

Charakterisierung von Antennen für die Ultra-Wideband-Technik

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTOR-INGENIEURS

von der Fakultät für

Elektrotechnik und Informationstechnik
der Universität Fridericiana Karlsruhe (TH)

genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Werner Sörgel

geb. in Karlsruhe

Tag der mündlichen Prüfung:

21. Mai 2007

Hauptreferent:

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Dr.-Ing. E.h. Werner Wiesbeck

Korreferent:

Prof. Dr. rer.nat. Friedrich Jondral

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	i
Abkürzungsverzeichnis	iv
1 Einleitung	1
1.1 Stand der UWB-Forschung	3
1.2 Aufgabenstellung	4
1.3 Lösungsansatz und Gliederung der Arbeit	5
2 Beschreibung des transienten Übertragungsverhaltens	7
2.1 Feldtheoretische Beschreibung der Abstrahlung	9
2.2 Antennenübertragungsfunktion	10
2.2.1 Sendefall	11
2.2.2 Empfangsfall	12
2.2.3 Reziprozitätstheorem	13
2.2.4 Polarisierung	16
2.2.5 Netzwerkmodell der Übertragungsstrecke	18
2.3 Bewertung von Antenneneigenschaften	22
2.3.1 Intrinsische Gütekriterien im Frequenzbereich	23
2.3.2 Intrinsische Gütekriterien im Zeitbereich	27
2.3.3 Extrinsische Gütekriterien	28
2.3.4 Quellpunkt und Phasenzentrum	31
3 Bestimmung der Antennenübertragungsfunktion	35
3.1 Analytisches Modell am Beispiel eines Dipols	35
3.2 Numerische Methoden	40

3.3	Messtechnische Bestimmung	43
3.3.1	Messaufbau	46
3.3.2	Kalibration	47
3.3.3	Zwei-Antennen-Methode	50
3.3.4	Drei-Antennen-Methode	55
3.3.5	Direkte Messung mit bekanntem Standard	57
3.3.6	Verifikation im Zeitbereich	59
4	Antennenkonzepte für Basisstationen	61
4.1	Vivaldi-Antennen	61
4.1.1	Kompakte Vivaldi-Antenne	63
4.1.2	Optimiertes Speisetzwerk	69
4.1.3	Antipodaler Vivaldi-Antennen Entwurf	74
4.2	Logarithmisch-periodische Dipolgruppen-Antenne	78
4.2.1	Entwurf für reduzierte Größe	78
4.2.2	Transiente Eigenschaften	83
4.3	Spiralantennen	87
4.3.1	Transiente Polarimetrie am Beispiel einer Spiralantenne	88
4.4	Bewertung der vorgestellten Konzepte	92
5	Antennenkonzepte mit reduzierten Abmessungen	93
5.1	Aperturgekoppelte Bowtie-Antennen	94
5.2	Diamantförmige Schlitzantennen	104
5.3	Bewertung der vorgestellten Konzepte	109
6	Ultrabreitband-Antennengruppen	111
6.1	Modellbildung	111
6.2	Fernfeldkriterium	114
6.3	Lineare äquidistante Antennengruppe	115
6.4	Strahlschwenkung	120
6.5	Experimenteller Aufbau	124
7	Entfaltung der Antennen aus dem UWB-Funkkanal	129
7.1	Entfaltungsmethode	129
7.2	Messsystem	132

7.3 Messergebnisse	135
8 Zusammenfassung	139
A Anhang	143
A.1 Verifikationsmessungen	143
A.2 Prozessierung der Daten	148
Literaturverzeichnis	149

1 Einleitung

Anwendungen der Funkkommunikation verwenden zur Übertragung der Information Frequenzen in der Größenordnung von einigen kHz bis in den THz-Bereich. Dabei steht innerhalb der Reichweite des jeweiligen Senders das Spektrum der Radiowellen nur einmal zur Verfügung. Demgegenüber steht eine Vielzahl von Anwendungen. Folglich ist die Ressource Spektrum ein wertvolles Gut, das möglichst sparsam genutzt werden muss. Dies wurde z.B. bei der Versteigerung von Funklizenzen zu hohen Preisen in der Vergangenheit deutlich. Dieselbe Problematik ergibt sich auch für Anwendungen der drahtlosen Sensorik, bei der elektromagnetische Wellen zur Gewinnung von Information verwendet werden. Gleichzeitig bietet die Verwendung größerer Bandbreiten enorme Vorteile für alle Anwendungen, bei denen mehr Information übertragen bzw. extrahiert werden soll. Große Bandbreiten bieten mehr Übertragungskapazität, die auf eine größere Anzahl von Nutzern verteilt werden kann, genauso wie bessere Auflösung der Sensorinformation.

Ein Ansatz zur effizienten Nutzung größter Bandbreiten ist die Ultrabreitbandtechnik (engl. *ultra wideband*, *UWB*). Der Kerngedanke der UWB-Technik ist, das bereits an viele schmalbandige Dienste vergebene Spektrum nochmals zu verwenden, und somit die Gesamtausnutzung zu steigern. Dabei wird eine minimale Sendeleistungsdichte verwendet, so dass es zu keiner störenden Beeinflussung der primären Dienste kommt, sondern der UWB-Dienst die bereits vorhandene Rauschleistungsdichte nur minimal erhöht. Weiterführende Mechanismen zum Schutz der primär zugewiesenen Dienste sind Gegenstand der Diskussion um aktuelle Regulierungen in Europa. Umgekehrt muss der UWB-Empfänger auch in der Gegenwart schmalbandiger Dienste funktionieren. Dies stellt hohe Anforderungen an die verwendete Funktechnik [Ree05]. In den USA wurde bereits 2002 eine Frequenzbereichszuweisung erlassen, die richtungsweisend den Betrieb von UWB-Geräten ermöglicht. In Bild 1.1 ist die in den USA erlaubte spektrale Leistungsdichte als effektive isotrope Sendeleistung (engl. *effective isotropic radiated power*, *EIRP*) bezogen auf 1 MHz Bandbreite aufgetragen [FCC02].

Mit der Verfügbarkeit dieser großen Bandbreite von 7,5 GHz werden eine Vielzahl

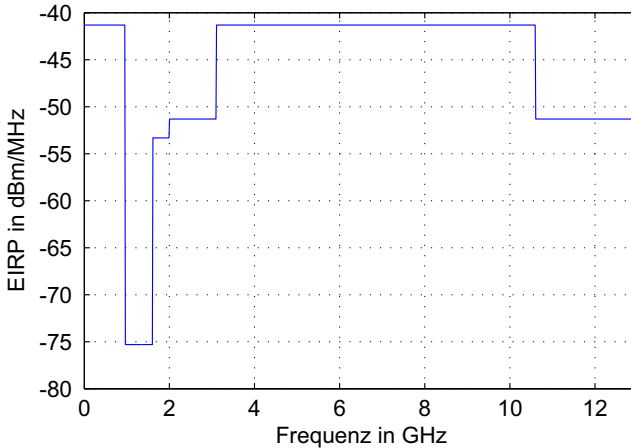


Bild 1.1: Regulierung der für UWB-Anwendungen zulässigen spektralen Leistungsdichte für UWB-Innenraumanwendungen in USA.

von Anwendungen in Kommunikation und Sensorik möglich z.B. Kommunikation mit hohen Datenraten bis in den GBit/s Bereich über Entfernungen von 2–4 m [dBHK⁺05], [Ree05], [GMK04], [OHI04]. Für Datenraten im Bereich 100 MBit/s sind immerhin noch Reichweiten bis 10 m möglich. Für die Anwendung von Sensornetzwerken werden Kommunikationsverbindungen mit niedrigen Datenraten und gleichzeitig einer hohen Anzahl von Sendern und Reichweiten von mehreren 100 m kombiniert. RADAR-Anwendungen profitieren von der hohen zeitlichen Auflösung, die mit UWB Systemen möglich ist und sich in eine hohe Ortsauflösung übersetzt. Transiente Signalformen mit spektralen Anteilen bei tiefen Frequenzen weisen eine sehr gute Durchdringung von Wänden und Böden bei gleichzeitig guter zeitlicher Auflösung auf. Dies ermöglicht Anwendungen von Through-wall-imaging [WFN03] und Ground-Penetrating-RADAR [SP03]. So können Informationen über verborgene Menschen und Objekte gesammelt werden. Dies hat eine hohe Relevanz sowohl für Sicherheitsanwendungen, bei denen Beobachtungen durch die Wand hindurch vorgenommen werden, als auch für die Detektion von Minen im Boden. Des Weiteren kann man mit UWB-Technik eine präzise Lokalisierung von mit aktiven UWB-Markierungen (engl. *tags*) gekennzeichneten Menschen und Objekten erfolgen. Dies führt zu neuen Anwendungen bei der Automatisierung mit autonomen Robotern, der Steigerung der Effizienz von Arbeitsabläufen und der Raumnutzung.

Unabhängig von der kontroversen Diskussion der Koexistenzaspekte [ECC04] [SBYW05], die am Ende eine politische Entscheidung erfordert, birgt die UWB-Technik eine Vielzahl wissenschaftlicher und technischer Herausforderungen, die in der großen Bandbreite und der damit verbundenen Betrachtung von transienten Vorgängen zur Übertragung und Gewinnung von Information begründet liegen.

1.1 Stand der UWB-Forschung

Die Vorläufer der UWB-Technik wurden bereits mit den ersten Versuchen zur Erzeugung und zum Nachweis elektromagnetischer Wellen geboren. Heinrich Hertz übertrug 1888 in Karlsruhe zum ersten Mal Energie mittels kurzer Funken-Induktor-Impulse über eine Distanz von maximal 18 m. Damals war dies die einzige zur Verfügung stehende Methode zur Erzeugung hochfrequenter Signale. Die Impulse mit einer Zeitdauer von einigen 10 ns erregten eine Dipolantenne mit einer Resonanzfrequenz von 40 MHz. Erst in den 1950er Jahren wurde jedoch die UWB-Technik im Sinne transientser Signaltechnik aufgrund der Notwendigkeit von Sensorsystemen mit hoher Zeitauflösung und Übertragungssystemen für die abhörsichere Kommunikation von einem kleinen Kreis von Fachleuten aufgegriffen und weiterentwickelt. Für die Kommunikation ermöglicht eine große Bandbreite eine erhebliche Steigerung der theoretischen Shannon-Kanalkapazität $C = B \log_2(1 + \frac{S}{N})$, die linear mit der Bandbreite B und logarithmisch mit dem Signal-zu-Rauschverhältnis (engl. *signal to noise ratio*, SNR) $\frac{S}{N}$ anwächst. Damit wird je nach Anwendung ein Austausch zwischen der Anzahl der Nutzer, der Datenrate des einzelnen Nutzers und der Reichweite möglich, bei gleichzeitig geringer spektraler Leistungsdichte. Diese geringe spektrale Leistungsdichte verspricht sowohl Abhörsicherheit bei der militärischen Anwendung als auch die Koexistenz mit schmalbandigen Systemen im gleichen Frequenzbereich. Ein weiterer Vorteil ist die prinzipiell mögliche Verbindung von Kommunikations- und Sensoriksystemen, insbesondere für die Positionsbestimmung, die auf der grundlegend gleichen Technologie basieren können.

Ein Kennzeichen von impulsbasierten Systemen ist die kurze Zeitdauer der zu Grunde liegenden Signalfom. Bei sehr kurzen Impulsen erfolgt die Übertragung quasi ohne sinusförmigen Träger direkt im ultrabreitbandigen Basisband. Der Begriff Impulsübertragung lässt dabei noch weitreichende Freiheiten bei der Wahl der Codierung der Symbole, des Mehrfachzugriffsverfahrens (multiple access, MAC) und der korrespondierenden Empfängerstrukturen zu. Zur sicheren Informationsübertragung muss genügend Energie im Signal enthalten sein. Dies wird durch die Wiederholung

der einzelnen Impulse erreicht, d.h. ein Symbol wird in einen Impulszug umgesetzt. Eine grundlegende Beschreibung des häufig zitierten Verfahrens zur Puls-Positions Modulation (PPM) findet man in [WS98]. Eine Wiederholung mit konstanter Pulsrepetitionsrate f_{PRF} führt zum Auftreten starker spektraler Linien, die eine effiziente Nutzung der spektralen Maske verhindern. Zur Vermeidung dieses Phänomens wird Dithering bzw. Time-Hopping vorgeschlagen, das die Anfangszeiten der einzelnen Impulse pseudozufällig verschiebt. Das Sendesignal wird dabei aus zeitlich versetzten Repliken des Grundimpulses aufgebaut [Eis06]. Zur Übertragung werden Antennensysteme benötigt, die die jeweils verwendeten Signalformen verzerrungsarm und effizient abstrahlen und in ihrer Form an die Anwendungen in tragbaren Geräten angepasst sind. In diesem Zusammenhang ergeben sich Verbindungen zur militärisch genutzten UWB-Technik, die die Erzeugung einer möglichst hohen Spitzenfeldstärke bei Impulsdauern im ns Bereich zum Ziel hat. Die erzeugten impulsartigen Zeitverläufe der elektrischen Feldstärke dienen z.B. zur Simulation eines nuklearen elektromagnetischen Impulses und der Erforschung dessen Auswirkungen [Bau92]. In diesem Umfeld wurde bereits früh eine dedizierte Messtechnik zur Erfassung transientser elektromagnetischer Vorgänge entwickelt [BBG⁺78]. Hierbei wird die Betrachtung der Antennen als lineare Übertrager und deren Charakterisierung mittels Antennenimpulsantworten begründet [FB92]. Die Anwendung dieser Methode unter Verwendung eines Netzwerkanalysators als maßgebliches Messinstrument findet sich in [SAV00]. Damit sind alle Voraussetzungen geschaffen, die die Anwendung der Antennenimpulsantwort für die Beschreibung von UWB-Systemen in Anlehnung an die FCC-Regulierung ermöglichen.

1.2 Aufgabenstellung

Für den Entwurf von UWB-Systemen werden detaillierte Kenntnisse über die einzusetzenden Antennen benötigt, da ohne diese keine effektive Übertragung über die Luftschnittstelle möglich ist. Ziel hierbei ist es, Antennen zu entwickeln, die im UWB-Frequenzbereich nicht nur eine gute Eingangsanpassung und einen hohen Wirkungsgrad aufweisen, sondern auch in der Lage sind, transiente Signale möglichst verzerrungsfrei zu empfangen und zu senden. Dies kann anhand bisheriger Methoden zur Antennencharakterisierung nicht beurteilt werden, da bei dem klassischen Maß Antennengewinn keine Phaseninformation enthalten ist. Vielmehr muss die Übertragungsfunktion des Übertragungssystems einen möglichst flachen Frequenzgang und einen linearen Phasengang aufweisen. Entsprechend sollte die

Antennenimpulsantwort einem nadelförmigen Impuls mit hohem Spitzenwert und geringer zeitlicher Breite nahe kommen. Diese Anforderung sollte im gesamten auszuleuchtenden Winkelbereich erfüllt werden. Zum Nachweis dieser Eigenschaften ist die Entwicklung einer geeigneten Antennen-Messtechnik notwendig, welche die präzise und reproduzierbare Messung der Antennenimpulsantwort ermöglicht. Hierbei steht die Verwendung von Messsystemen im Vordergrund, die auf dem Prinzip des Netzwerkanalysators basieren und die typischerweise bereits vielfach in Antennenmesseinrichtungen verfügbar sind, jedoch bislang nicht für diesen Zweck genutzt werden.

Die umfassende Charakterisierung der Antennen und Antennensysteme stellt folglich den wesentlichen Schritt dar, um vorhandene Antennenkonzepte beurteilen und weiterentwickeln zu können. Hierfür sollen in dieser Arbeit die notwendigen Methoden und Gütekriterien entwickelt und angewendet werden. Unter Anwendung der zuvor erarbeiteten Methodik werden neuartige UWB-Antennen sowohl für die Ausleuchtung einzelner Sektoren als auch mit omnidirektionalem Charakter entworfen und getestet. Durch den Einsatz dieser Antennen wird die Leistungsfähigkeit entsprechender UWB-Systeme signifikant gesteigert.

1.3 Lösungsansatz und Gliederung der Arbeit

Grundlage für die Lösung der gestellten Aufgabe ist eine geeignete Modellierung der Antenneneigenschaften: Die Antennen werden auf der Basis der Antennenimpulsantwort im Zeitbereich bzw. der Antennenübertragungsfunktion im Frequenzbereich als Richtungs- und Polarisations-abhängiges Filter beschrieben. Dies erlaubt eine quantitative systemtheoretische Modellierung.

Die Arbeit setzt erstmalig die Antennenübertragungsfunktion in einen Zusammenhang mit der Leistungsfähigkeit typischer UWB-Systeme. Hierzu werden relevante Gütekriterien der Antennen definiert und bestimmt. Diese Gütekriterien im Frequenzbereich und im Zeitbereich werden zur Bewertung von Antennenkonzepten und deren Varianten für die UWB-Kommunikation angewendet. In Kapitel 2 werden vor der Definition der Gütekriterien die theoretischen Grundlagen der transienten Behandlung von Antennenproblemen gelegt. Dabei wird die Antennenübertragungsfunktion in ein Netzwerkmodell der Antennen eingebettet. Betrachtungen zum Quellpunkt der transienten Strahlung einer Antenne runden dieses Kapitel ab. Die umfassende Bestimmung der Antennenimpulsantwort aus analytischen Formulierungen, numerischer Modellierung und mittels Antennenmesstechnik ist das Thema von

Kapitel 3. Es wird eine neuartige Vorgehensweise zur polarimetrischen Messung der Antennenübertragungsfunktion dargestellt und der bisherigen klassischen Messtechnik gegenübergestellt. Die Verifikation der Frequenzbereichsmethodik wird mittels direkter Messungen im Zeitbereich durchgeführt.

Die unterschiedlichen Anwendungsbereiche stellen entsprechend unterschiedliche Anforderungen an die Antennen, die in vielfältigen Ausführungen und Konzepten resultieren. In Kapitel 4 werden verschiedenartige Antennenkonzepte erarbeitet, die aufgrund ihrer Größe entweder für den Einbau in Innenraum-Basisstationen zur Ausleuchtung einzelner Sektoren oder für die Verwendung in Radaranwendungen geeignet sind. Hierzu zählt insbesondere die Vivaldi-Antenne. Des Weiteren werden auch die transienten Eigenschaften der logarithmisch-periodischen Antenne und der Spiralantenne exemplarisch untersucht und bewertet. UWB-Antennenkonzepte, die in tragbare Endgeräte integriert werden können, werden in Kapitel 5 anhand der Konzepte der neuartigen aperturgekoppelten Bow-Tie Antenne und der diamantförmigen Schlitzantenne behandelt.

Die Zusammenschaltung einzelner Antennenelemente zu Antennengruppen in Kapitel 6 dient dem Erhalt größerer Empfangsempfindlichkeiten und zur elektronischen Strahlschwenkung bzw. Richtungsfindung. Hierzu wird die Antennenimpulsantwort mit Hilfe des Zeitbereichgruppenfaktors auf Antennengruppen erweitert.

Des Weiteren wird erstmalig gezeigt, wie die Antennenübertragungsfunktion der Messantenne aus Messungen des Funkkanals herausgerechnet und durch andere Antennenübertragungsfunktionen ersetzt werden kann. Damit kann das Verhalten eines ganzen Ensembles von Antennen durch die richtungsaufgelöste Messung mit lediglich einer Referenzantenne charakterisiert werden. Dies wird in Kapitel 7 dargestellt. Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung in Kapitel 8.

8 Zusammenfassung

Ultra-Wideband-Funksysteme stellen einen neuen Ansatz dar, um trotz knapper spektraler Ressourcen zur vorteilhaften Verwendung großer Bandbreiten zu kommen. Insbesondere Verfahren, die auf der Luftschnittstelle kurze Impulse für Kommunikation bzw. Sensorik einsetzen, sind Gegenstand aktueller Forschungen. Hierbei stellen die verzerrenden Eigenschaften der Antennen eine besondere Herausforderung dar, da klassische Bewertungskriterien wie die Eingangsanpassung und der Antennengewinn ohne Phaseninformation hierüber keine Aussage treffen. Stattdessen ist ein neuer Ansatz zur Charakterisierung von Antennen gefordert: Jede Antenne besitzt eine räumliche und frequenzabhängige Filterwirkung, die im Rahmen dieser Arbeit mit einer richtungsabhängigen und polarimetrischen Antennenimpulsantwort beschrieben wird. Diese Sichtweise kam bislang nur für eng abgegrenzte Anwendung zur Erzeugung kurzer Pulse mit sehr hohen Feldstärken im militärischen Umfeld zum Einsatz und wird hier auf eine vollpolarimetrische Darstellung für die direkte Anwendung im zivilen Kontext von Kommunikation und Sensorik erweitert.

Die Arbeit setzt hierfür die Antennenübertragungsfunktion in einen Zusammenhang mit der Performanz von UWB-Systemen. Hierzu wird erstmals die Unterscheidung in intrinsische und extrinsische Gütekriterien eingeführt, die es ermöglicht die Antennen entweder eigenständig oder in Abhängigkeit von einem bestimmten Übertragungssystem zu beurteilen. Die relevanten Gütekriterien wie der Spitzenwert der Antennenimpulsantwort und deren Dauer im Zeitbereich oder der mittlere Gewinn, dessen Standardabweichung und die frequenzabhängige Variabilität der Gruppenlaufzeit im Frequenzbereich werden gleichberechtigt untersucht. Dies entspricht der Erkenntnis, dass eine einseitige Bevorzugung von Zeit- oder Frequenzbereich nicht zielführend ist, sondern vielmehr dasjenige Gütekriterium zur Anwendung kommen muss, das für ein gegebenes System relevant ist. Integrale Gütemaße wie der transiente Gewinn und die Definition der Wiedergabetreue ergänzen diese Betrachtung. Vor der Definition der Gütekriterien in Kapitel 2 werden die theoretischen Grundlagen der transienten Behandlung von Antennenproblemen gelegt. Dabei wird die An-

tennenübertragungsfunktion in ein Netzwerkmodell der Antennen eingebettet. Betrachtungen zum Quellpunkt der transienten Strahlung einer Antenne runden dieses Kapitel ab. Damit wird erstmals eine umfassende Darstellung zur Nutzung der Antennenimpulsantwort als theoretisches Werkzeug für den Antenneningenieur gegeben.

Die umfassende praktische Bestimmung der Antennenimpulsantwort aus analytischen Formulierungen, numerischer Modellierung und mittels Antennenmesstechnik ist das Thema von Kapitel 3. In diesem Zusammenhang wird weltweit erstmalig eine Methode zur *absoluten* polarimetrischen Messung der Antennenübertragungsfunktion vorgestellt und der bisherigen klassischen Messtechnik gegenübergestellt. Die Verifikation der Frequenzbereichsmethodik mittels direkter Messungen im Zeitbereich zeigt eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Messung und Modellansatz. Die unterschiedlichen Anwendungsbereiche stellen entsprechend unterschiedliche Anforderungen an die Antennen, die sich in vielfältigen Ausführungen und Konzepten manifestieren. In Kapitel 4 werden Antennenkonzepte behandelt, die aufgrund ihrer Größe eher für den Einbau in Innenraum-Basisstationen zur Ausleuchtung einzelner Sektoren oder auch für die Verwendung in Radaranwendungen geeignet sind. Hierzu zählt insbesondere die Vivaldi-Antenne. Basierend auf diesem Antennentyp wurden neuartige Realisierungen geschaffen, die sich durch einen besonders kompakten Aufbau, eine Verbesserung der Anpassung mit zusätzlichen Kompensationselementen und durch die Optimierung auf besonders hohe Spitzenwerte der Antennenimpulsantwort auszeichnen. Diese Antennenelemente erfahren derzeit eine industrielle Verwertung. Des Weiteren werden auch die transienten Eigenschaften der logarithmisch periodischen Antenne und der Spiralantenne exemplarisch untersucht und bewertet.

Die Bereitstellung von UWB-Antennenkonzepten, die in tragbare Endgeräte integriert werden können wird beispielhaft in Kapitel 5 anhand der Konzepte der aperturgekoppelten Bowtie-Antenne und der Diamantförmigen Schlitzantenne behandelt. Hierbei wurde mit der aperturgekoppelten Bowtie-Antenne ein völlig neuartiges Konzept erarbeitet, das in zwei Realisierungen die Skalierbarkeit des Konzeptes im Hinblick auf Frequenzbereich und Abmessungen unter Beweis stellt.

Die Zusammenschaltung einzelner Antennenelemente zu Antennengruppen in Kapitel 6 dient dem Erhalt größerer Empfangsempfindlichkeiten und zur elektronischen Strahlschwenkung bzw. Richtungsfindung. Im Rahmen dieser Arbeit wird erstmals das Konzept der Antennenimpulsantwort mit Hilfe des Zeitbereichsgruppenfaktors auf Antennengruppen und deren transientes Gesamtverhalten erweitert. Damit wird

ein einfach zu handhabendes Modell für die Behandlung von Antennengruppen bei beliebiger zeitlicher Anregung vorgestellt. Wiederum ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung von direkter Messung und Modell.

Die umfassende Darstellung der Möglichkeiten, die eine Beschreibung der Antennen mit Hilfe der Antennenimpulsantwort im Zeitbereich, bzw. der Antennenübertragungsfunktion im Frequenzbereich wird abgerundet von der Betrachtung der Antennen bei Funkkanalmessungen: im Rahmen dieser Arbeit wird erstmalig demonstriert, wie die UWB-Antennenübertragungsfunktion der Messantenne aus Messungen des Funkkanals heraus entfaltet und durch weitere Antennenübertragungsfunktionen ersetzt werden kann. So kann das Verhalten von einem ganzen Ensemble von Antennen durch Kanalmessungen mit nur einer Referenzantenne charakterisiert werden. Dies reduziert den Aufwand von UWB Kanalmessungen bei gleichzeitiger Berücksichtigung der Antenneneigenschaften. Dies wird in Kapitel 7 dargestellt.

Mit dieser Arbeit werden somit transiente Antenneneigenschaften erstmals umfassend analytisch, numerisch und messtechnisch bestimmt und in eine quantitative systemtheoretische Beschreibung von UWB-Übertragungssystemen eingebettet. Die entwickelten Gütekriterien erlauben dem Antenneningenieur die systematische Entwicklung, Beurteilung und Optimierung von Antennen und Antennenkonzepten für UWB-Anwendungen.