

EEEFCON 2007
20 – 21 JUNI 2007
ULM, GERMANY

BEWUSSTE ELEKTRONIKSTÖRUNG DURCH GESTRAHLTE HPM, UWB UND DS-PULSE

T.Ehlen¹

¹Fachhochschule-Gelsenkirchen / DIEHL
GERMANY, E-mail: tilo.ehlen@fh-gelsenkirchen.de

Keywords: RF-weapon, UWB, HPM, DS, susceptibility, sources

ABSTRACT

HPM, UWB and DS pulses are capable of disturbing the signal processing or even destroying the semiconductor structure. This paper presents observed digital and analog effects in electronic systems and gives an overview of the high power sources, their technology and the potential application fields

I - EINLEITUNG

Elektromagnetische Pulse, die mit hoher Feldstärke auf elektronische Systeme treffen, sind in der Lage, deren Funktionalität kurzfristig oder nachhaltig zu beeinflussen. Im letzten Jahrzehnt wurde die Wirkung von schmalbandigen CW und HPM-Pulsen, den ultrabreitbandigen UWB-Pulsen und den breitbandigen DS-Pulsen eingehend untersucht. Alle Signalformen können dabei digitale und analoge Signale stören und elektronische Komponenten zerstören. Die Kenntnis dieser Effekte bildet die Grundlage für notwendige anzuwendende Härtingsmaßnahmen und ermöglicht, für neue Technologien Voraussagen bezüglich ihrer elektromagnetischen Empfindlichkeit zu treffen. Im militärischen Bereich wurden die Quellen auf maximale

Störfähigkeit feindlicher Elektronik optimiert. Dieser Prozess hält noch an. Zielspektren bilden dabei die Beeinflussung der Flugbahn von gegnerischen Flugkörpern und Fliegerfäusten, die vollständige Unterdrückung funk- und drahtgebundener Kommunikation, die Zerstörung von Abhör- und Überwachungseinrichtungen, oder der Konvoischutz durch vorzeitige Auslösung von Minen. Im zivilen Bereich wird die gezielte Störbeeinflussung der Motorsteuerung bei Kraftfahrzeugen (elektronische Strassensperre) und Schnellbooten (Schmuggel) ausgenutzt. Ebenso werden geeignete abgestrahlte elektromagnetische Pulse bereits heute eingesetzt, um die Daten und die Zugriffselektronik von elektronischen Speichern (USB-Stick, Festplatte) oder RFID-Chips bewusst zu zerstören und damit die personenbezogenen Information (z.B. auf dem neuen Personalausweis) permanent zu löschen.

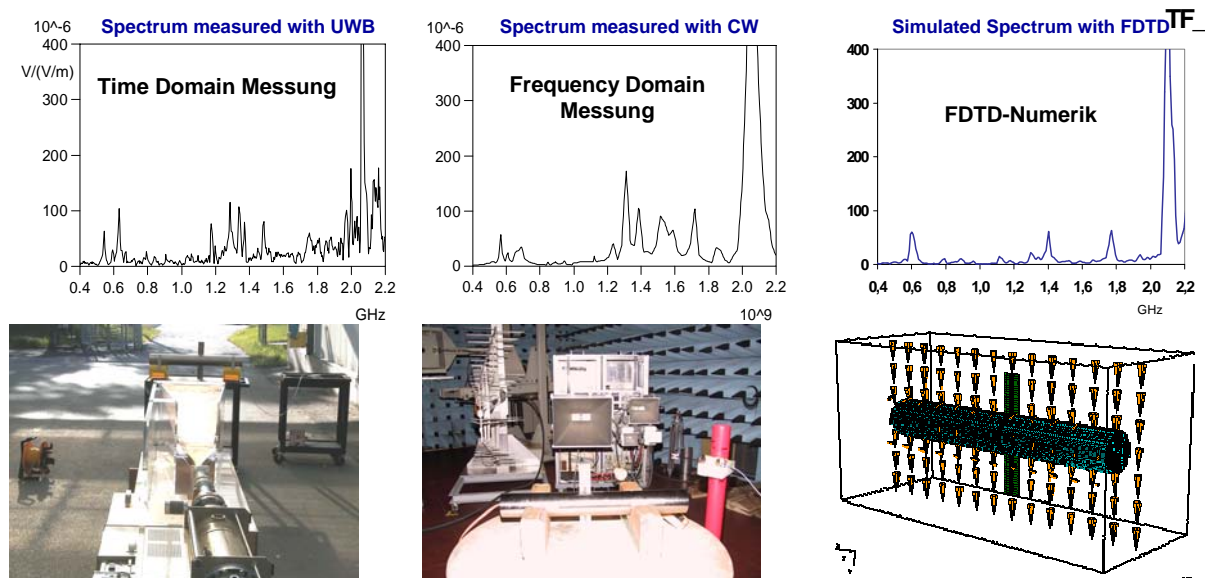


Abb.1: Einkopplungsmessung in die GENEC im Zeitbereich mit UWB-Pulsen, im Frequenzbereich mit CW und FDTD-Simulation der Einkopplung

Grundlage für die Beurteilung der Signaleffektivität bilden Empfindlichkeitsuntersuchungen an Kraftfahrzeugen, PC's und Mikrocontrollern, SPS-Steuerungen, Monitoren und vielen militärischen Geräten. Für die reproduzierbare Ermittlung von Zerstörungsfeldstärke-Schwellwerten wurde in Deutschland eine generische Elektronik mit Flugkörper-förmigem Gehäuse entwickelt – die GENEC. Dieses von der WTD81 geförderte Studienobjekt ist bereits seit Jahren Bestandteil multinationaler Kooperationen, die sich mit dem Einkopplungsverhalten, der Elektronikempfindlichkeit oder der Evaluation von numerischen Simulationsprogrammen beschäftigen.

II- SIGNALFORMEN

Der **HPM** (High Power Microwave) Puls besteht aus einem schmalbandigen monofrequenten Schwingungspuls im Bereich 1GHz bis ca. 10GHz mit Pulslängen bis zu einigen Mikrosekunden. Die Peakfeldstärke kann 100kV/m erreichen. Pulswiederholraten von 100Hz sind typisch. Der HPM-Puls geht aus der Radarentwicklung hervor. Bei richtiger Wahl der Trägerfrequenz werden effektive Elektronikstörungen und -zerstörungen insbesondere bei digitaler Elektronik in

medium-geschirmten Systemen erreicht. Der HPM-Puls zeichnet sich durch eine hohe Energiedichte aus, weswegen energiebasierte Stör- und Zerstöreffekte hervorgerufen werden.

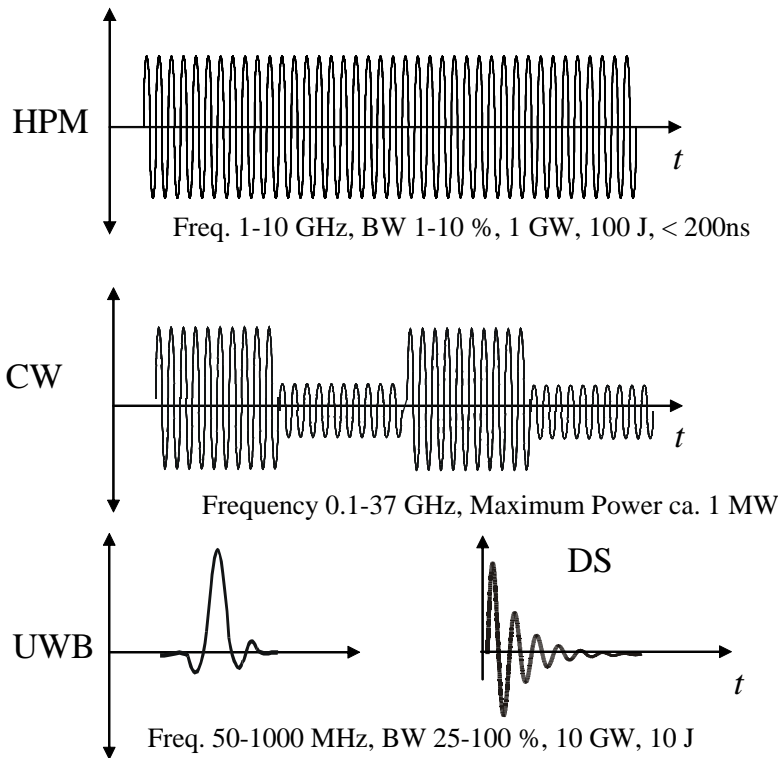


Abb.2: Überblick: abgestrahlte Signalformen

Modulierte **CW**-Strahlung (continuous-wave) besitzt nur eine geringe Feldstärke von einigen hundert V/m am Target. Bei Abstimmung des Trägers auf eine empfindliche Systemresonanz demoduliert sich die Modulationsfrequenz an parasitären Nichtlinearitäten in der Schaltung und beeinflusst somit insbesondere analoge Schaltungen und Sensorsysteme. Halbleiterzerstörung ist selten zu beobachten.

Der **UWB**-Puls (ultra wide band) geht aus einem steilen Spannungspuls hervor, kombiniert mit der differenzierenden Wirkung der abstrahlenden Antenne. Pulsanstiege um 100ps, Spannungen von bis zu 1MV, Pulsbreiten <1ns und Feldstärken von einigen 100kV/m sind typisch. Aufgrund der kleinen Pulsbreite zeigt sich eine enorme Pulsleistung von über 10GW aber eine geringe Pulsenergie von <1J. Elektronikstörung und Zerstörung insbesondere bei digitaler Elektronik sind zu beobachten. Einige Systeme kompensieren eine kleinere Feldstärke durch Pulswiederholraten über 1MHz. Aufgrund der extremen Breitbandigkeit des Spektrums werden viele Systemresonanzen angeregt und die Richtungsabhängigkeit der Feldeinkopplung wird reduziert. In der Praxis sind UWB-Pulse jedoch nur bei quasi ungeschirmten Systemen effektiv. Die Amplitudendämpfung bei schmalbandiger Kopplung ist sehr groß – d.h. aus einem kurzen UWB-Puls zeigt die hochresonant eingekoppelte Signalform zwar eine große Schwingungsdauer jedoch eine sehr geringe Amplitude. Das spektrale Maximum der UWB-Pulse liegt typischerweise zwischen 500MHz und 1GHz.

DS-Pulse (damped sinus) bestehen aus einer abklingenden Sinusschwingung mit Frequenzen zwischen 50MHz und 700MHz, Pulslängen von um 10ns bzw. zehn Schwingungszyklen, Feldstärken von vielen hundert Kilovolt/m und Pulswiederholraten bis ca. 100Hz. Das Spektrum besitzt eine Bandbreite von ca. 20%. DS-Pulse regen typischerweise die kleinsten Resonanzfrequenzen der Zielsysteme an und besitzen daher eine besonders gute Koppeleffektivität. Elektronikstörungen wie auch Zerstörungen insbesondere bei digitalen Systemen werden selbst bei medium-geschirmten Systemen erreicht. Die Störung bei analogen Systemen wird durch die geeignete Wahl der Pulswiederholrate dominiert.

II SYSTEM-EMPFINDLICHKEIT

Abhängig von der Elektronikklasse der Zielsysteme müssen die Signalformen und Signalparameter für einen maximalen Wirkabstand angepasst werden. Die Trägerfrequenz ist dabei auf die Resonanzfrequenz der Einkopplung abzustimmen. Typischerweise zeigt ein bestrahltes System bei der kleinsten Resonanzfrequenz die höchsten induzierten Strom/Stromdichteamplituden und damit Empfindlichkeiten.

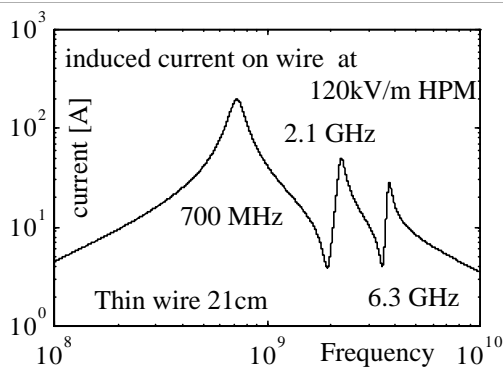


Abb.3: Induzierte Strom in der Mitte eines dünnen Leiters, der mit einem monofrequenten HPM-Puls (120kV/m) bestrahlt wurde als Funktion der Trägerfrequenz; Strom in [A], Frequenz in [Hz]

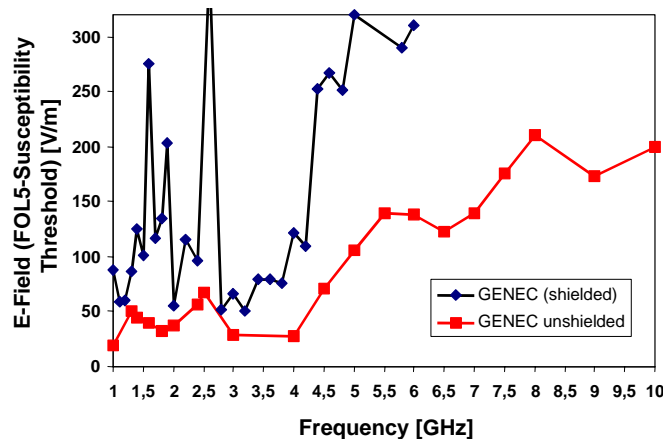


Abb.4: Messaufbau und notwendige CW-Feldstärke bis zum Erreichen eines Störschwellwertes mit und ohne medium-Schirmung als Funktion der Trägerfrequenz

Ebenso hängt die Systemempfindlichkeit vom seinem Schirmungsgrad ab. Schwach geschirmte Systeme zeigen eine breitbandige Empfindlichkeit und sind ideale Ziele für UWB-Quellen. Nach

dem Anbringen einer nicht vollständigen nicht-absorbierenden Schirmung bilden sich hochgütige Resonanzstellen heraus, wie dies in Abb.4 dargestellt ist. Bestrahlung mit HPM, CW oder DS Felder mit geeigneter Trägerfrequenzen zeigen dann ihre Überlegenheit gegenüber UWB. DS-Pulse, deren Bandbreite und Mittenfrequenz auf die der Zielresonanz abgestimmt sind, stellen sich als optimal im Sinne der Wiener-Filter-Theorie dar.

Bestrahlt man eine quasi ungeschirmte elektronische Schaltung mit einem UWB-Puls, so besitzt der Störspannungspuls in der Elektronik an ausgewählten Messpunkten quasi ähnliche Signalform wie der UWB – die Größenordnung der Pulsdauer bleibt erhalten. Im geschirmten Fall wird hingegen die hochresonante Koppelfrequenz des übrig gebliebenen Koppelpfades angeregt. Die Spannungsamplitude reduziert sich, die Schwingungsdauer erhöht sich jedoch beträchtlich, relativ zur Dauer im ungeschirmten Fall.

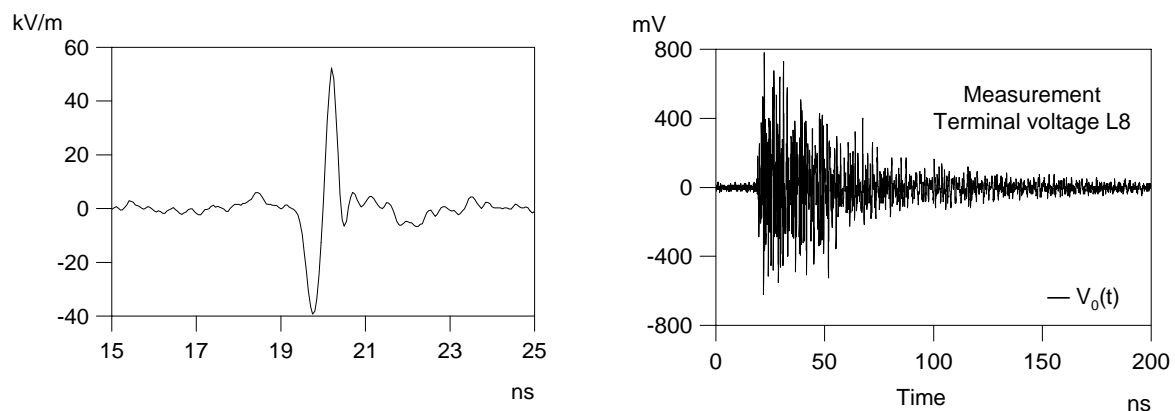


Abb.5: links: einfallender UWB Puls $E_{inc}(t)$; rechts: gemessener Spannungsverlauf in Elektronik eines hochresonanten semi-geschirmten Zielsystems

III ELEKTRONIK-EFFEKTE

Die elektromagnetische Welle koppelt bei Bestrahlung durch Schlitz und Öffnungen ins Innere des Elektroniksystem und von dort auf Leitungsstrukturen bis zum Elektronikbaustein. Die Störspannungen können an allen Pins der IC's anliegen und Störungen oder Ausfälle bedingen.

Die beobachteten Feldstärken, oberhalb derer Störungen auftreten, hängen ab von Trägerfrequenz, dem Einfallswinkel (AoI) und der Polarisation. Diese Parameter werden definiert durch die Strukturresonanzen, Ort der Koppelstellen ins Innere, Koppelwege auf die Leitungen und die Leitungslängen. Die HF-Spannung an den Halbleiterpins degradieren das analoge Signal, bzw. ändern den digitalen Zustand. Typischerweise wird die HF-Störspannung an parasitären Nichtlinearitäten der Halbleiter demoduliert und es resultiert die Einhüllende des HF-Signals als LF-Signal. Dieses demodulierte LF-Signal wandert dann wie ein nominelles Nutzsignal entlang des beabsichtigten LF-Signalfades. Bei einer analogen Tiefpass Elektronik ebenso wie bei AGC-Schaltungen beobachtet man eine Erhöhung der demodulierten Störspannungsamplituden bei Erhöhung der Pulswiederholrate. Bei Bandpasssystemen ist die Interferenzamplitude am höchsten, wenn die Pulswiederholrate der BP-Mittenfrequenz entspricht. Liegen die Pulswiederholraten viel höher als die höchste nominelle Informationsfrequenz, sind erhöhte

Gleichspannung-Offsets zu beobachten, die den Arbeitspunkt angeschlossener analoger Elektronik verschieben oder Verstärker in die Sättigung treiben.

Seit vielen Jahrzehnten ist bekannt, dass Oszillator-Schaltungen bei Bestrahlung mit CW in den chaotischen Zustand übergehen können. Obwohl Oszillatoren besonders geschirmt sind und der chaotische Ausfall von Oszillatoren in realen Systemen in GE messtechnisch nicht nachgewiesen wurde, sind insbesondere in UK und USA theoretische Untersuchungen zu dieser Thematik im Gange [4].

Einzelpulsquellen versuchen, in der Zielelektronik die digitalen Zustände zu manipulieren (Bits kippen), einen latch-up-Effekt zu erzielen (Kurzschluss zwischen VCC und GND) oder eine Halbleiterzerstörung hervorzurufen. Repetierend arbeitende Quellen versuchen entweder die Modulationsfrequenz/Pulswiederholrate an die interne Taktfrequenz/Oszillatorfrequenz des Zielsystems anzupassen (analoge Störung) oder aber wählen die maximale Pulswiederholrate, um die Wahrscheinlichkeit zu erhöhen, ein kritisches Zeitfenster zur Beeinflussung des Mastertakts zu treffen – meistens in der Nähe der Flanke des Taktsignals. Bei HPM erhöht die Pulslänge die Störspannungsamplitude in der Elektronik. Analoge Systeme zeigen sich empfindlicher bei Erhöhung der Pulswiederholrate. Viele digitale Systeme scheinen jedoch keine Empfindlichkeitsveränderung bei einer Pulsratenerhöhung bis in den Kiloherzbereich zu verspüren. Allerdings können oberhalb einer kritischen Pulsrate (z.B. oberhalb 1MHz) Akkumulationseffekte beobachtet werden, die das bestrahlte System ausfallen lassen. Solche hohen Pulsraten sind in UWB zu erreichen. In wieweit schnelle Bursts von Pulsen bei HPM, DS oder bei explosivstoffgetriebenen Quellen ähnlich Effekte zeigen, sind Gegenstand momentaner Forschung.

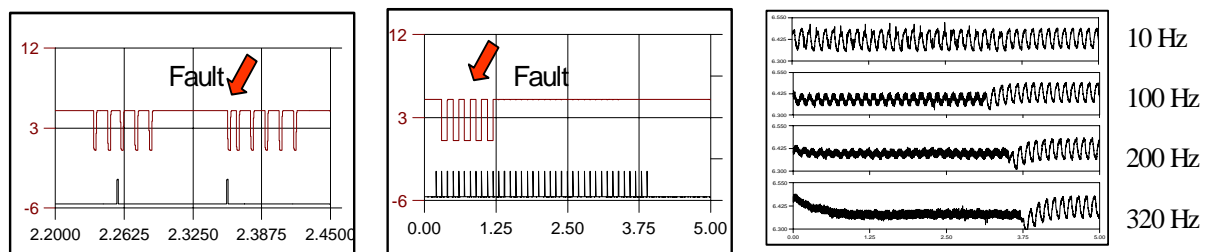


Abb.5: Links: digitaler Bitfehler in takt synchroner Elektronik bei gepulster Strahlung; Mitte: digitaler Bitfehler in nicht getakteter Elektronik; Rechts: Degradierung eines analogen nominellen Informationssignals bei unterschiedlichen Pulswiederholraten der Strahlung (10Hz-320Hz)

Halbleiterzerstörung tritt auf, wenn durch die Bestrahlung die in den Handbüchern angegebenen Operating Conditions der Halbleiter verletzt werden:

- Die Eingangsspannung überschreitet das Limit für den dielektrischen Durchschlag der intrinsischen Oxidschichten oder der Zwischenmetall-Oxidschichten, was zu einem lawinenartigen elektrischen Durchschlag (punch-through) oder Überschlag (flashover) führt.
- Die Eingangs oder Ausgangsspannungen treiben die gesperrten PN-Übergänge in den reversed-bias breakdown und ermöglichen damit niederohmige Strompfade oder bilden lokale Horte mit sehr hoher Verlustleistung.

Typischerweise wird durch den strahlungsbedingten Puls zunächst ein primärer Effekt im Halbleiter hervorgerufen. Dieser bedingt z.B. einen hohen Stromfluss, der als sekundärer Effekt zur physikalischen Zerstörung des Halbleiters führt.

Der Mechanismus der primären Degradation unterteilt sich in:

- dielektrischer Durchschlag: Der strahlungsbedingte Spannungspuls besitzt eine so große Feldstärke, dass Elektronen in einem Isolator durch Stoßionisation vermehrt werden und einen Durchbruch (im Material) oder Überschlag (auf Oberfläche) hervorrufen. Der kurze Entladungsstrom transportiert Metall-Atome entlang seines Entladungspfades und hinterlässt einen permanent leitenden Kanal
- PN-Durchschlag: Der strahlungsbedingte Spannungspulse überschreitet die Breakdown-Spannung eines negativ vorgespannten PN-Übergangs. In der Verarmungszone werden sekundäre Elektron/Lochpaare erzeugt, die zu einem Stromfluss führen. Eine permanente Schädigung ist nur möglich, wenn die Temperatur am PN-Übergang die maximal zulässige Temperatur überschreitet. Eine Lawinenbildung ermöglicht einen großen Stromfluss. Heiße Ladungsträger können dabei einen parasitären Thyristor triggern und den latch-up auslösen.

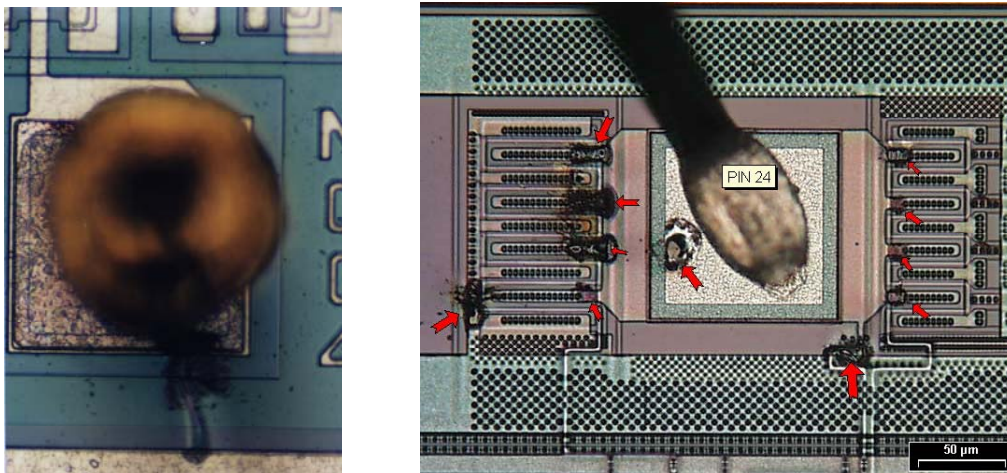


Abb.6: Elektrischer Überschlag am Bondpad eines DM7404 und Zerstörung der Schutzdioden am Eingang eines PIC14000 Mikrocontrollers bei pulsformiger Bestrahlung

Die Feldstärke für einen dielektrischen Überschlag liegt um $5 \cdot 10^5$ V/cm für Silizium Oxid oder den typisch benutzen Nitrid Komponenten. Bei einer Kanalbreite von $1 \mu\text{m}$ to $10 \mu\text{m}$ erfordert der Durchschlag daher eine Spannung zwischen 50 – 500V. Die Spannungen für einen PN-Durchschlag sind signifikant geringer bei 10 – 40V (z.B. Durchbruchspannung Emitter/Basis bei einer Baugröße von $0.2 - 0.3 \mu\text{m}$ ist. 6 to 10 V). Daher geht man davon aus, dass der dielektrische Durchschlag viel schneller von statten geht, bevor die PN-Sperrschicht leitend wird und bevor die Transienten zu den schützenden Dioden gelangen. Notwendige Pulsanstiegszeiten von $dv/dt > 1\text{kV/ns}$ werden angegeben (H.M. von Bergmann, Surface Discharge Switches, Gas Discharge closing switches, A. Guenther, M. Kristiansen, Plenum Press, 1990).

Der dielektrische Zusammenbruch entlang der Oberfläche eines Isolators wird als Flash-over oder elektrischer Überschlag bezeichnet. Abb.6 links zeigt einen elektrischen Überschlag zwischen dem Bond-Pad und der Massemetallisierung eines DM7404 TTL-Inverters nach pulsförmiger Bestrahlung. Der geringe Zerstörungsgrad indiziert, dass nur eine geringe Energiemenge in die Überschlagsregion entladen wurde. Abb.6 rechts zeigt die degradierte Region von Schutzdioden, die um das Bond-Pad eines PIC Mikrocontrollers gruppiert sind, nach pulsförmiger Bestrahlung. Der sichtbare Schaden an der Metallisierung ist nicht von der applizierten Feldenergie alleine hervorgerufen worden, sondern wurde unterstützt von der Energieentladung angeschlossener Pufferkondensatoren. Die Bondpad-Metallisierung zeigt aufgeschmolzene und verfärbte Regionen. Da das Schadensmaß nicht mit der Pulsdauer korreliert, ist hier der Schaden durch einen sekundären Effekt entstanden.

III QUELLEN PRINZIPIEN

Historisch sind die HPM-Quellen aus der Weiterentwicklung der Radartechnik hervorgegangen. Daher findet man die typischen Magnetrons, Reltrons und BWOs mit Pulsleistungen von vielen hundert Megawatt in Testanlagen und von einigen Gigawatt als Testmuster. Typische Pulsbreiten liegen zwischen 100ns und einigen Mikrosekunden, Pulsenergien von einigen hundert Joule und Pulswiederholraten bis ca. 100Hz. Während in den 90er Jahren die Entwicklung zu immer höheren Frequenzen zielte (Gyrotron, FEL) ohne Berücksichtigung der Wechselwirkung mit der Elektronik, werden heutige Frequenzbereiche zwischen L und X-Band angepeilt.

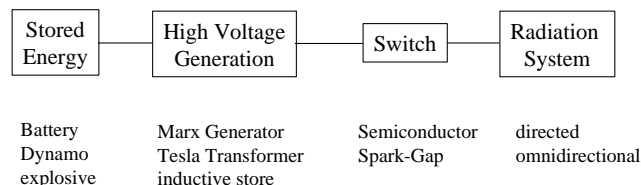


Abb.7: Anordnung der Einzelsysteme von abstrahlenden Systemen

Funktionell wird ein schnelles LC-Netzwerk oder eine Leitungsnachbildung mittels Marx-Generator auf viele hundert Kilovolt aufgeladen. Nach Erreichen einer kritischen Überschlagsspannung zündet ein Spark-Gap und übergibt die gespeicherte Energie als Versorgungsspannung an die angeschlossenen HPM-Diode. Diese beginnt zu schwingen und koppelt das Feld über Hohlleiter an externe Hornantennen. Das voluminöse und schwere Gesamtsystem begrenzt die taktische Anwendung. Miniaturisierungstendenzen konzentrieren sich auf Systeme ohne notwendiges statisches Magnetfeld. Solche MILO oder Vircatorsysteme zeigen jedoch einen Wirkungsgrad von weniger als 5 Prozent und nur bedingt fokussierbare Feldmoden. Ebenso sind magnetohydrodynamische explosivstoff - getriebene Hochspannungsgeneratoren zur Energieversorgung in Kombination mit Vircatoren in Russland entwickelt worden [7]. Mit abgestrahlten GW-Spitzenleistungen leiden die Systeme jedoch an kurzen Pulsbreiten.

UWB-Pulse sind historisch aus der Modifikation von NEMP-Simulatoren mit stetig steileren Pulsanstiegszeiten hervorgegangen. Eine Hochspannungsquelle lädt dabei eine schnelle Leitung auf, die folgend über einen Schalter auf die Last geschaltet wird. Der NEMP-Pulser verwendet die geführte TEM-Welle, der UWB-Pulser strahlt den Entladepuls über differenzierend wirkende Antennen, wie TEM-Horn oder IRA ab.

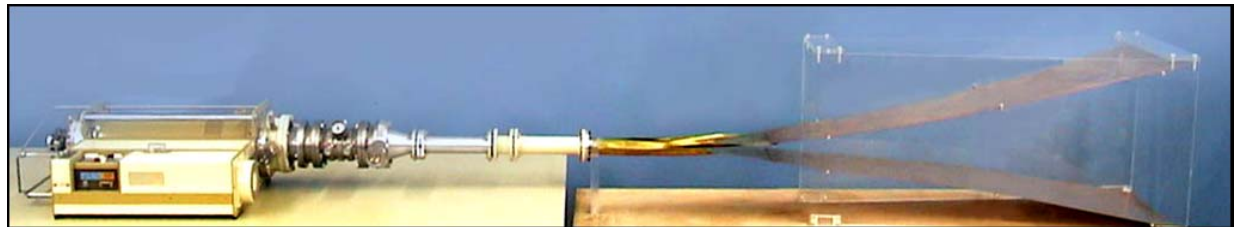
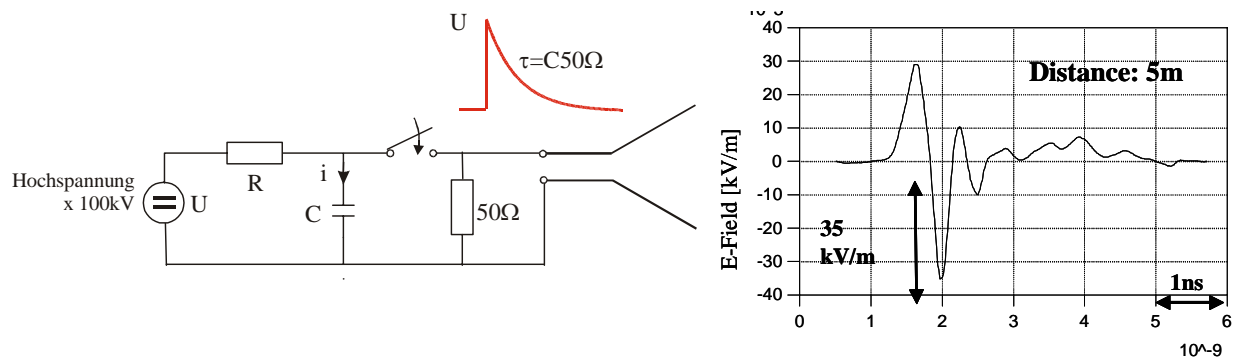


Abb.8: UWB-Erzeugungsprinzip, RADAN-UWB-Pulser und abgestrahlter UWB-Puls

Die Hochspannungsgenerierung basiert klassisch auf einem Marx-Generator oder Teslatransformator und der Schalter auf schnellen Überschlagsstrecken, was die Pulswiederholrate auf einige 100Hz beschränkt. Mit Spannungen bis 1MV und Anstiegsflanken um 100ps können diese Pulserprinzipien bisher nicht durch Halbleiterpulser ersetzt werden. Hybride Varianten (High current Institut, Ekaterinburg) erzeugen die Hochspannung zwar mit speziellen SOS-Halbleitern, steilen jedoch die Pulsflanken mit nachgeschalteten Sparc-Gaps auf.

Halbleiterpulser erreichen Pulswiederholraten von über 1MHz allerdings mit Spannungen von nur einigen Kilovolt. Man schaltet daher viele dieser Pulse mit jeweils eigener Antenne zu einem Array zusammen. Das amerikanische BAS-Array triggert viele dutzend Einzelsysteme über Lichtpulse. Die UWB-Pulser der Fa. Kentech verwenden kaskadierte 200V-400V Avalanche-Transistoren. Man kombiniert dann viele dieser Einzelpulser über koaxiale Leitungstransformatoren auf Ausgangsspannungen von über 50kV. An der FH-Gelsenkirchen wurde ein koaxialer 5.5kV-UWB Pulser entwickelt [8], der den transienten Avalanche-Effekt, bekannt von Trapatt-Dioden, in herkömmlichen Dioden und Transistoren ausnutzt. Am Ioffe-Institut in St. Petersburg wurden von Grekhov ebenfalls Avalanche-Effekt Dioden entwickelt und gestacked, die eine wesentlich höhere Lebensdauer und eine höheren Durchbruchspannung und damit geringere Anzahl von Einzelstufen aufweisen. Diese FID-Bauelemente werden von der gleichnamigen Firma auch in Deutschland für UWB-Pulser bis 200kV und Subnanosekunden Anstiegszeit eingesetzt.

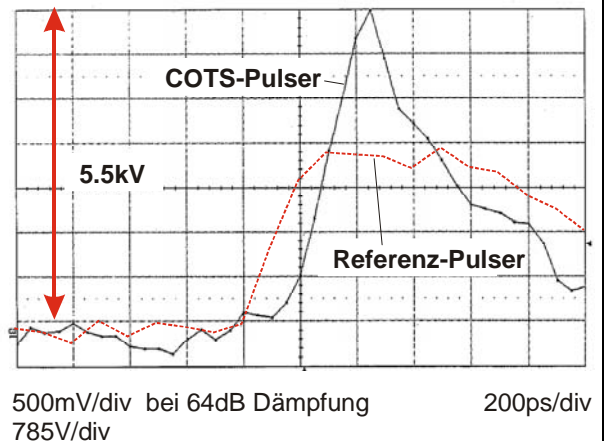
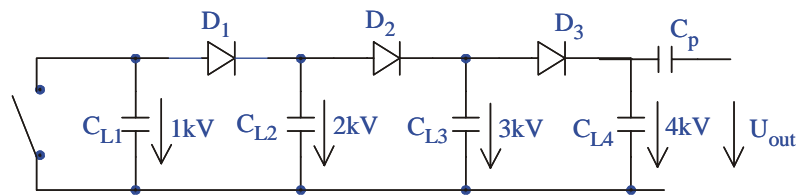


Abb.9: 3-stufiger UWB-Pulsar der FH-Gelsenkirchen mit COTS-Dioden im transienten Avalanche Betrieb und koaxialer Endstufe

Ein weiteres Halbleiter-basiertes UWB-Pulsar-System stellt einen 100kV 1ns-Puls über eine nichtlineare Leitung bis auf 86ps Flankensteilheit auf, wie dies von Dolan, Cardiff School, in den 90-er Jahren berichtet wurde.

DS-Pulsar laden ebenfalls eine Leitungsstruktur auf Hochspannung auf, nutzen jedoch die Reflexionen auf der Leitung nach dem Schalterschluss zur Erzeugung einer abklingenden Sinusschwingung aus, die ihrerseits folgend über eine Breitbandantenne abgestrahlt wird. Die Schalter sind durch Sparc-Gaps realisiert, die Spannung liegt oft weit über 1MV.

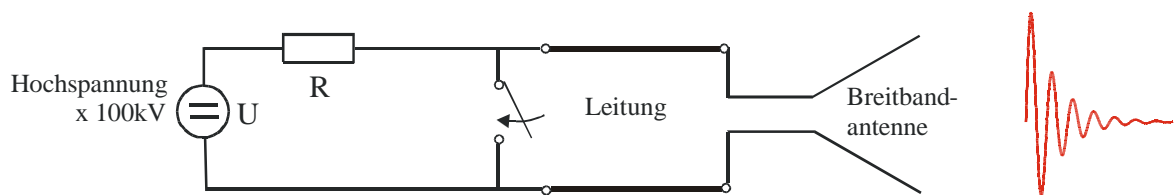


Abb.10: DS-Prinzip

Die Leitungslänge definiert die abgestrahlte Frequenz. DS-Systeme zeigen trotz hoher Spannungen sehr kompakte Bauformen. Einzelsysteme können ebenfalls zu arrays kombiniert werden, wobei wegen der geringeren Anstiegszeit auch die Triggerzeittoleranzen im Vergleich zu UWB unkritischer sind. Die Fa. Diehl/Röthenbach bietet neben autonomen Koffer DS-Systemen auch kaskadierte Vielfach-DS-Arrays mit Feldstärken über 500kV/m als Testsysteme an.

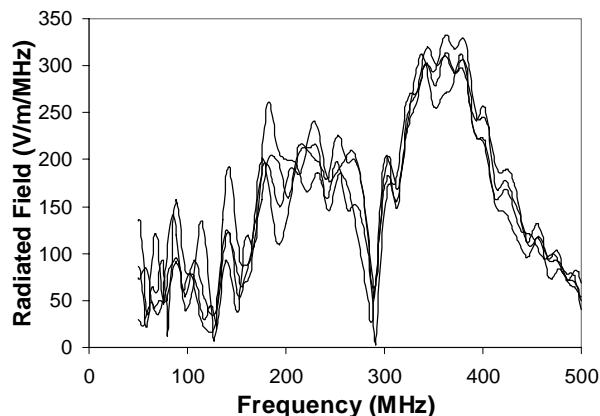


Abb.10: Spektrum des abgestrahlten DS-Pulses eines 3er-Arrays der Fa. Diehl

Der Einsatz von CW, HPM, UWB oder DS Systemen orientiert sich neben der Kopplungseffektivität und der Wirkung auf die Elektronik auch an dem einzuhaltenden Sicherheitsabstand zu Personen. HPM und CW als energiereiche Signalformen bewirken thermische Effekte in biologischen Körpern. Da hierbei die maximale spezifische Absorptionsrate SAR von 0.4W/kg nicht überschritten werden darf, zeigen diese i.a. viel größere Sicherheitsabstände als UWB und DS. Die Leistungssignale UWB/DS bedingen wegen ihrer kurzen Pulsbreite keine thermischen Effekte bei Personen. Nichtthermische biologische Effekte von DS und UWB Pulsen sind unterhalb von 1MV/m bei abgestrahlten Feldern bis dato nicht reproduzierbar nachweisbar. Die Nato begrenzt jedoch in ihrer Norm STANAG 2345 die maximale Expositionsspitzenfeldstärke für Personen auf 200kV/m. Dieser Spitzenfeldstärkewert bestimmt i.a. den Sicherheitsabstand zu UWB und DS Quellen.

REFERENCES

- [1] J.Bohl, T.Ehlen, F.Sonnemann „HPM-Effects in LF-Electronic-Circuits: A Numerical Approach“, EUROEM98, Tel-Aviv, Israel, June 1998.
- [2] T.Ehlen, J.Bohl, F.Sonnemann „Electromagnetic Coupling Paths to Electronic Systems Connected with Electronic Setups and Destruction Mechanism“, IST/SET Symposium 98, Aalborg, Denmark, October 1998.
- [3] J. Bohl, T.Ehlen, G. Staines, F. Sonnemann, „ Interference and Destruction Mechanisms of Electronic Irradiated with HPM and UWB Sources“ , ICEAA01, September 2001, Turin, Italy
- [4] T.Ehlen, J.Bohl, “Einführung in Chaos und Nichtlinearitäten bezüglich Elektromagnetischer Effekte”, BakWVT-Mannheim EME-Symposium-2005
- [5] D. Taylor, D.V. Giri, “High-Power Microwave Systems and Effects ”, Taylor&Francis, 1994
- [6] J. Benford, Swegle, “High-Power Microwaves ”, Artech House, 1992
- [7] T.Ehlen, J.Bohl, R.Kuhnke, F.Sonnemann „Compact HPM and UWB Sources using Explosives – The potential of Future non lethal Warhead Systems“, EUROEM 2000, Edinburgh, June 2000.
- [8] T.Ehlen, “UWB-Halbleiterpulser – Konzepte und Realisierungen mit COTS-Bauteilen” BakWVT-Mannheim EME-Symposium-2005