

Untersuchung der Einkopplungen von UWB-Pulsen auf Funkssysteme im 2,4-GHz-ISM-Band

C. Klünder and J. L. ter Haseborg

Technische Universität Hamburg-Harburg Institut für Messtechnik und EMV, Deutschland

Zusammenfassung. Dieser Bericht fasst die durchgeführten Messungen zur Abschätzung möglicher Kopplung elektromagnetischer Energie ausgehend von abgestrahlten UWB-Pulsen auf Funkübertragungssysteme im 2,4-GHz-ISM-Band zusammen. Dabei wird genauer auf die sogenannte Frontdoor- und Backdoorkopplung eingegangen. Während für die Abschätzung der Frontdoorkopplung generische PCB-Antennen untersucht wurden, sind für die Backdoorkopplung Standard-USB-Funkmodule zum Einsatz gekommen. Es wird im Gesamten eine Abschätzung gegeben, inwieweit UWB-Pulse Funkübertragungssysteme beeinflussen können. Die durchgeführten Messungen wurden mit Hilfe einer GTEM-Zelle in Verbindung mit dem UWB-Pulsgenerator PBG3 der Firma Kentech durchgeführt. Weiterhin sind die Auswirkungen von UWB-Pulsen auf ein reales Funkübertragungssystem im 2,4-GHz-ISM-Band untersucht worden.

1 Einleitung

Der Einsatz von Funkübertragungssystemen im 2,4-GHz-ISM-Band gewinnt jeden Tag mehr Bedeutung in unserem alltäglichen Umfeld. Systeme wie Wireless LAN, Bluetooth und Zigbee sind dabei die bekanntesten Vertreter. Gerade der Einsatz als Kabelersatz in Haushalt und Industrie steht durch diese Funkübertragungssysteme im Vordergrund. Betrachtet man z.B. die Verlegungskosten von Kabeln in der Industrie, so sind aktuell Kosten von bis zu 100€ pro verlegtem Kabelmeter anzurechnen (Planungs-, Verlege- und Materialkosten). Durch den Einsatz von Funksystemen im 2,4-GHz-ISM-Band ergibt sich daraus ein Einsparpotential, wobei jedoch die Funktionalität dieser Systeme gegenüber elektromagnetischen Interferenzen (EMI) gewährleistet sein muss.

Die Auswirkungen von künstlich-erzeugten elektromagnetischen Interferenzen auf Funkübertragungssysteme im 2,4-GHz-ISM-Band ist ein aktuelles und weitreichendes Forschungsgebiet. Gerade die Auswirkungen energiereicher und transientser Störungsquellen ist dabei von besonderem Interesse. Im Fall von sogenannten Quellen der High-Power-Electromagnetics (HPEM-Quellen) können die Auswirkungen auf diese Funkübertragungssysteme immens sein. Beispielsweise seien hier für HPEM-Quellen der Ultra-Wideband-Pulse (UWB-Pulse) oder die High-Power-Microwave (HPM) angegeben. Die auftretenden Effekte solcher HPEM-Quellen werden unter dem Oberbegriff Intentional Electromagnetic Interferences (IEMI) zusammengefasst.

Die Effekte einiger HPEM-Quellen auf elektrotechnisches Equipment ist z.B. in Nitsch et al. (2004) und Camp und Garbe (2006) untersucht worden. Aufbauend darauf werden in diesem Beitrag die Einkopplungsmöglichkeiten in Funkübertragungssysteme im 2,4-GHz-ISM-Band genauer untersucht. Besonders wird dabei auf die Einkopplung von UWB-Pulsen Wert gelegt, da diese durch die zeitlich sehr steilen Anstiegszeiten einen weiten Frequenzbereich abdecken, der bis zu Anregungen weit über 2,4 GHz reicht. Dabei werden Messungen präsentiert, die sich mit der Frontdoor- und Backdoorkopplung von UWB-Pulsen auf diese Funkübertragungssysteme auseinandersetzen und eine mögliche Störbeeinflussung abschätzen.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Funkübertragungssysteme im 2,4-GHz-ISM-Band

Das 2,4-GHz-ISM¹-Band beschreibt ein nahezu weltweit lizenzfrei nutzbares Frequenzband zur digitalen Übertragung von Nutzdaten und findet immer mehr Einzug bei Heim-, Industrie- sowie Büroanwendungen. Das Frequenzband umfasst die Frequenzen von 2400 MHz bis 2483,5 MHz, welche



Correspondence to: C. Klünder
(c.kluender@tu-harburg.de)

¹ ISM: Industrial, Scientific, Medical

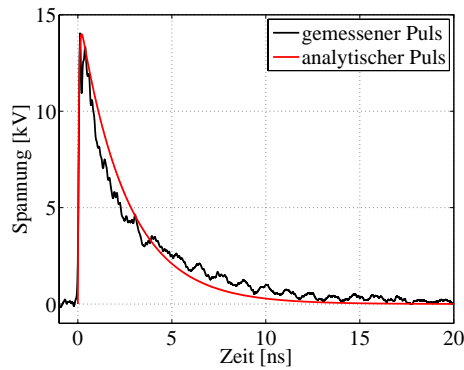


Abb. 1. UWB-Ausgangspuls erzeugt durch PBG3-Pulsgenerator.

unter den jeweils zuständigen Regulierungsbedingungen in jedem Land frei genutzt werden können. Die drei größten und bekanntesten Standards zur digitalen Datenübertragung in diesem Frequenzband sind Bluetooth, Wireless LAN und ZigBee.

2.2 HPEM-Quellen

In dem Begriff HPEM-Quellen werden unterschiedliche transiente und zumeist sehr energiereiche Störungen zusammengefasst. Eine genaue Beschreibung findet sich z.B. in (Baum, 1992). Typische HPEM-Quellen sind z.B. der NEMP (Nuklear Elektromagnetischer Puls), der UWB-Puls (Ultra-wide Band) und der HPM-Puls (High Power Microwave). Gerade der UWB-Puls besitzt durch seine steilen Anstiegszeiten im Bereich von unter 200 ps und einer Pulsdauer (FWHM²) von wenigen Nanosekunden ein sehr breites Beeinflussungsspektrum, welches bis zu Frequenzen von einigen Gigahertz ausgeprägt ist. Aufgrund des breiten Beeinflussungsspektrums wird der UWB-Puls auch für die nachfolgenden Messungen benutzt.

2.3 Interaktionsmethoden von HPEM-Quellen mit Funkübertragungssysteme

Elektromagnetische Strahlung kann ein Funkübertragungssystem auf zwei Kopplungsarten (Frontdoor- und Backdoor-kopplung) beeinflussen. Während die Frontdoor-kopplung die direkte Kopplung elektromagnetischer Energie über die Antenne in den Empfänger eines Funkübertragungssystems beschreibt, beschreibt die Backdoor-kopplung die Kopplung über am System angeschlossene Kabel und über Leiterbahnstrukturen im System. Je nach Kopplungsart ergeben sich nach (Wik et al., 1999) verschiedene Interaktionsmethoden der Beeinflussung von Funkübertragungssystemen:

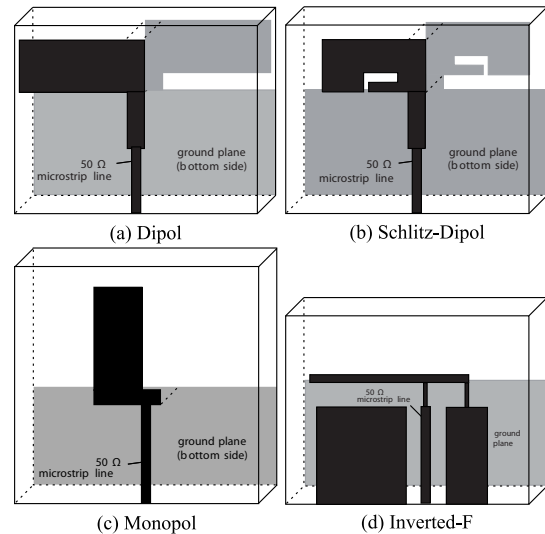


Abb. 2. Überblick verwendeter generischer PCB-Antennen.

- Rauschen (Frontdoor)
- Fehlinformationen (Frontdoor)
- Kurzzeitige Beeinflussung (Frontdoor/Backdoor)
- Permanente Zerstörung (Frontdoor/Backdoor)

Eine weitere Übersicht der Klassifizierung elektromagnetischen Effekte auf der Systemebene ist in (Sabath, 2008) gegeben.

3 Einkopplungsuntersuchungen

Eine Abschätzung der elektromagnetischen Kopplung von UWB-Pulsen auf Funkübertragungssysteme im 2,4-GHz-ISM-Band wird in diesem Abschnitt gegeben. Zuerst wird dabei auf die Frontdoor-kopplung eingegangen, welche anhand generischer Leiterplattenantennen untersucht wird. Eine mögliche Backdoor-kopplung wird beispielhaft mit Hilfe von Standard-USB-Funkmodulen durchgeführt. Dabei wird genauer untersucht, inwieweit die Spannungen der eingekoppelten UWB-Pulse sich auf die USB-Versorgungs- und Datenleitungen auswirken.

Für die folgenden Untersuchungen ist der UWB-Pulsgenerator PBG3 der Firma Kentech benutzt und dabei an eine GTEM-Zelle als Testumgebung angeschlossen worden. Der Pulsgenerator besitzt eine typische Ausgangsspitzenspannung von mehr als 12 kV an 50 Ω . Die Anstiegszeit ist mit 100 ps angegeben, die Pulsbreite beträgt weniger als 3 ns. Der mit dem Generator erzeugte UWB-Puls ist in Abb. 1 dargestellt. Die Eignung der Testumgebung für Einkopplungsuntersuchungen von UWB-Pulsen ist in (Zamow et al., 2008) untersucht worden.

²FWHM: Full Width Half Maximum

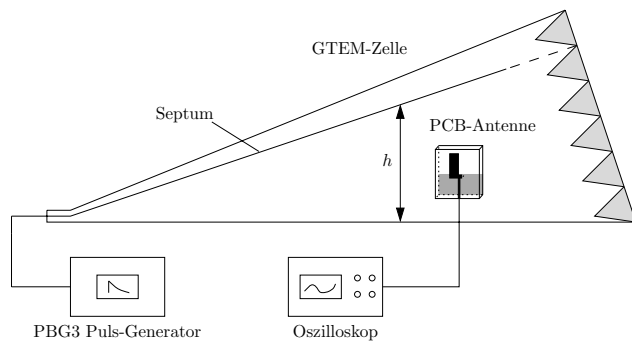


Abb. 3. Messaufbau für die Untersuchung der Frontdoorkopplung in generische PCB-Antennen.

3.1 Frontdoorkopplung

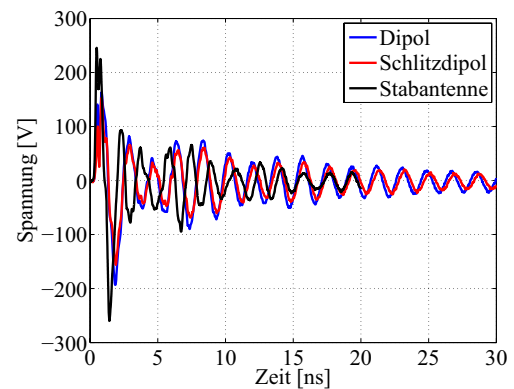
Aktuelle Funkübertragungssysteme werden immer kleiner, so dass typische Antennen für die Benutzung im 2,4-GHz-ISM-Band als Leiterplattenantennen oder als noch kleinere keramische Antennen ausgelegt werden. Betrachtet man Leiterplattenantennen, so sind diese zumeist in der Form von Monopol-, Dipol-, Schlitz- oder Inverted-F-Antennen gefertigt. Verschiedene typische Leiterplattenantennen aus der Literatur (z.B. Chen et al., 2003, 2004) sind in der Abb. 2 zusammengefasst. Diese Antennen sind für die nachfolgenden Messungen zur Untersuchung der Frontdoorkopplung von UWB-Pulsen verwendet worden. Alle Antennen sind dabei auf FR4 mit einer Dielektrizitätskonstanten ϵ_r von 4.7 und einer Dicke von $d=1.5$ mm aufgebaut. Als Anschluss wurde ein SMA-Anschluss gewählt, der mit einer 50- Ω -Leiterbahn verlötet ist.

Die Abb. 2a und b zeigen die benutzten Dipolantennen, welche aus (Chen et al., 2004) entnommen worden sind. Abbildung 2b ist eine Modifikation der Antenne aus Abb. 2a durch Ergänzung eines L-Schlitzes. Ein Monopol aus (Chen et al., 2003) ist in Abb. 2c gezeigt. Schließlich ist in Abb. 2d eine selbst-gebaute Inverted-F-Antennen dargestellt.

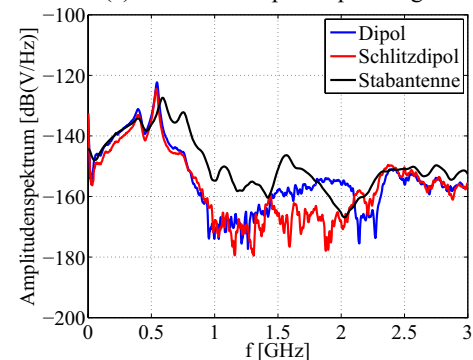
Der Messaufbau zur Einkopplung der UWB-Pulse in die unterschiedlichen Antennen ist in Abb. 3 schematisch dargestellt. Dabei wurde darauf geachtet, dass eine maximale Einkopplung erzielt wird. Die eingekoppelten Antennenfußpunktspannungen sowie die daraus über die Fouriertransformation berechneten Amplitudenspektren der jeweiligen Antennen sind in Abb. 4 dargestellt und einer gewöhnlichen Stabantenne für das 2,4-GHz-ISM-Band gegenübergestellt. Die elektrische Spitzenfeldstärke des UWB-Pulses berechnet sich aus der Spitzenspannung U_p und der Höhe h des Septums am Installationspunkt in der GTEM-Zelle zu

$$E_p = \frac{U_p}{h} = \frac{13,5 \text{ kV}}{0,23 \text{ m}} = 57,7 \frac{\text{kV}}{\text{m}}. \quad (1)$$

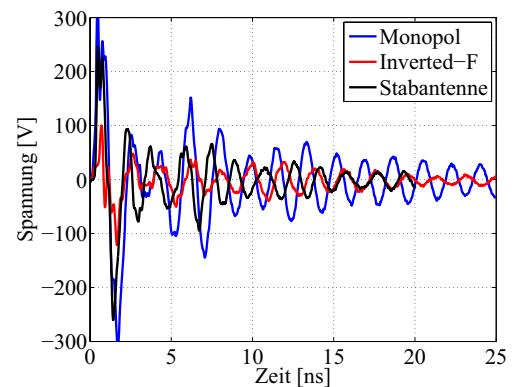
Abbildung 4a zeigt den zeitlichen Verlauf der eingekoppelten Antennenfußpunktspannung in die aufgebauten



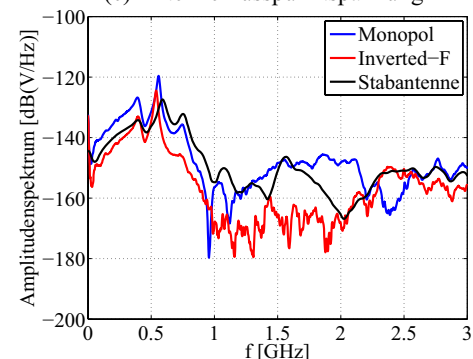
(a) Antennenfußpunktspannung



(b) Amplitudenspektrum



(c) Antennenfußpunktspannung



(d) Amplitudenspektrum

Abb. 4. Einkopplung von UWB-Pulsen auf verschiedene Antennen.

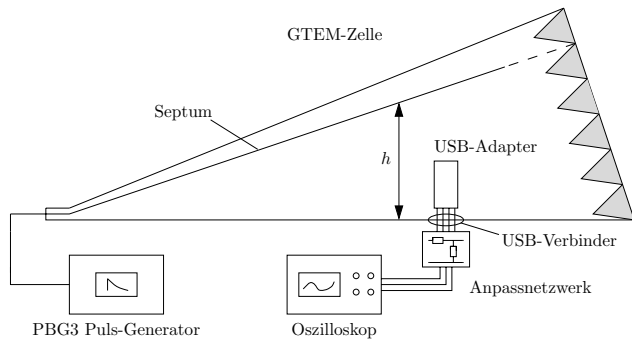


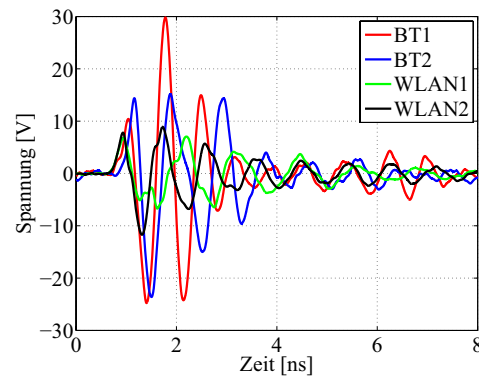
Abb. 5. Messaufbau für die Untersuchung der Backdoorkopplung von UWB-Pulsen in USB-Funkadapter.

PCB-Dipole mit und ohne Schlitz. Das mit Hilfe der Fouriertransformation resultierende Amplitudenspektrum ist in Abb. 4b dargestellt. Jeweils zum Vergleich ist der zeitliche Verlauf der eingekoppelten Antennenfusspunktspannung in eine Stabantenne sowie das daraus resultierende Amplitudenspektrum angegeben. Durch die Einkopplung des UWB-Pulses in die Dipolantennen ergeben sich Spannungsspitzen von ca. ± 200 V, welche im Vergleich zur Stabantenne (± 250 V) geringer sind. Die Verläufe der zwei unterschiedlichen Dipolantennen sind nahezu identisch. Die zeitliche Ausdehnung der eingekoppelten Antennenfusspunktspannung ist bei den PCB-Dipolen ca. 25 ns und bei der Stabantenne ca. 20 ns. Die am stärksten angeregten Frequenzen liegen bei knapp über 500 MHz.

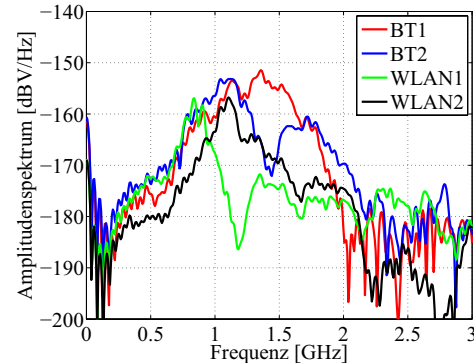
Die Auswirkung der UWB-Pulse auf den PCB-Monopol sowie die Inverted-F-Antenne sind in der Abb. 4c dargestellt, das resultierenden Amplitudenspektrum in Abb. 4d. Bei dem PCB-Monopol sowie der Inverted-F-Antenne ist zu erkennen, dass die maximale Spannungsamplitude größer als ± 300 V ist. Auch die Beeinflussungslänge des eingekoppelten Pulses ist größer als bei den PCB-Dipolen. Die maximal angeregten Frequenzen liegen wie schon bei dem PCB-Dipol bei knapp über 500 MHz.

3.2 Backdoorkopplung

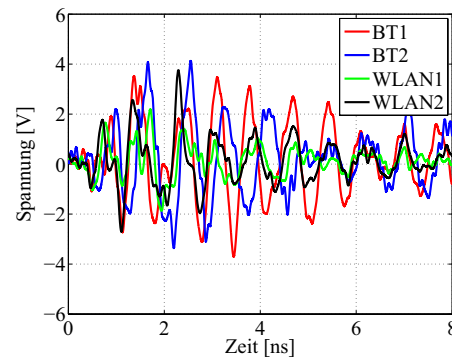
Die Backdoorkopplung behandelt – wie einleitend beschrieben – die Kopplung elektromagnetischer Energie über die Versorgungsleitungen sowie die Geometrie eines Systems. Aufgrund der unterschiedlichen Systemdimensionen und Beschaffenheiten ist diese Kopplung vom jeweilig verwendeten System abhängig. Aus diesem Grund werden in diesem Abschnitt beispielhaft Standard-USB-Funkmodule auf mögliche Backdoorkopplung durch UWB-Pulse untersucht. Es handelt sich dabei um USB-Funkmodule, die frei auf dem Markt erhältlich sind. Die Backdoorkopplung ist bei diesen Modulen z.B. über die externen Leitungen des USB-Anschlusses direkt messbar.



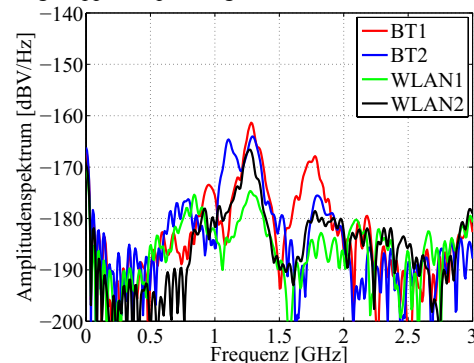
(a) Einkoppelte Spannung auf der Versorgungsleitung



(b) Amplitudenspektrum



(c) Einkoppelte Spannung auf differenzielle Datenleitung



(d) Amplitudenspektrum

Abb. 6. Einkopplung von UWB-Pulsen auf Standard-USB-Adapter.

Der zugehörige Messaufbau zur Messung der Backdoor-kopplung ist in Abb. 5 dargestellt. Die USB-Funkmodule werden dabei direkt über einen im Boden einer GTEM-Zelle integrierten USB-Stecker senkrecht angeschlossen. Die eingekoppelten Spannungen auf den einzelnen Leitungen des USB-Steckers sind über ein Anpassnetzwerk mit einem Hochgeschwindigkeitsoszilloskop aufgezeichnet und mit den spezifizierten USB-Pegeln aus (USB Impl. Forum Inc., 2000) verglichen worden. Die USB-Stecker besitzen vier Leitungen: Versorgung (VCC), differentielle Datenleitung (D1 und D2) sowie die Bezugsmasse (GND). Laut (USB Impl. Forum Inc., 2000) sind auf der Versorgungsleitung Spannungen von 4,0 bis 5,25 V zulässig. Die Spannungspegel auf den differentiellen Datenleitungen sind vom Übertragungsmodus (high-speed 480 Mb/s, full-speed 12 Mb/s und low-speed 1,5 Mb/s) der USB-Verbindung abhängig: Für den full-speed- und low-speed-Modus sind mindestens ± 200 mV Spannungshub zwischen den differentiellen Leitungen im Empfänger erforderlich, um einen Signalwechsel zu detektieren. Der high-speed-Modus erfordert spezielle Augendiagramme bei der Übertragung, welche störanfälliger sind.

Für die Messungen wurden jeweils zwei unterschiedliche WLAN- und Bluetooth-USB-Funkmodule verwendet. Die eingekoppelten Spannungspegel sowie die resultierenden Amplitudenspektren sind in der Abb. 6 zusammengefasst. Dabei ist zum einen die Versorgungsleitung und zum anderen das differentielle Signal auf den Datenleitungen aufgezeichnet worden. Die anliegende elektrische Spitzenfeldstärke ist am Installationspunkt gegeben durch

$$E_p = \frac{U_p}{h} = \frac{13,5 \text{ kV}}{0,8 \text{ m}} = 16,8 \frac{\text{kV}}{\text{m}}. \quad (2)$$

Die Abb. 6a und b zeigen die eingekoppelte Spannung durch einen UWB-Puls auf der Versorgungsleitung des USB-Steckers sowie das resultierende Amplitudenspektrum. Es treten Spannungsspitzen bis zu ± 30 V bei einem Bluetooth-USB-Funkmodul auf. Bei den anderen USB-Funkmodulen liegen diese Spannungsspitzen bei ± 25 V. Eine Auswirkungsdauer ist zwischen 4–8 ns anzunehmen. Der hauptsächlich angeregte Frequenzbereich liegt zwischen 1–2 GHz. Betrachtet man die Auswirkung auf die differentielle Datenleitung in den Abb. 6c und d, so ist zu erkennen, dass die maximale Spannungsamplitude bei ca. ± 4 V liegt und die maximal anregende Frequenz auch im Bereich von 1–2 GHz anzufinden ist. Die Beeinflussungslänge ist wie zuvor bei ca. 6–8 ns anzunehmen.

4 Beeinflussung eines realen Funkübertragungssystems

Nachdem im vorigem Abschnitt die Frontdoor- sowie die Backdoor-kopplung genauer untersucht worden sind, ist in diesem Abschnitt eine in einer GTEM-Zelle aufgebaute WLAN-Funkübertragungsstrecke auf die Auswirkungen von

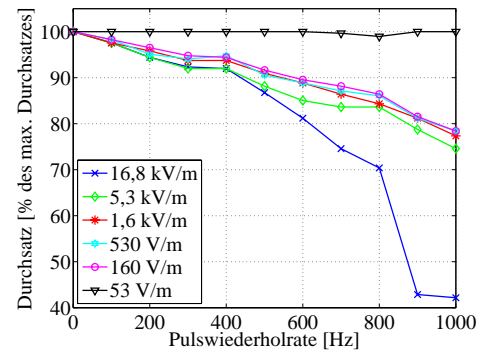


Abb. 7. Auswirkung von UWB-Pulsen auf ein reales WLAN-Übertragungssystem.

verschiedenen Parametern eines UWB-Pulses durchgeführt worden. Die Funkübertragungsstrecke wurde mittels zwei PCs realisiert. Dabei wurden nur die Antennen der in den PCs eingebauten PCI-WLAN-Karten innerhalb der GTEM-Zelle installiert, um Backdoor-kopplung zu vermeiden. Es ist damit nur eine Frontdoor-kopplung realisiert worden, da die Backdoor-kopplung nicht nur von der Geometrie der benutzten PCI-WLAN-Karte abhängt, sondern vielmehr von der Geometrie des umgebenden PC-Gehäuses.

Die Messung wurde im 802.11 g-AdHoc-Modus durchgeführt, wobei beide PCI-WLAN-Karten mit einer maximalen Geschwindigkeit von 54 MBit/s betrieben wurden. Die Datenübertragung fand mit Hilfe des TCP/IP-Protokolls statt und erreichte eine maximale Bruttodatenrate von 28,8 MBit/s. Während der Messung sind verschiedene UWB-Puls-Parameter variiert worden. Die elektrische Spitzenfeldstärke wurde von 53 V/m bis 16,8 kV/m und die Puls-wiederholrate des UWB-Pulses von 0 Hz bis 1000 Hz variiert. Die Ergebnisse dieser Messung sind in Abb. 7 zusammengefasst. Es ist zu erkennen, dass mit steigender Puls-wiederholrate und mit steigender Feldstärke der Einfluss der UWB-Pulse auf die Funkübertragungsstrecke ansteigt. Bei einer elektrischen Spitzenfeldstärke von 53 V/m ist noch kein Einfluss erkennbar. Ein kompletter Abbruch der Verbindung ist während der Messungen nicht aufgetreten.

5 Zusammenfassung

Die durchgeführten Messungen zeigen, dass sowohl durch Frontdoor- als auch durch Backdoor-kopplung Störungen bei Funkübertragungssystemen möglich sind. Bei der Frontdoor-kopplung auf typische Leiterplattenantennen koppeln Signale mit Frequenzen zwischen 500 MHz und 1 GHz am stärksten ein. Die eingekoppelten Spannungen erreichen einige 100 V und haben eine Einflusslänge von mehr als 30 ns, was einer zehn mal größeren Zeitspanne entspricht als die Zeitdauer des UWB-Pulses.

Bei der Backdoorkopplung ist die Einflusslänge der eingekoppelten Spannungen auf den Datenleitungen von Standard-USB-Funkmodulen jedoch kürzer und liegt im Bereich von 8 ns. Auch die eingekoppelten Spannungen sind kleiner. Jedoch erreichen die Spannungsspitzen Pegel, bei denen sich die USB-Datenübertragung beeinflusst wird.

Bei einem realen Funkübertragungssystem ist gezeigt worden, dass UWB-Pulse durch Frontdoorkopplung mit einer elektrischen Spitzenfeldstärke von 160 V/m dieses Übertragungssystem beeinflussen können. Reduktionen in der Datenraten von bis zu 60% sind dabei erzielt worden. Es kam jedoch während der Messungen weder zu einem kompletten Abbruch der Übertragung noch zur Zerstörung des Equipments.

Literatur

- Baum, C. E.: From the Electromagnetic Pulse to High-Power Electromagnetics, *Proc. of the IEEE*, 8(6), 789–817, 1992.
- Camp, M. und Garbe, H.: Susceptibility of Personal Computer Systems to Fast Transient Electromagnetic Pulses, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 48(4), 829–833, August 2006.
- Chen, H.-M. and Lin, Y.-F.: Printed monopole antenna for 2.4/5.2 GHz dual-band operation, *Proc. of Symposium on Antennas and Propagation*, 3, 60–63, 22–27 June 2003.
- Chen, H.-M., Chen, J.-M., Cheng, P. S., and Lin, Y.-F.: Microstrip-fed Printed Dipole Antenna for 2.4/5.2 GHz WLAN Operation, *Proc. of Symposium on Antennas and Propagation*, 3, 2584–2587, 20–25 June 2004.
- Nitsch, D., Camp, M., Sabath, F., ter Haseborg, J. L., and Garbe, H.: Susceptibility of Some Electronic Equipment to HPEM Threats, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 46(3), August 2004.
- Sabath, F.: Classification of Electromagnetic Effects at System Level, *Proc. of the 8th Int. Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC Europe 2008*, September 2008.
- USB Implementation Forum Inc.: Universal Serial Bus Specification Rev. 2.0, <http://www.usb.org>, April 2000.
- Wik, M. W., Gardner, R. L., and Radasky, W. A.: Electromagnetic Terrorism and Adverse of High-power Electromagnetic Environments, *13th International Zurich Symposium and Technical Exhibition on EMC*, 181–185, Februar 1999.
- Zamow, D., Thye, H., and Garbe, H.: Applicability of the IEC 61000-4-20 for Transient Testing with UWB Signals, *Proc. of the 8th Int. Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC Europe 2008*, September 2008.