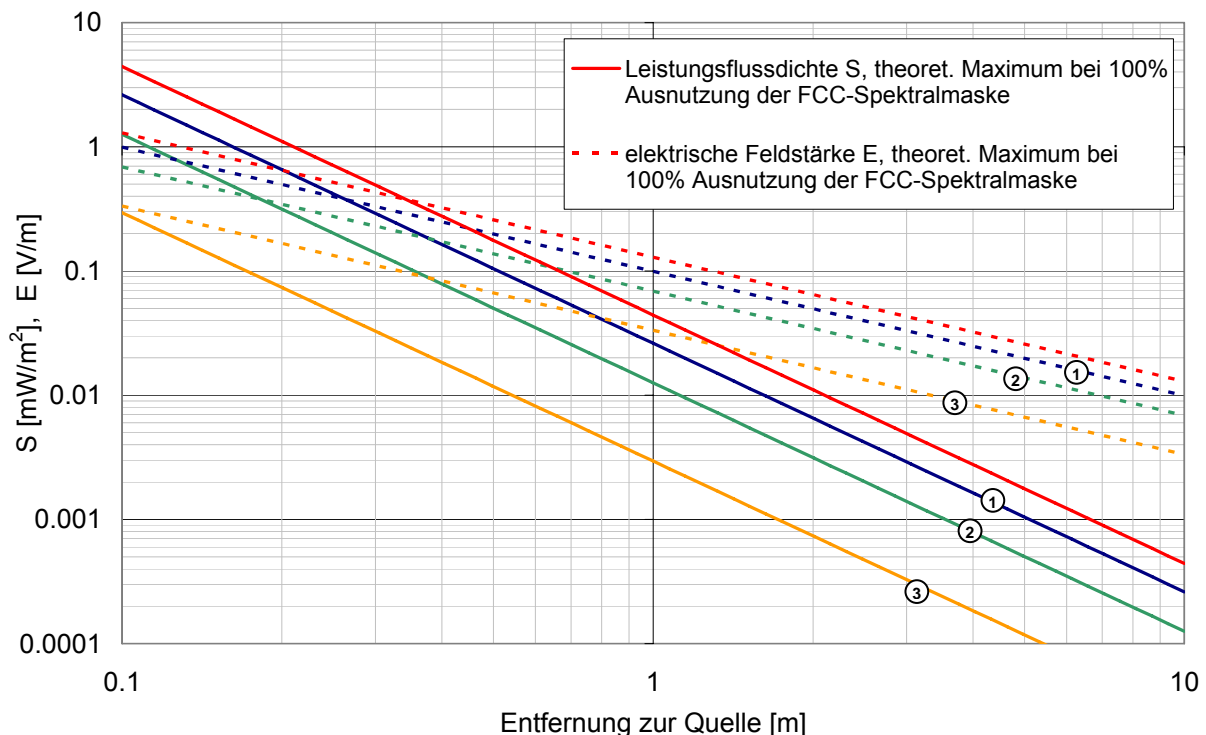


Abbildung 2.3: Verläufe der zu erwartenden resultierenden Leistungsflussdichten  $S$  (durchgezogene Linien) und elektrischen Feldstärken  $E$  (strichlierte Linien) in Abhängigkeit von der Entfernung zu den 3 hypothetischen Quellen (vgl. Abbildung 2.2), bei Anwendung der Fernfeldbeziehung (2.1). Zum 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 2.1). 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. z.B. Abbildung 2.9 in [1] oder allgemeiner und tief greifender in [4]). 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 ([5], [6]) 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 2.4 zeigt die, mittels der Fernfeldbeziehung (2.1) 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.

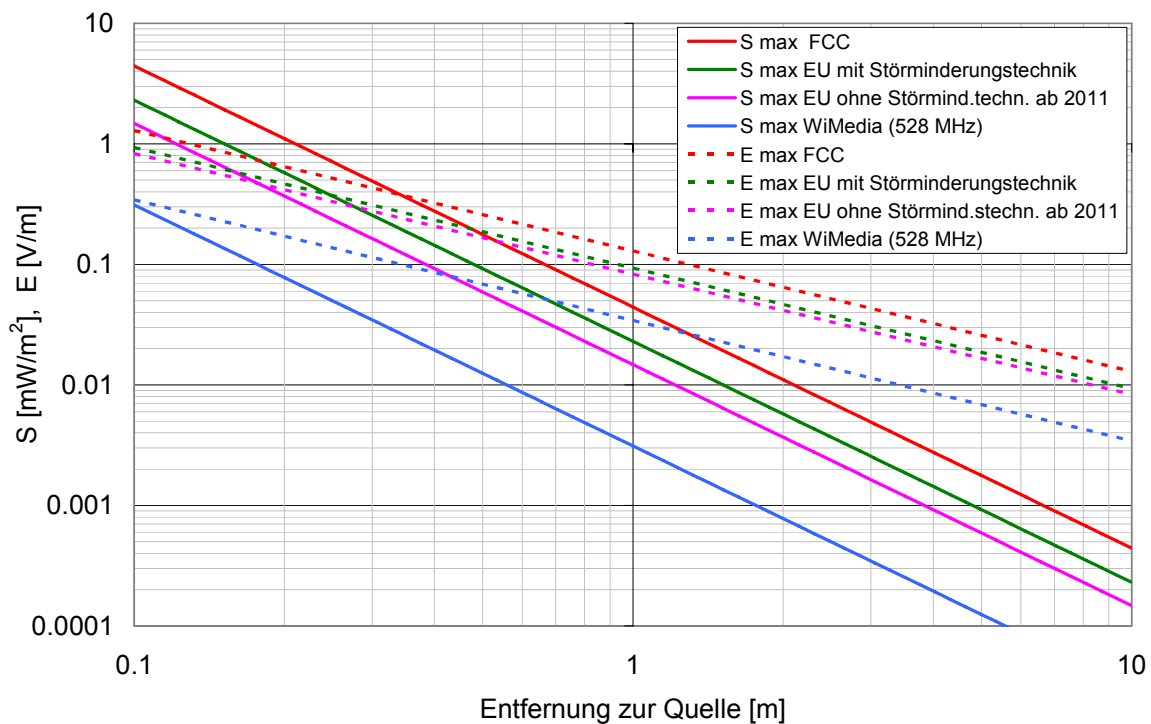


Abbildung 2.4: Mittels Fernfeldbeziehung (2.1) berechnete Verläufe der zu erwartenden resultierenden Leistungsflussdichten  $S$  (durchgezogene Linien) und elektrischen Feldstärken  $E$  (strichlierte Linien) in Abhängigkeit von der Entfernung zu einzelnen UWB-Quellen unter der Annahme 100% Ausnutzung 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.

## **2.2 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.

### **2.2.1 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 2.4) 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.

### **2.2.2 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 schnellen, breitbandigen Digital-Oszilloskopen zum (notwendigen) Standard geworden

sind 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  $\geq 10$  GHz (siehe z.B. [9], [10]) 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 $\mu$ 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 $\mu$ V/m (entsprechend 0,06-0,1 V/m), die noch sinnvoll gemessen werden kann. Vergleicht man diesen Wert mit Abbildung 2.4 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 2.4 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.

### **2.2.3 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 $\mu$ V bzw. ca. 2-3  $\mu$ 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  $100 \text{ kHz}$  Auflösebandbreite und einem UWB-Gerät nach WiMedia-Standard mit  $528 \text{ MHz}$  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 Auflösebandbreite<sup>2</sup> 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  $528 \text{ MHz}$ , 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. 35-40 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 2.4). 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.

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

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

berechnet werden, wobei B für die insgesamt belegte Bandbreite steht. Tabelle 2.2 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

<sup>2</sup> 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.

äußerst rechten Spalte von Tabelle 2.2 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 $P_{\text{EIRP,max}}$ [mW]	theoret. Obergrenze der lokalen SAR SAR <sub>1g</sub> / SAR <sub>10g</sub> [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)	5128	0,039	0,039 / 0,004

Tabelle 2.2: 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 Phantommaterialien (Flüssigkeiten). Obwohl für die wichtigsten Körpergewebe dispersive Gewebemodelle verfügbar sind [7], 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  $\epsilon$  und  $\sigma$  der Gewebe simulierenden Flüssigkeit ist. Da  $\epsilon$  und  $\sigma$  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 Problemkreis, 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 [8], basierend auf der auch Tabelle 2.1 zugrunde liegenden Überlegungen, für alle Funksendegeräte mit einer mittleren Sendeleistung  $\leq 20$  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 [8] 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 ( $f_{\text{imp}}$  ... 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 Spektrumanalysator 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 3).

## **2.3 Ermittlung praxistaugliche 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 aufgrund der Verzögerungen bei der europäischen UWB-Regulierung (siehe [1] bzw. Kapitel 4) am europäischen Markt nach wie vor noch keine UWB-Produkte erhältlich sind, wurden 2 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 [11], 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 [12], der nach dem WiMedia-Standard, d.h., mit MB-OFDM-UWB arbeitet.

### 2.3.1 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 2.5: 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 in [1]). Die Auswahl des TFC kann entweder automatisch oder manuell über eine Konfigurationssoftware erfolgen.

Als maximale Sendeleistung wird im Handbuch zum Gerät 80  $\mu$ 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 2.6). 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 von konstantem Datentransfer diente ein herkömmlicher USB-Stick.

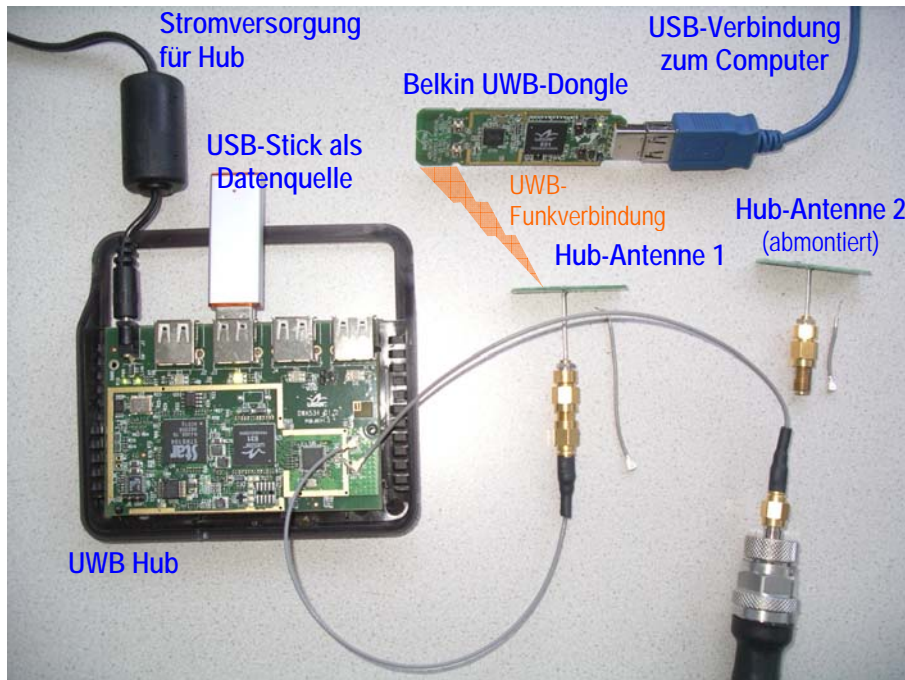


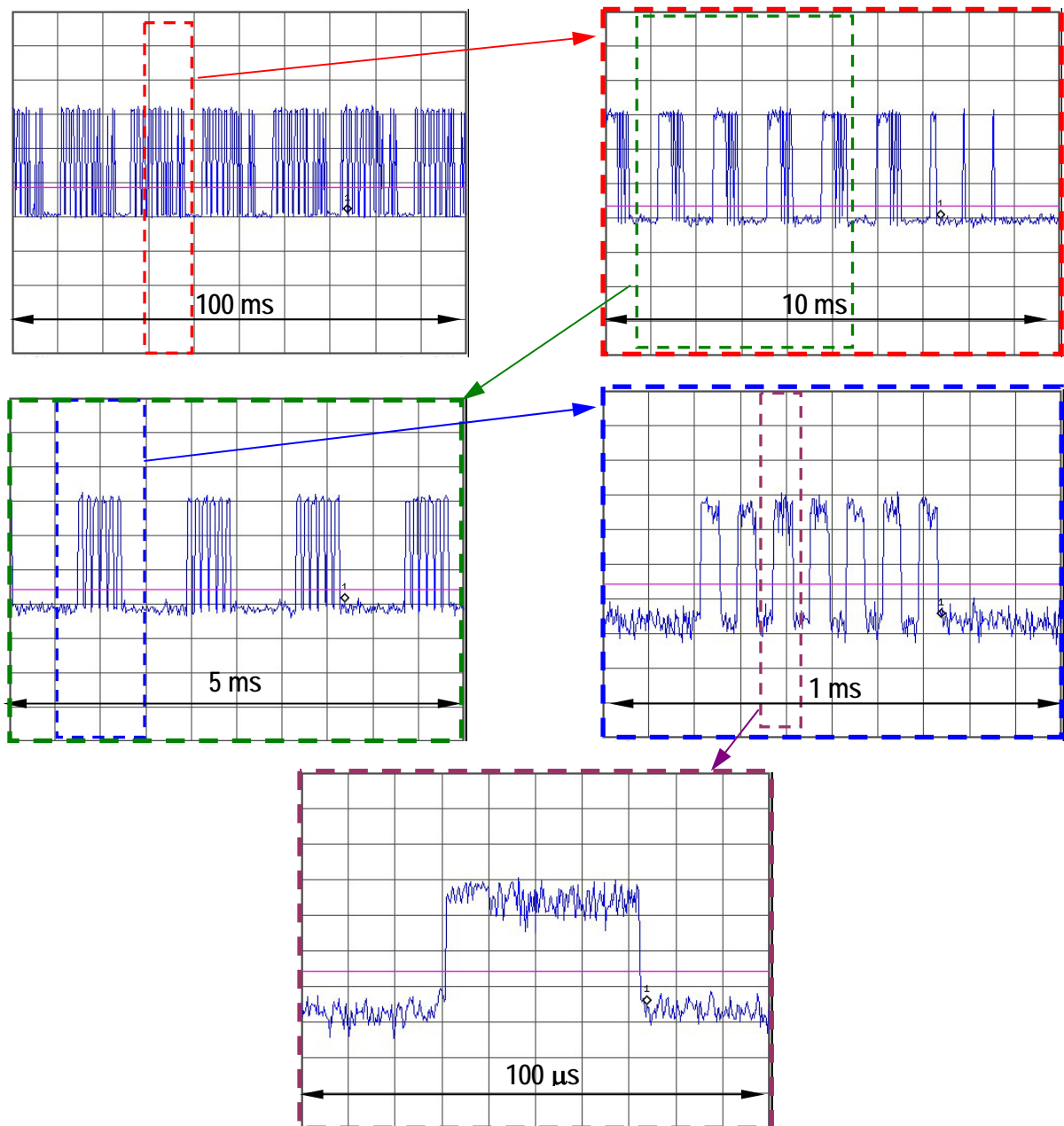
Abbildung 2.6: Messungen am Antennenausgang des Belkin Cable-Free USB Hub

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 bringen.

Abbildung 2.7 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. Zufolge 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 2.8). Hinsichtlich der Immissionserfassung liegen die Verhältnisse daher sehr ähnlich wie im Fall von WLAN (vgl. z.B. [13]), d.h. die mittleren Immissionen können, je nach Datenverkehrssituation, über mehrere Größenordnungen schwanken.

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 2.9 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 2.7:** 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.



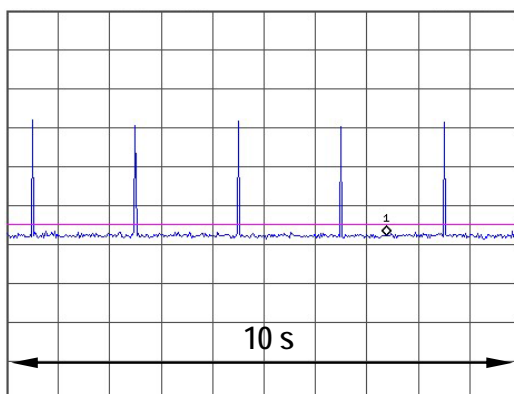


Abbildung 2.8: Aussendung des Beacon Signals im Ruhezustand (d.h. ohne Datenübertragung vom USB-Stick zum Computer)

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 2.7 abgeschätzt werden. Für andere Datenverkehrszustände kann dieses Verhältnis natürlich vom genannten Wert abweichen. Beispielsweise führt eine Verdichtung des Datenverkehrs (z.B. Übertragung von mehreren 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.

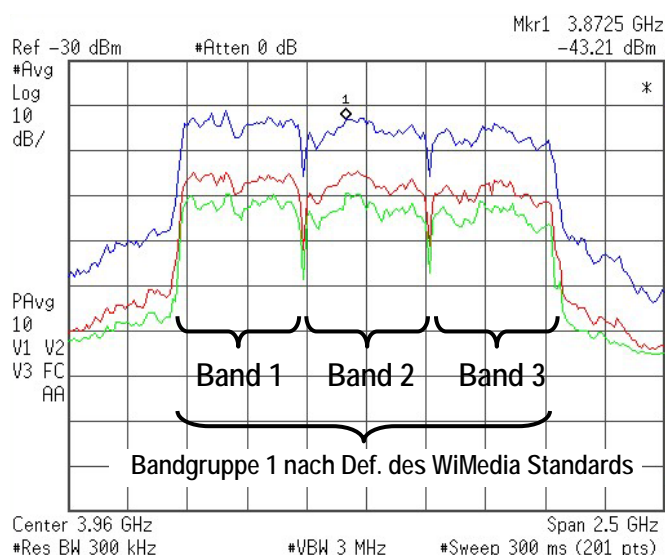


Abbildung 2.9: Messung im Frequenzbereich am HF-Ausgang des Belkin Cable-Free USB (UWB) Hub während einer Datenübertragung mit Time Frequency Code TFC1. Vergleich von Messungen mit PEAK-Detektor im MAXHOLD Modus (blaue Kurve), RMS-Detektor im MAXHOLD Modus und RMS-Detektor mit Mittelungsfunktion (Mittelung über 3 s)

In Abbildung 2.10 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, was offensichtlich eine (nicht näher spezifizierte) Eigenschaft des untersuchten Gerätes ist (vgl. Band Power Werte, jeweils rechts oben in den Teilbildern von Abbildung 2.10).

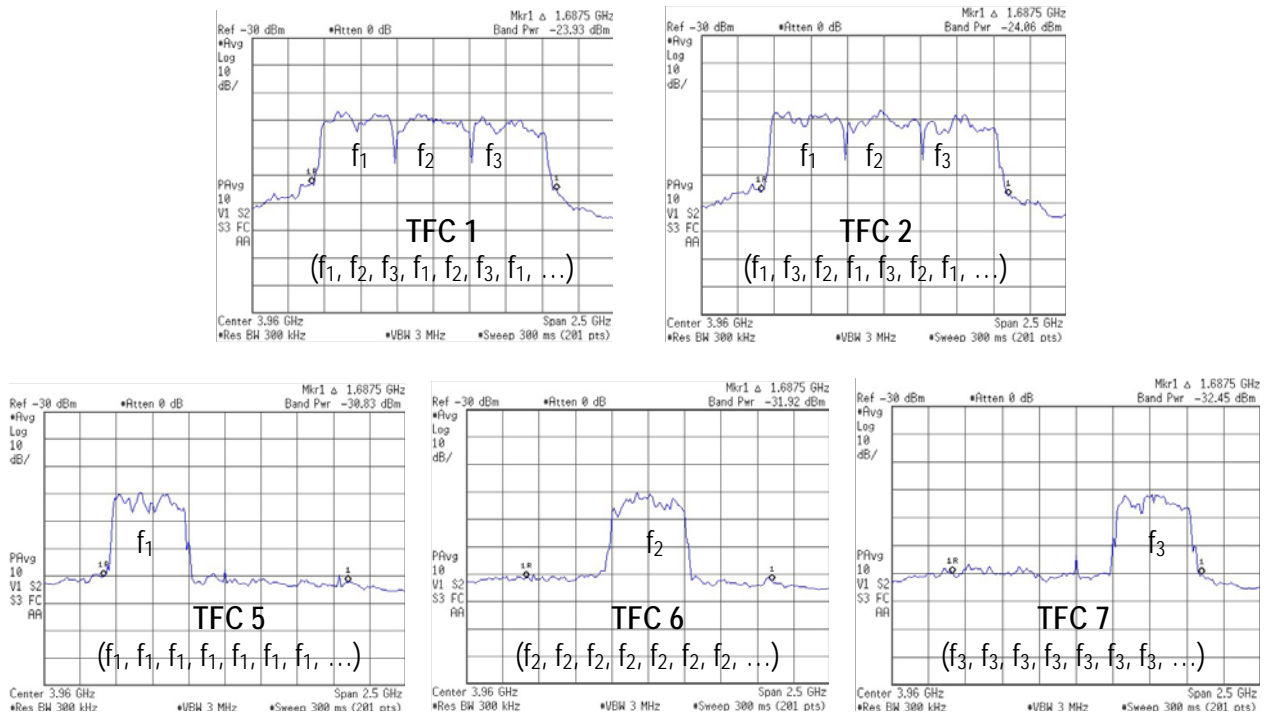


Abbildung 2.10: Messungen der zeitgemittelten (3 s) HF-Ausgangsleistung für die 5 unterschiedlichen, beim untersuchten Belkin Cable-Free USB-Hub möglichen Time Frequency Codes TFC1, TFC2, TFC5, TFC6 und TFC7.

### Optimierung der Messparameter

Zur Ermittlung der optimalen Messparameter für Immissionsmessungen in den HF-Feldern von MB-OFDM-UWB Geräten wurden Referenzmessungen gemäß Abbildung 2.11 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 ausreichender Sweep time von 300 ms durchgeführt. Auflösungsbandbreite (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 2.3 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.



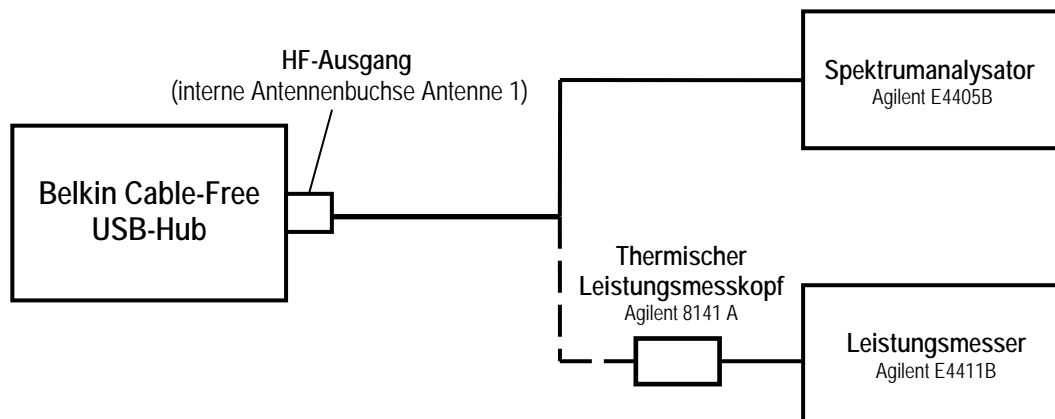


Abbildung 2.11: Schema der durchgeführten Referenzmessungen mit dem Belkin Cable-Free USB Hub. Die mittlere HF-Ausgangsleistung wurde alternativ mit Spektrumanalysator oder thermischem Leistungsmesskopf bestimmt.

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

Zusammenfassend können aus dem oben gesagten 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 201 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 >100 ms (bei 201 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 Rauschbandbreite<sup>3</sup> des Spektrumanalysators

<sup>3</sup> 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.

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 Cycle<sup>4</sup> 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 (d.h. auf genau einer (Mitten)frequenz innerhalb der Bandgruppe wird nur ein etwa Drittel aller tatsächlich abgestrahlten 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 [14]:** 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 [15]:** 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

**Messantenne 3 [16]:** 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 2.4 fasst die resultierenden Messergebnisse

---

<sup>4</sup> 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.

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 <sup>2</sup> ]	E [V/m]	S [mW/m <sup>2</sup> ]	E [V/m]	S [mW/m <sup>2</sup> ]	E [V/m]	S [mW/m <sup>2</sup> ]
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 2.4: 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 stimmt gut mit den in Kapitel 2.2 angestellten theoretischen Überlegungen überein.

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 [17] 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.

### 2.3.2 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  $\mu$ W). Abbildung 2.12 zeigt die beiden Sendeempfänger.



Abbildung 2.12: 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 2.13). 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.

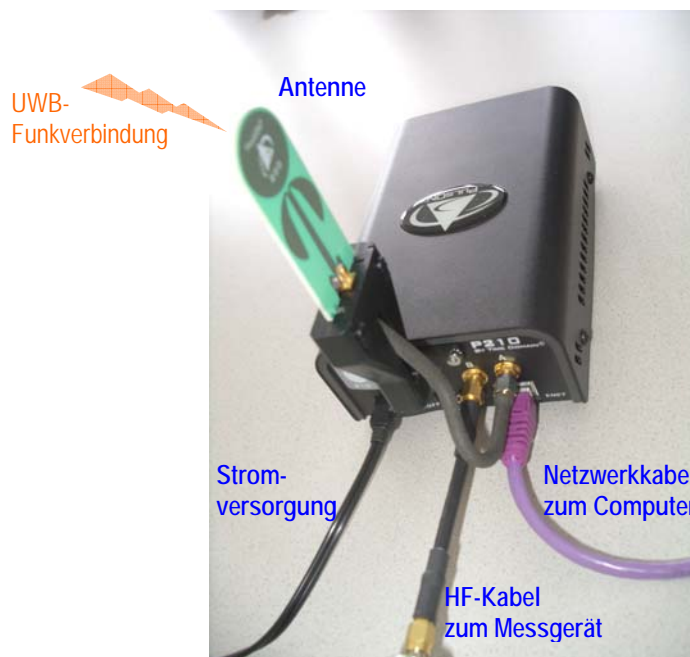


Abbildung 2.13: Messungen am Antennenausgang des PulsON P210 UWB-Sendeempfängers

Die Zeitbereichsmessungen wurden mittels eines Digital-Speicheroszilloskops mit 6 GHz Bandbreite (LeCroy Wave Runner) durchgeführt. Abbildung 2.14 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-Paket in den Sendelücken). Da die Sendeantenne beim Impuls-UWB zumeist bewusst als letztes impulsformendes Element eingesetzt wird, entspricht die in Abbildung 2.14 dargestellte, 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 2.15 zeigt den tatsächlichen Zeitverlauf der UWB-Immissionen, wie sie in ca. 20 cm Abstand zur Sendeantenne mittels einer Breitband-Hornantenne und Digital-Speicheroszilloskop gemessen werden konnten. Das Immissionssignal unterscheidet sich stark vom Sendesignal.

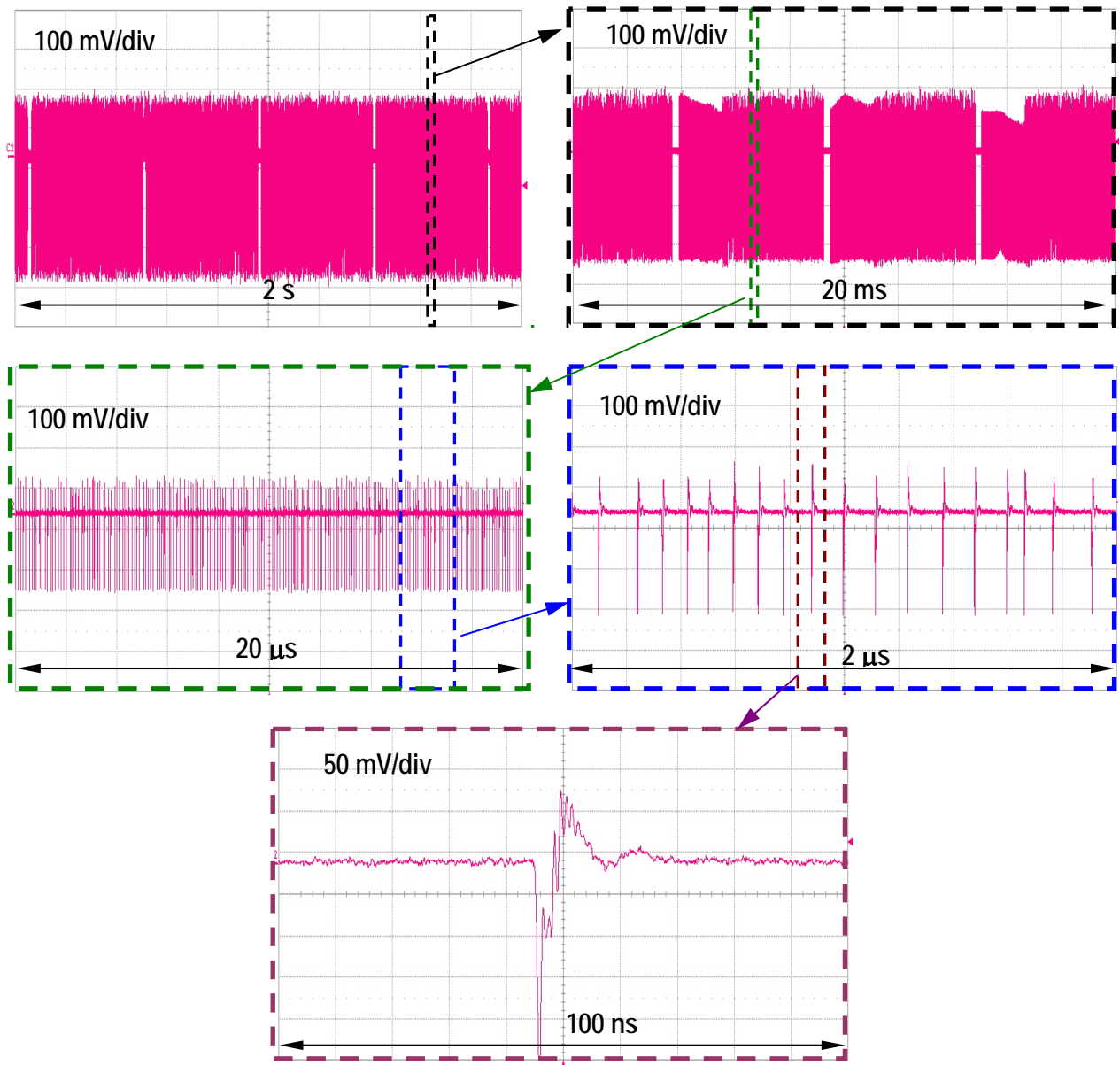


Abbildung 2.14: Zeitverlauf des Sendesignals am Ausgang (Anschlussport der Sendeantenne) des PulsON P210, gemessen mit einem Digital Speicheroszilloskop

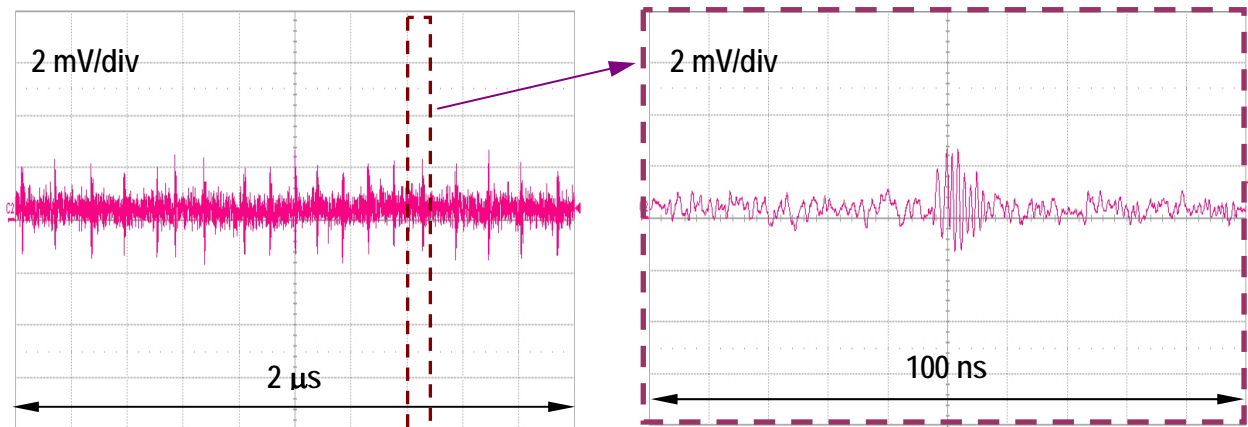


Abbildung 2.15: Zeitverlauf der UWB-Immissionen, gemessen mit Breitband-Hornantenne und Digital Speicheroszilloskop in ca. 20 cm Abstand zur UWB-Sendeantenne

Weiters bestätigen diese Messungen die bereits in Kapitel 2.2 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 2.15, rechts).

Zum Vergleich mit den in Abbildung 2.14 dargestellten Ergebnissen der Zeitbereichsmessungen mittels Digital-Speicheroszilloskop ist in Abbildung 2.16 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 2.14 erste Reihe rechts), aber natürlich nicht mehr Zeitintervalle in der Größenordnung der Einzelimpulslängen dargestellt werden. Eine korrekte Darstellung der Einzelimpulse wäre aufgrund der im Vergleich zur Impuls-Bandbreite viel zu geringen Auflösebandbreite des Spektrumanalysators ohnehin nicht möglich.

Immissionsmessungen 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 2.17 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. 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.

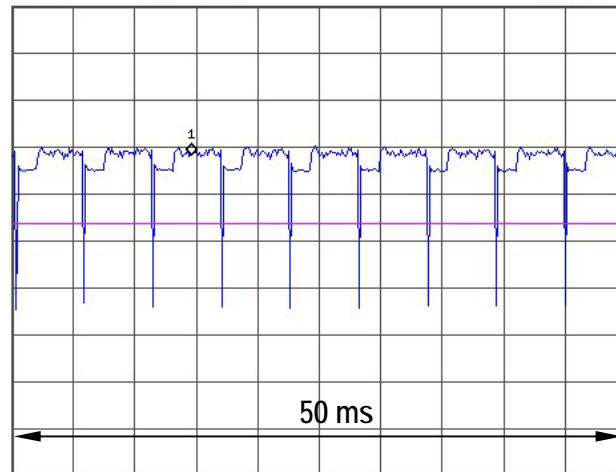


Abbildung 2.16: Zeitverlauf des Sendesignals am Ausgang (Anschlussport der Sendeantenne) des PulsON P210, gemessen mit dem Spektrumanalysator.

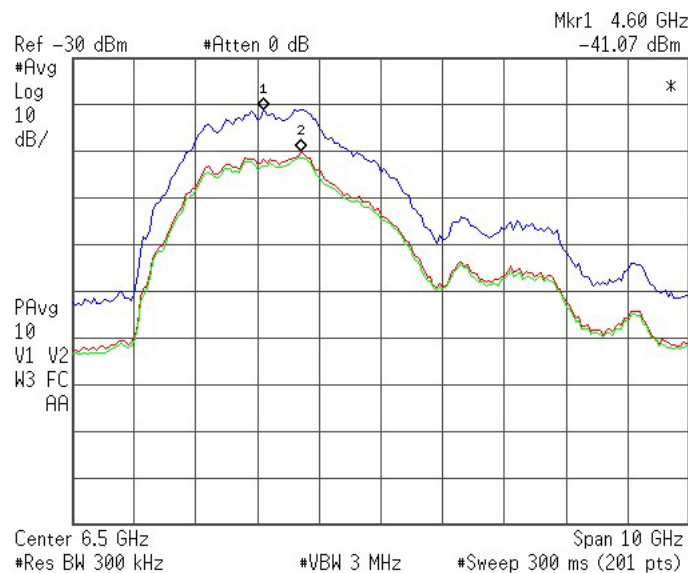


Abbildung 2.17: Messung im Frequenzbereich am HF-Ausgang des PulsON P210 UWB-Sendeempfängers während kontinuierlichem Senden von pseudozufälligen Daten. Vergleich von Messungen mit PEAK-Detektor im MAXHOLD Modus (blaue Kurve), RMS-Detektor im MAXHOLD Modus (rote Kurve) und RMS-Detektor mit Mittelungsfunktion (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 2.18 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.

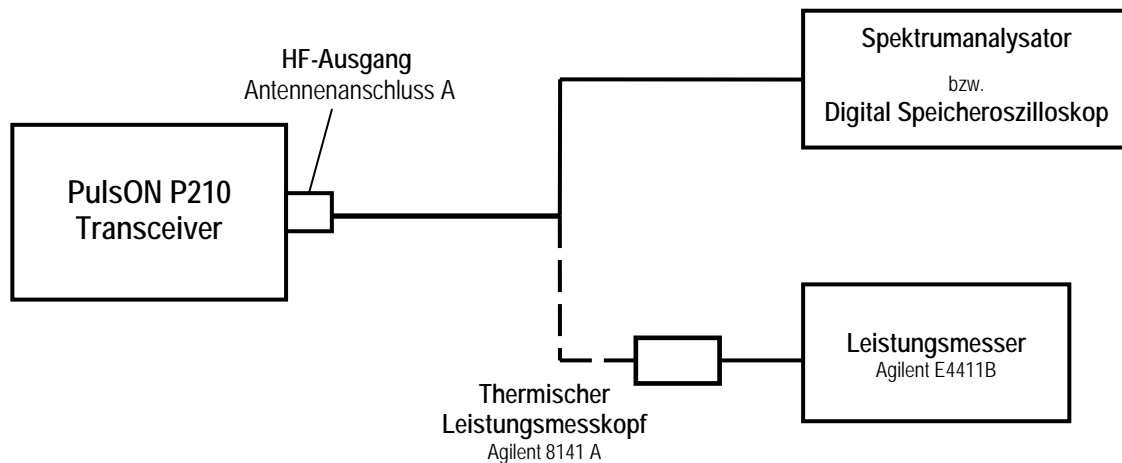


Abbildung 2.18: Schema der durchgeführten Referenzmessungen mit dem PulsON P210 UWB-Sendeempfänger. Die mittlere HF-Ausgangsleistung wurde alternativ mit Spektrumanalysator oder thermischem Leistungsmesskopf bestimmt.

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

Wie Tabelle 2.5 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 201 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 >100 ms (bei 201 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 (ca. 500 MHz bei WiMedia-Gerät) zu äquivalenter Rauschbandbreite<sup>5</sup> 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 2.18 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.

---

<sup>5</sup> 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 in 0,5 m und 1 m Distanz zur Quelle und wurden mittels Spektrumanalysator mit den oben angeführten Messparametern und den bereits in Kapitel 2.3.1 genannten Antennen durchgeführt. Immissionsmessungen mit Digital-Speicheroszilloskop wurden aufgrund der zu geringen Empfindlichkeit des Gerätes nicht durchgeführt (vgl. Kapitel 2.2.2 und Messergebnis in 20 cm Abstand in Abbildung 2.15).

Die Messungen erfolgten wieder quasi-isotrop, d.h., 12 Einzelmessungen mit Log.Per.- bzw. Horn-Antenne und 3 Einzelmessungen mit POD-Antenne. Tabelle 2.6 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 <sup>2</sup> ]	E [V/m]	S [mW/m <sup>2</sup> ]	E [V/m]	S [mW/m <sup>2</sup> ]	E [V/m]	S [mW/m <sup>2</sup> ]
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 2.6: 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 Feldstärken bzw. Leistungsflussdichten ausreichen ein räumliches Maximum mit der in [17] 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.

### 3 NUMERISCHE METHODEN 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-Messung 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 2.2.4). 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.

#### 3.1 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 ([18]-[25]) 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.

##### 3.1.1 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):

$$\text{Debye:} \quad \underline{\epsilon}(\omega) = \epsilon_{\infty} + \sum_{n=1}^P \frac{(\epsilon_s - \epsilon_{\infty}) \cdot A_n}{1 + j\omega\tau_n} \quad (3.1)$$

$$\text{Cole Cole:} \quad \underline{\epsilon}(\omega) = \epsilon_{\infty} + \sum_{n=1}^P \frac{(\epsilon_s - \epsilon_{\infty}) \cdot A_n}{1 + (j\omega\tau_n)^{1-\alpha_n}} \quad (3.2)$$

Lorentz: 
$$\underline{\varepsilon}(\omega) = \varepsilon_\infty + \sum_{n=1}^P \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \cdot A_n \cdot \omega^2}{\omega_n^2 + 2j\omega\tau_n - \omega^2} \quad (3.3)$$

Drude: 
$$\underline{\varepsilon}(\omega) = \varepsilon_\infty - \sum_{n=1}^P \frac{\omega_n^2}{\omega^2 - j\omega\tau_n} \quad (3.4)$$

Die Größen  $A_n$ ,  $\tau_n$  und  $\omega_n$  stehen in Gleichungen (3.1) bis (3.4) für die Polamplitude, die Relaxationszeitkonstante und die Kreisfrequenz des n-ten Pols.  $\varepsilon_s$  und  $\varepsilon_\infty$  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 [7] 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)* [26], bzw. in verbesserter Form *Linear Piecewise Recursive Convolution (PLRC)* [27], *Auxiliary Differential Equation (ADE)* [28]-[30] und *Z-transformation* [31] 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 [32].

Die RC-Methode geht vom Zusammenhang zwischen elektrischer Flussdichte und elektrischer Feldstärke im Zeitbereich unter Verwendung der elektrischen Suszeptibilität ( $\chi = \varepsilon_r - 1$ ) aus [32]:

$$\vec{D}(t) = \varepsilon_0 \varepsilon_\infty \vec{E}(t) + \varepsilon_0 \int_{\tau=0}^t \vec{E}(t-\tau) \chi(\tau) dt \quad (3.5)$$

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. 3.5) und einem sich erst etwas, durch die spezifischen Materialeigenschaften verzögert einstellenden (phasenverschobenen) Anteil zusammensetzt (zweiter Summand der rechten Seite der Gl. 3.5). In rein mathematischer Sichtweise ergibt sich Gleichung 3.5 beim Überführen der bekannten Beziehung

$$\vec{D}(\omega) = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E}(\omega) = \varepsilon_0 (1 + \chi(\omega)) \vec{E}(\omega) = \varepsilon_0 \vec{E}(\omega) + \varepsilon_0 \chi(\omega) \vec{E}(\omega) \quad (3.6)$$

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. 3.1 – 3.4) gewonnen.

Das Faltungsintegral in Gleichung 3.5 lässt sich schließlich effizient in den FDTD-Algorithmus integrieren.

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

$$\nabla \times \vec{H}(t) = \sigma \vec{E}(t) + \varepsilon_0 \varepsilon_\infty \frac{d}{dt} \vec{E}(t) + \sum_{p=1}^P \vec{J}_p(t) \quad (3.7)$$

D.h., die resultierende Stromdichte setzt sich aus einem reinen Leitungsstromanteil (erster Summand in Gl. 3.7), einem sich unverzögert einstellenden Verschiebungsstromanteil (zweiter Summand in Gl. 3.7), und einem sich entsprechend den spezifischen Materialeigenschaften erst verzögert einstellenden (phasenverschobenen) Verschiebungsstromanteil (dritter Summand in Gl. 3.7) zusammen. Dieser letztgenannten Stromdichteanteil (Polarisierungsstromdichte) setzt sich bei mehrpoligen Dispersionsmodellen aus mehreren Einzelanteilen (Summenzeichen in Gl. 3.7) zusammen. Die weitere Analyse führt für jeden Summanden dieser Polarisierungsstromdichte auf eine zusätzliche Differentialgleichung (daher der Name ADE) der Form

$$\vec{J}_p(t) + \tau_p \frac{d}{dt} \vec{J}_p(t) = \varepsilon_0 A_p \frac{d}{dt} \vec{E}(t) \quad (3.8)$$

die leicht in den FDTD-Algorithmus implementiert werden kann ( $\tau_p$  und  $A_p$  bezeichnen die Relaxationszeitkonstante und die Polamplitude des jeweiligen Dispersions-Poles, vgl. Gl. 3.1-3.4)

Eine detaillierte Beschreibung bzw. Ableitung des RC- und ADE-Verfahrens und die numerische Vorgehensweise bei der Implementierung in FDTD sind in [32] 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.

### 3.2 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 Mittefrequenz von 6,85 GHz

$$\vec{E}(t) = 2,76 * e^{-\left(\frac{t-0,5ns}{0,1213ns}\right)^2} * \cos(2\pi * 6.85GHz * (t - 0,5ns)) \quad (3.9)$$

in Form einer ebenen Welle verwendet. Dieses Signal ist in Abbildung 3.1 im Zeitbereich und in Abbildung 3.2 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).

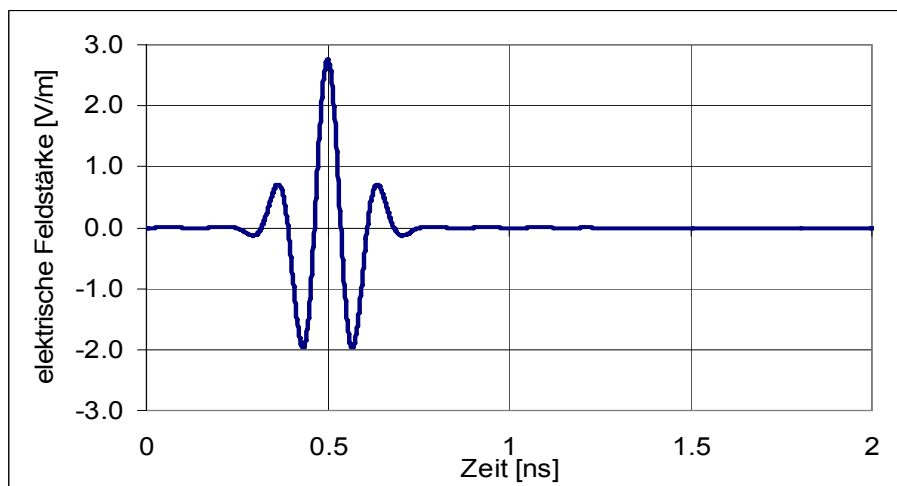


Abbildung 3.1: Zeitverlauf des für die folgenden FDTD-Berechnungen verwendeten UWB-Signals

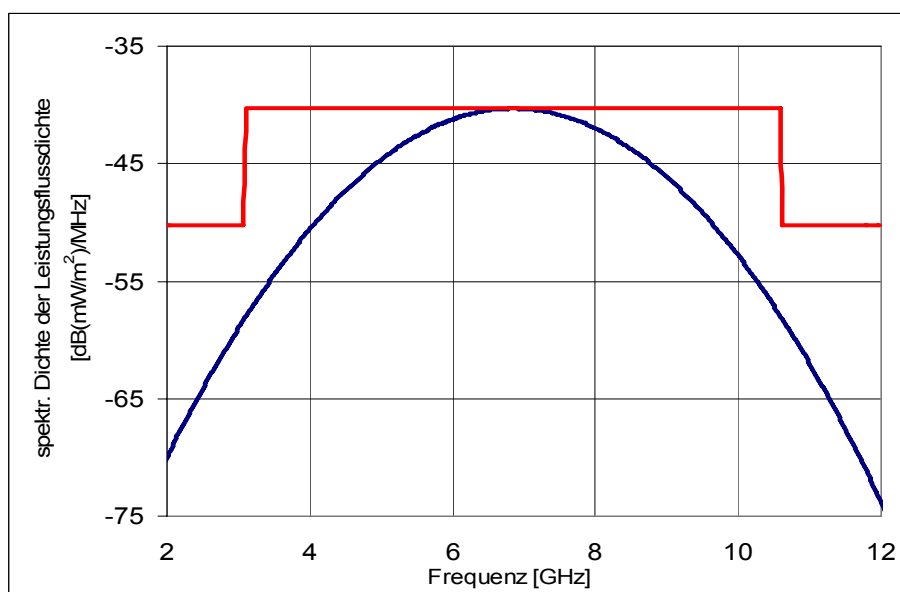


Abbildung 3.2: Spektrale Dichte der Leistungsflussdichte S in dB(mW/m<sup>2</sup>)/MHz des Signals in Abbildung 3.1. Rot eingezeichnet ist die entsprechende (auf Leistungsflussdichte in 0,25 m Abstand umgerechnete) Spektralmaske der FCC Regulierung.

### 3.2.1 Modell eines homogenen Gewebeblocks

Für die Untersuchung der Absorptionsverhältnisse in einem homogenen Medium, wurde ein homogener Block entsprechend Muskelgewebe als Modell betrachtet (Abbildung 3.3). 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.

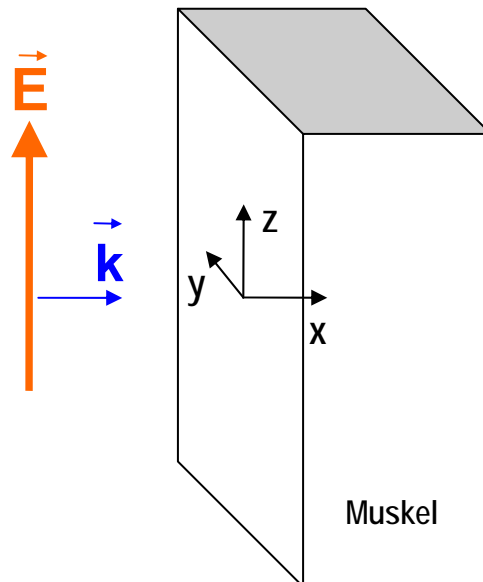


Abbildung 3.3: Schematische Darstellung des homogenen ebenen Modells

Die frequenzabhängigen Eigenschaften des Muskelgewebes wurden mittels eines 3-poligen Debye-Modells, mit den in Tabelle 3.1 zusammengefassten Parametern beschrieben (vgl. Gleichung 3-1).

	$\epsilon_s$	$\epsilon_\infty$	$\sigma_0$	$A_1$	$\tau_1$	$A_2$	$\tau_2$	$A_3$	$\tau_3$
	[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 3.1: Debye-Parameter für das untersuchte homogene Muskel-Modell in Abbildung 3.3

Abbildung 3.4 und Abbildung 3.5 zeigen einen Vergleich des verwendeten Debye-Modells (durchgezogene Linien) mit dem von Gabriel 1996 [7] 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 3.3 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.

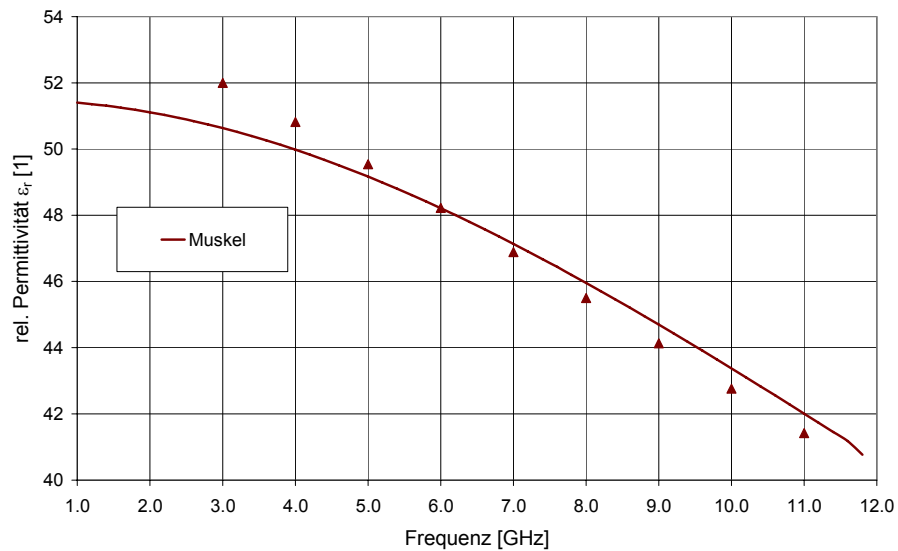


Abbildung 3.4: Verwendetes Debye-Dispersionsmodell (relative Permittivität  $\epsilon_r$ ) für Muskelgewebe im Vergleich zum Cole Cole Modell nach Gabriel 1996 [7]

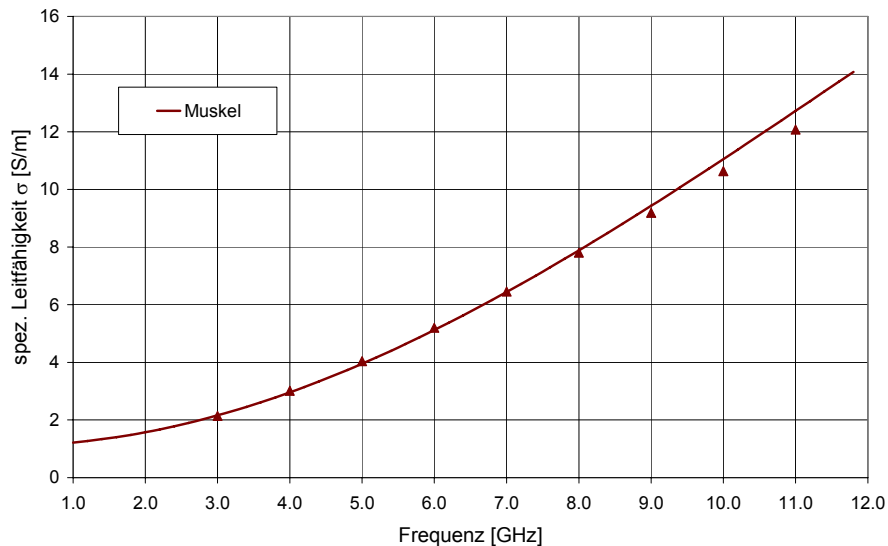
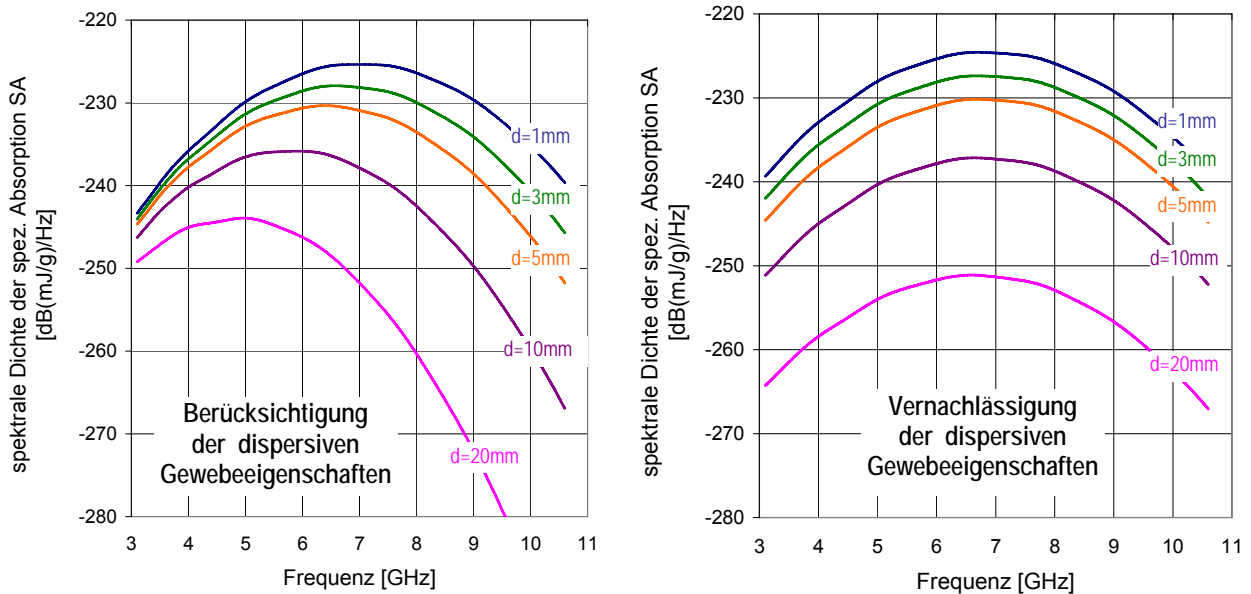


Abbildung 3.5: Verwendetes Debye-Dispersionsmodell (Leitfähigkeit  $\sigma$ ) für Muskelgewebe im Vergleich zum Cole Cole Modell nach Gabriel 1996 [7]

Abbildung 3.6 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 3.6 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.

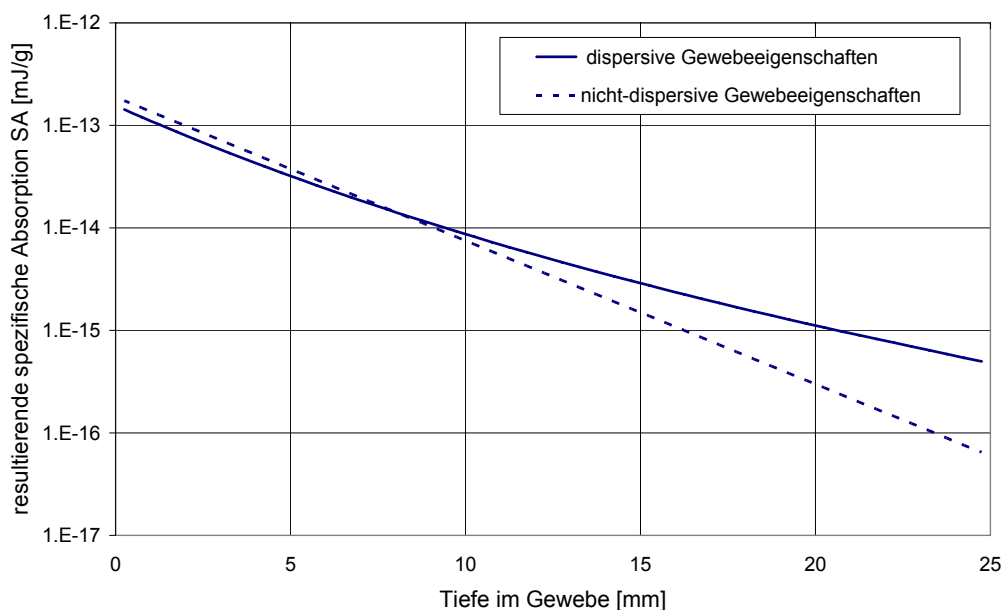




**Abbildung 3.6:** Ortsabhängigkeit der spektralen Zusammensetzung der spezifischen Absorption im homogenen Gewebemodell. Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse bei Berücksichtigung (links) und bei Vernachlässigung (rechts) der dispersiven Gewebeparameter. Dargestellt sind jeweils die spektralen 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 3.7 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 3.7 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 3.7:** Resultierende spezifische Absorption SA (Integral über die spektrale Dichte) in Abhängigkeit von der Tiefe im Gewebe (entlang der x-Achse gemäß Abbildung 3.3)

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 3.8 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 3.8 unschwer zu erkennen ist.

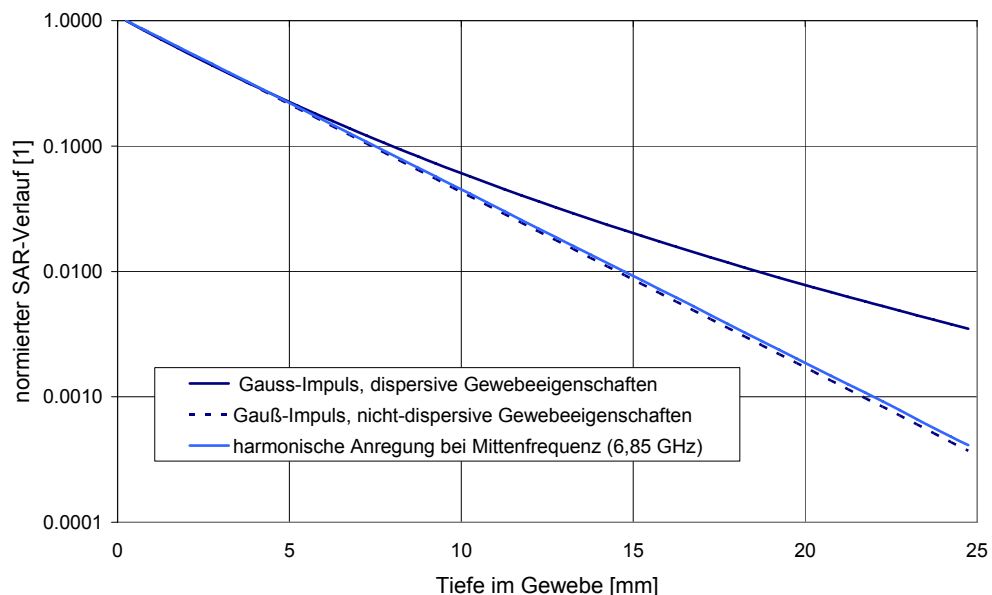


Abbildung 3.8: Normierter Vergleich der SAR-Verläufe entlang der x-Achse (vgl. Abbildung 3.3) für UWB-Anregung und schmalbandiger Anregung bei der Mittenfrequenz

### 3.2.2 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 3.2 zusammengefassten Parametern beschrieben (vgl. Gleichung 3-1).

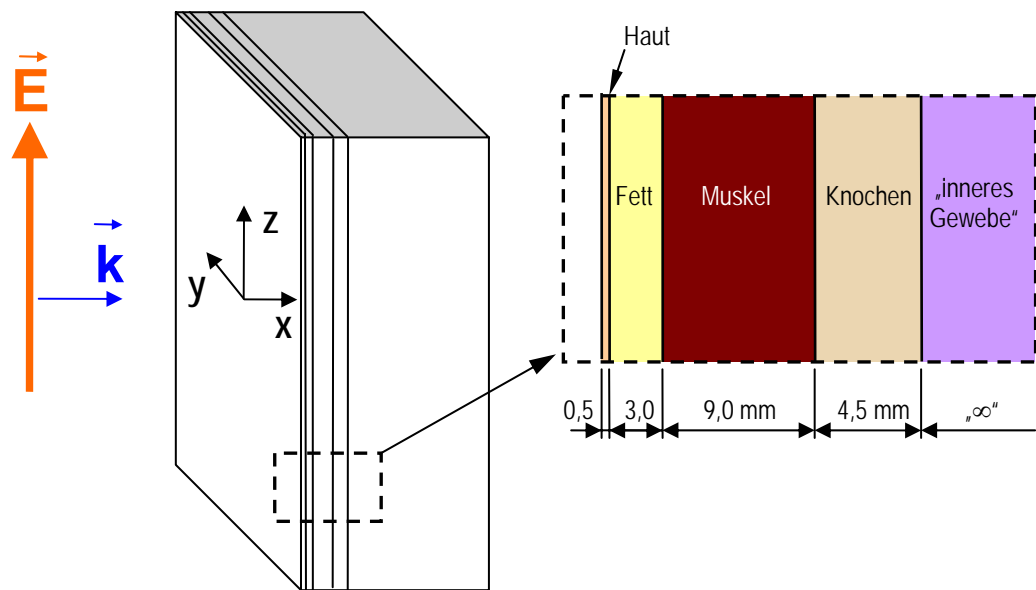


Abbildung 3.9: Schematische Darstellung des ebenen Schichtenmodells

	$\epsilon_s$	$\epsilon_\infty$	$\sigma_0$	$A_1$	$\tau_1$	$A_2$	$\tau_2$	$A_3$	$\tau_3$
	[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 3.2: Debye-Parameter für das untersuchte eben Schichtenmodell in Abbildung 3.9

Abbildung 3.10 und Abbildung 3.11 zeigen Vergleiche der verwendeten Debye-Modelle für die betrachteten Gewebetypen (durchgezogene Linien) mit den von Gabriel 1996 [7] 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 3.9 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.

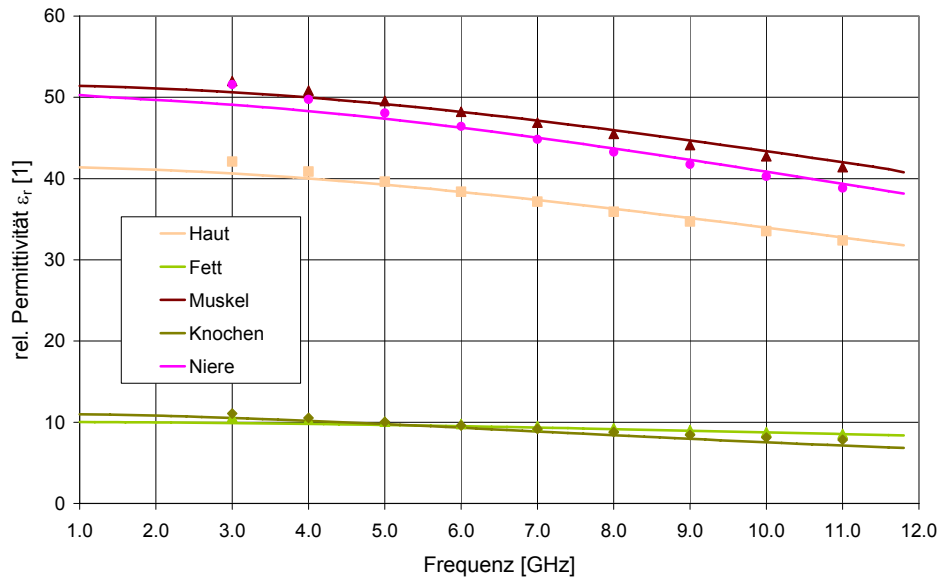


Abbildung 3.10: Verwendete Debye-Dispersionsmodelle (relative Permittivität  $\epsilon_r$ ) für die 5 betrachteten Gewebetypen im Vergleich zu den Cole Cole Modellen nach Gabriel 1996 [7]

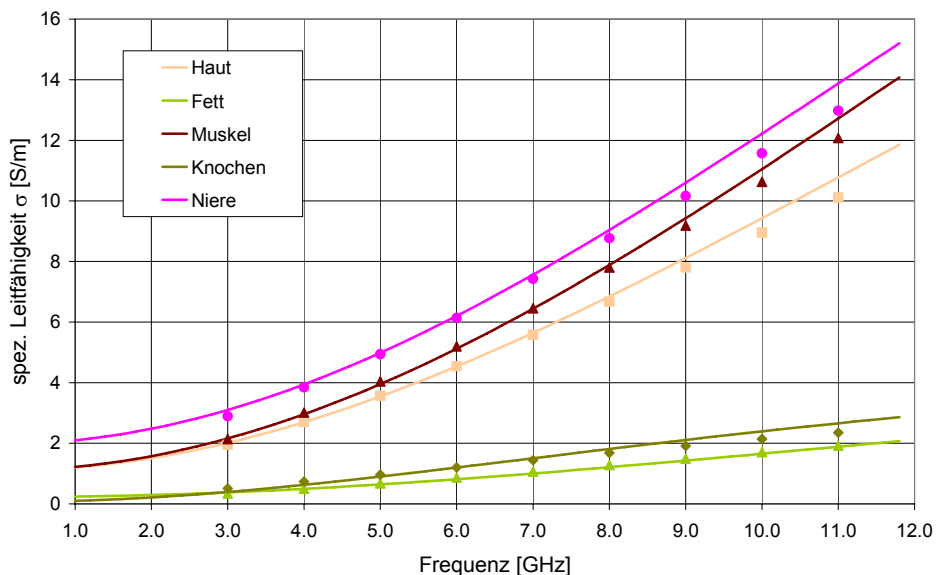
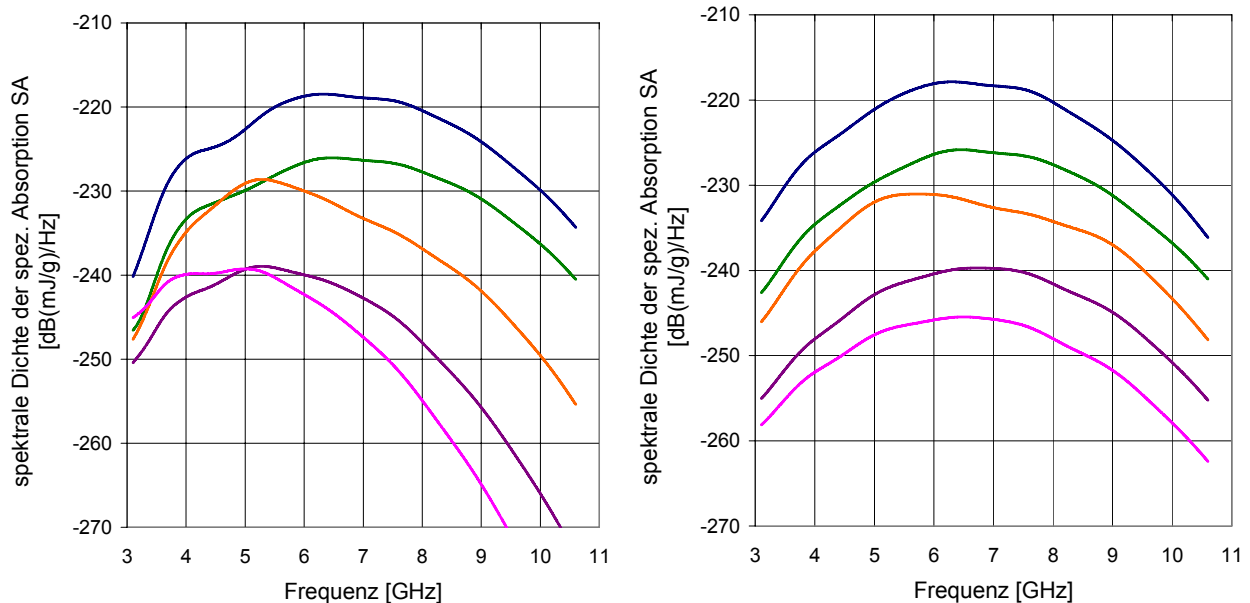


Abbildung 3.11: Verwendete Debye-Dispersionsmodelle (spezifische Leitfähigkeit  $\sigma$ ) für die 5 betrachteten Gewebetypen im Vergleich zu den Cole Cole Modellen nach Gabriel 1996 [7]

Abbildung 3.12 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 3.12 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 3.12:** 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 3.12 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 3.13. 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).

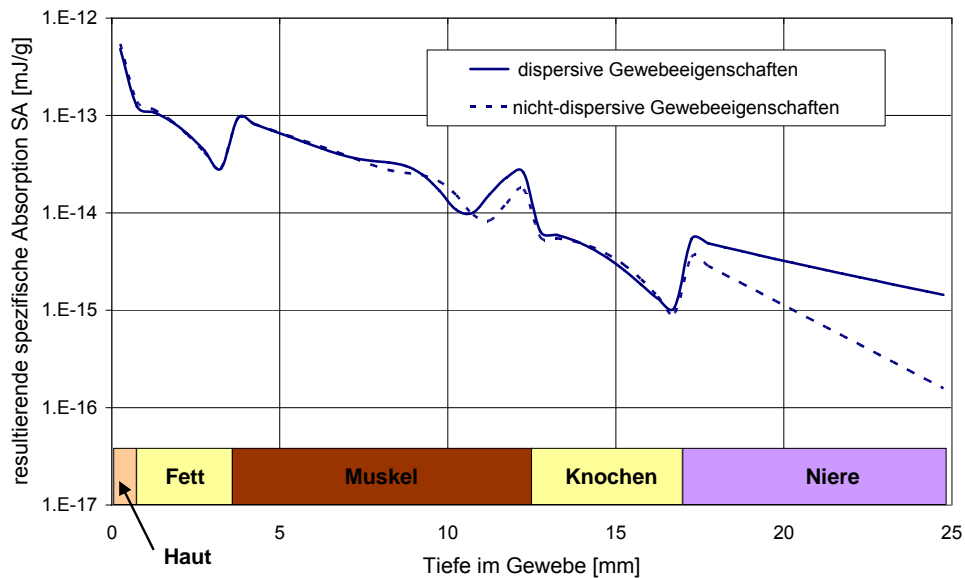


Abbildung 3.13: Resultierende spezifische Absorption SA (Integral über die spektrale Dichte) in Abhängigkeit von der Tiefe im Schichtenmodell (entlang der x-Achse gemäß Abbildung 3.9)

Zu Vergleichszwecken stellt Abbildung 3.14 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) leistungsäquivalenten 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 3.14 zu erkennen, gilt dies wieder besonders für tiefer liegende Gewebeschichten.

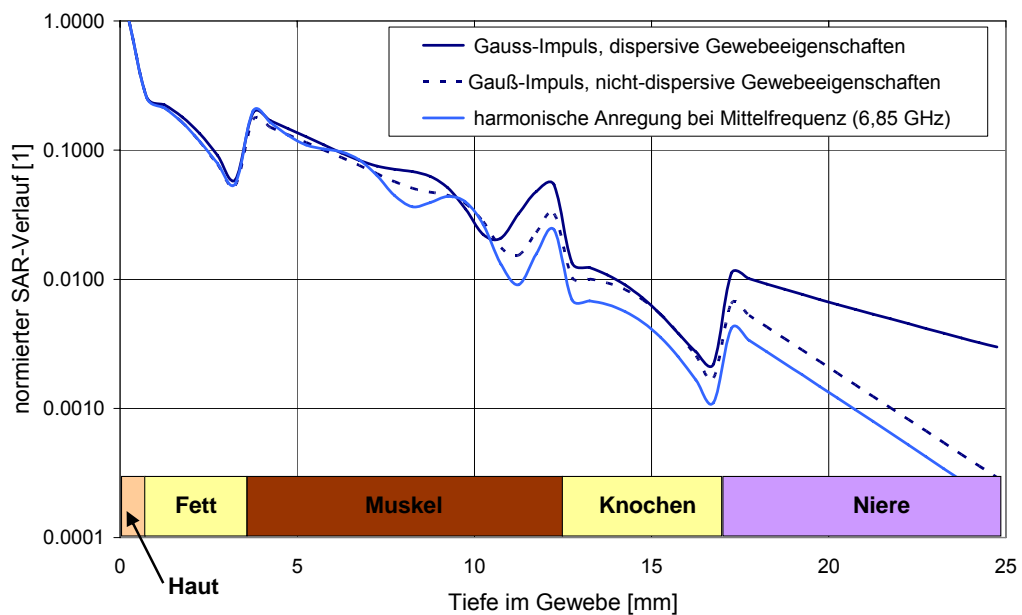


Abbildung 3.14: Normierter Vergleich der SAR-Verläufe entlang der x-Achse (vgl. Abbildung 3.9) für UWB-Anregung und schmalbandiger Anregung bei der Mittenfrequenz im Fall des Schichtenmodells

### 3.3 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“ subsumiert<sup>6</sup> 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 [33], die SAR als die adäquate Beurteilungsgröße festgelegt, um eine biologisch bedenkliche Gewebeerwärmung durch die Exposition zu vermeiden. Formal

---

<sup>6</sup> 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 [33] 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:

$$SAR = \frac{dW}{dt \cdot m} \quad (3.10)$$

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 [22] 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 [22] 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 [33] 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 darstellt. Eine Bevorzugung der SA gegenüber der SAR, mit dem Ziel einer Überbewertung der Exposition vorzubeugen, wie in [22] 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 [34]. 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 [33] 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 3.2.2 betrachtete hypothetische Befeldungssituation mit einer maximalen SAR<sub>10g</sub> von  $3,89 \cdot 10^{-6}$  mW/g und maximalen SA<sub>10g</sub> 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.

## 4 AKTUELLER STAND DER UWB-REGULIERUNG IN EUROPA

Gemäß der Entscheidung der Europäischen Kommission 2007/131/EG vom 21. Februar 2007 [2] waren alle EU-Mitgliedstaaten dazu angehalten die funkregulatorischen Voraussetzungen für UWB-Geräte im Frequenzbereich 3,1-10,6 GHz innerhalb von 6 Monaten auf nationaler Ebene zu schaffen.

Mit teilweise geringfügigen Verzögerungen ist dies in Deutschland, der Schweiz und Österreich mittlerweile geschehen.

### 4.1 Situation in Deutschland

Am 16. Jänner 2008 hat die Bundesnetzagentur mit der Veröffentlichung der Verfügung Vfg 1/2008 [35] die formal rechtlichen Grundlagen hinsichtlich der Frequenznutzung für UWB-Geräte im Frequenzbereich zwischen 30 MHz und 10,6 GHz 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 4.1 fasst diese Bedingungen zusammen und Abbildung 4.1 zeigt die dadurch definierte Spektralmaske für die maximale mittlere EIRP-Sendeleistungsdichte.

Frequenzbereich [GHz]	max. mittlere EIRP-Sendeleistungsdichte [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 4.1: 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 2.1 und Abbildung 2.1).

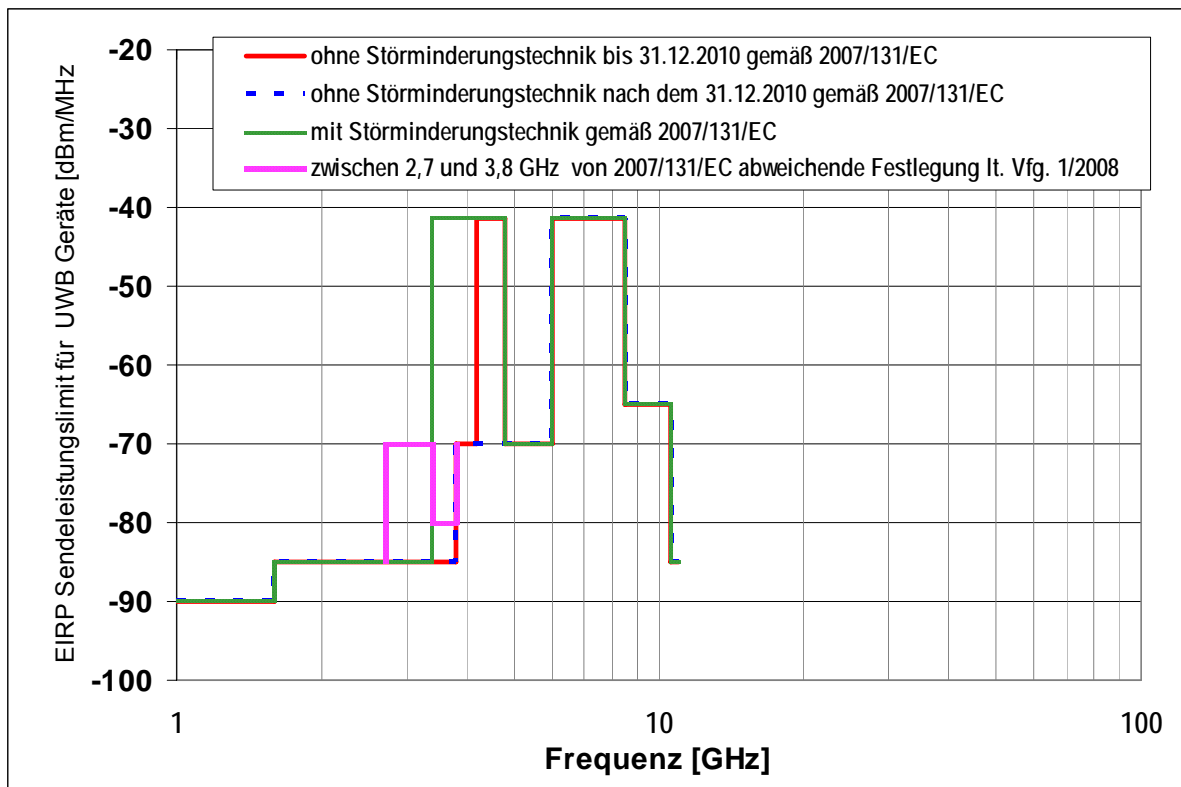


Abbildung 4.1: Graphische Darstellung der maximalen mittleren EIRP Sendeleistungsdichten für UWB-Geräte gemäß der aktuellen Verfügung Vfg 1/2008 der Bundesnetzagentur

## 4.2 Situation in der Schweiz

In der Schweiz existieren bereits seit 2007 detaillierte Funkschnittstellenbeschreibungen mit den Bezeichnungen *Radio Interface Regulation* RIR 1023-01 bis 05 für UWB-Geräte. Die technischen Spezifikationen entsprechen weitgehend den Vorgaben der Entscheidung der Europäischen Kommission 2007/131/EG.

## 4.3 Situation in Österreich

Im aktuellen Entwurf einer Neuausgabe der Frequenznutzungsverordnung sind UWB-Anwendungen im Frequenzbereich 4,1-10,6 GHz, mit Verweis auf die Bedingungen der Entscheidung der Europäischen Kommission 2007/131/EG bereits eingearbeitet. Die offizielle Herausgabe dieses Dokuments steht noch aus (Stand 03.02.2008).

## 5 WEITERES VORGEHEN IM PROJEKT

### 5.1 Messtechnische Untersuchungen

Da in den meisten europäischen Ländern die funkregulatorischen Voraussetzungen für UWB-Geräte, wenn überhaupt, erst seit wenigen Wochen gegeben sind, sind nach wie vor keine UWB-Geräte gemäß der europäischen Funkregulierung am Markt erhältlich.

Die durchzuführenden messtechnischen Untersuchungen werden daher mit den bereits angekauften, zur FCC-Regulierung konformen Geräten, dem *Belkin Cable-Free USB Hub* (MB-OFDM-UWB nach WiMedia) und dem *PulsON P210* von *Time Domain, Inc.* (Impuls-UWB) durchgeführt, wobei unterschiedliche Expositionsrandbedingungen betrachtet werden. Im Speziellen sollen die Immissionen im Umgebungsbereich der Geräte für annähernd ideale Freiraumausbreitung (echofreier Raum), ideal reflektierender Umgebung (metallische Begrenzungen), teilweise reflektierender Umgebung (z.B. metallisches Objekt hinter der Quelle bzw. zwischen Quelle und Messpunkt) und in zwei weiteren typischen Umgebungen (Büroarbeitsplatz, Besprechungsraum) untersucht werden.

Parallel dazu wird der europäische Markt hinsichtlich der Verfügbarkeit erster UWB-Geräte weiter beobachtet. Sollten bis ca. Mitte März 2008 entsprechende Geräte verfügbar werden, wird versucht, auch diese noch in die messtechnischen Untersuchungen mit einzubeziehen, wobei dann (im Sinne einer Aufwandsneutralität) die Anzahl der betrachteten Randbedingungen entsprechend reduziert wird.

### 5.2 Numerische Berechnungen

Trotz der Tatsache, dass entsprechende Anwendungen noch nicht kommerziell verfügbar sind, sind bereits einige Expositionsszenarien mit körpernaheem Betrieb von UWB-Sendegeräten abzusehen.

Folgende Szenarien sollen mindestens untersucht werden:

- Quelle nahe Oberschenkel (z.B.: Situation eines Notebooks mit UWB-Modul)
- Quelle unmittelbar am Brustkorb (z.B.: Körpersensor-UWB-Modul mit in Kleidung integrierter Antenne oder beliebiges anderes UWB-Gerät in der Brusttasche)
- Quelle unmittelbar am Kopf (z.B.: EEG-Signalübertragung über UWB)
- Quelle am Handgelenk (Körpersensor-UWB-Modul als Armband)
- UWB-Quelle unmittelbar vor dem Auge

Alle betrachteten genannten Szenarien sollen zumindest für 2-3 unterschiedliche spektrale Zusammensetzungen des Quellensignals untersucht werden.

## 6 LITERATUR

- [1] Schmid G, Neubauer G. Bestimmung der Exposition durch Ultra-Wideband Technologien. Teil 1(Arbeitspaket 1): Bestandsaufnahme. 1. Zwischenbericht zum gegenständlichen Forschungsvorhaben, ARC-IT-0212, Juli 2007
- [2] 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] 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>
- [4] Eisenbacher M. Optimierung von Ultra-Wideband-Signalen (UWB). Forschungsberichte aus dem Institut für Nachrichtentechnik der Universität Karlsruhe, Band 16, ISSN: 1433-3821
- [5] ISO/IEC 26907:2007: Information technology -- Telecommunications and information exchange between systems -- High Rate Ultra Wideband PHY and MAC Standard, March 2007
- [6] ISO/IEC 26908:2007: Information technology -- Telecommunications and information exchange between systems -- MAC-PHY Interface for ISO/IEC 26907, January 2007
- [7] 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)
- [8] 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
- [9] Tektronix, Digital Storage Oscilloscopes TDS 6000 Series, Technical Specifications
- [10] Agilent, Infiniium DSO 80000 Series Oscilloscopes, Technical Specifications
- [11] Time Domain Corp.: <http://www.timedomain.com>
- [12] Fa. Belkin: Cable-Free USB Hub, User manual:  
[http://www.belkin.com/support/dl/P75325\\_F5U301\\_manual.pdf](http://www.belkin.com/support/dl/P75325_F5U301_manual.pdf)
- [13] 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](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/schriftenreihe_rs702.pdf)

- [14] 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](http://www.seibersdorf-rf.com/docs/leaflet/W_Products_POD16_POD618_engl.pdf)
- [15] Rohde und Schwarz, Logarithmisch Periodische Antenne, Modell SAS-200/518, Produktbeschreibung
- [16] EMCO, Model 3115 Double Ridged Waveguide Horn Antenna, Produktspezifikationen, erhältlich z.B. unter [http://www.leasametric.com/tem/datasheet/EMCO/3115\\_EN.pdf](http://www.leasametric.com/tem/datasheet/EMCO/3115_EN.pdf)
- [17] 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](http://www.emf-forschungsprogramm.de/forschung/dosimetrie/dosimetrie_abges/dosi_015_AB.pdf)
- [18] Filonenko E, Hand J, Vilches T, Toumazou C, Propagation of ultrawideband pulses and specific absorption rate within the human head, 23<sup>rd</sup> Annual Review of Progress in Applied Computational Electromagnetics, March 19-23, 2007 Verona. Italy, Conference Proceedings (CD) pp. 799-804.
- [19] 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
- [20] Lim HB, Tan HX, FDTD analysis of UWB pulse interaction with biological tissues, 17<sup>th</sup> International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2006, Conference Proceedings (CD) pp. 117-120
- [21] 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
- [22] 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
- [23] Simicevic N, Three-dimensional FDTD simulation of biomaterial exposure to electromagnetic nanopulses. Physics in Medicine and Biology, Vol. 50, pp.5041-5053, 2005
- [24] 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
- [25] 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]
- [26] Luebbers RJ, Hunsberger F, FDTD for Nth-order dispersive media, IEEE Transaction on Antennas and Propagation, Vol. 40, pp.1297-1301, 1992
- [27] 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
- [28] 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

- [29] 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
- [30] 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
- [31] Sullivan DM, Frequency dependent FDTD methods using Z-transforms, *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, Vol. 40, pp.1223-1230, 1992
- [32] Taflove A, Hagness SC, *Computational Electrodynamics. The finite difference time-domain method*, second edition, 2000, Artech House, Inc., ISBN 1-58053-076-1
- [33] 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
- [34] Frey A, Messenger R. Human perception of illumination with pulsed ultra high frequency electromagnetic radiation. *Science*, Vol.181, pp.356-358, 1973.
- [35] 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