

Florian Brauer

**Schutz von komplexen elektronischen
Systemen vor Störungen durch
elektromagnetische Pulse hoher Leistung**



Cuvillier Verlag Göttingen
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag







Schutz von komplexen elektronischen Systemen vor Störungen durch elektromagnetische Pulse hoher Leistung

Vom Promotionsausschuss der
Technischen Universität Hamburg-Harburg
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur
genehmigte Dissertation

von
Dipl.-Ing. Florian Brauer
aus
Hamburg



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2011

Zugl.: (TU) Hamburg-Harburg, Univ., Diss., 2011

978-3-86955-982-7

Vorsitzender des Prüfungsausschusses: Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Krautschneider

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Jan Luiken ter Haseborg

2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Stefan Dickmann

Tag der mündlichen Prüfung: 02. Dezember 2011

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2011

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2011

Gedruckt auf säurefreiem Papier

978-3-86955-982-7



Danksagung

Die hier vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Institut für Messtechnik und EMV der Technischen Universität Hamburg-Harburg. Mein Dank gilt zuerst meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Jan Luiken ter Haseborg für die Betreuung der hier vorliegenden Arbeit. Er hat dadurch, dass er immer voll hinter seinen Mitarbeitern steht und diese stets fördert und unterstützt, optimale Arbeitsbedingungen für diese Arbeit geschaffen. Prof. Dr.-Ing. Stefan Dickmann gilt mein Dank für die Übernahme des Korreferats sowie anregende Diskussionen während der Arbeit an gemeinsamen Forschungsprojekten. Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Krautschneider danke ich für die Übernahme des Vorsitzes im Prüfungsausschuss. Für die gute Zusammenarbeit während der Projektbearbeitung möchte ich den Kollegen vom WIS in Munster danken. Hier haben insbesondere Dr.-Ing. Frank Sabath und Dr. Stefan Potthast das bearbeitete Projekt definiert und betreut. Für die Hilfe während der Messkampagnen und der Bereitstellung der hervorragenden Messtechnik danke ich Berthold Römer, André Bausen, Jörg Maack, Arnhold Kaiser und Horst Schubert. Meinen Kollegen und Freunden aus dem Institut an der TU Hamburg-Harburg danke ich für das äußerst freundschaftliche und offene Arbeitsumfeld. Hierzu zählen Dr.-Ing. Roland Krzikalla, für die perfekte Einarbeitung und Unterstützung am Anfang der Projektarbeit, Dr.-Ing. Tobias Pilsak, Dr.-Ing. Kai Haake und Hendrik Fischer für den gemeinsamen Ausgleichssport und das Lachen neben der Arbeit sowie Christian Klünder und Helge Fielitz für die kritische Durchsicht und Kommentierung des Manuskriptes, sowie für viele anregende Diskussionen. Nicht nur für dies alles sondern auch für die wunderbare gemeinsame Studenten- und Arbeitszeit danke ich meinem Freund Tobias Dyballa. Besonders danken möchte ich auch allen Studenten, die mit Begeisterung und großartigem Engagement im Rahmen von HiWi-Tätigkeiten, Studien- bzw. Bachelor- oder Master- bzw. Diplomarbeiten einen wichtigen Teil zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, insbesondere Matthias Warncke und Sebastian Fahlbusch. Danke an meinen gesamten Freundeskreis aus den Tagen vor der Zeit an der Uni dafür, dass wir uns nicht aus den Augen verloren haben, ganz besonders Matze. Ein ganz großer Dank gilt meiner ganzen Familie und insbesondere meiner Mutter Angelika, ohne deren Unterstützung und Liebe diese Arbeit nicht zustande gekommen wäre. Ich danke meinem Sohn Maximilian, den ich über alles liebe, dass er mir stets ein Ansporn ist und für sein Lächeln, das mich glücklich macht. Der letzte und innigste Dank gilt meiner geliebten Frau Tanja, die mir Kraft gibt, die mich in perfekter Weise ergänzt und das Leben zu etwas Wundervollem macht.





Für meine Großmutter Eva





Man muss noch Chaos in sich haben,
um einen transzendenten Stern gebären zu können.

Irvin D. Yalom: Und Nietzsche weinte



Kurzfassung

Das Versagen eines elektronischen Systems kann in der heutigen Zeit verheerende Folgen haben, denn nicht nur die Wirtschaft sondern auch Menschenleben sind von diesen abhängig. Um die volle Funktionsfähigkeit sicherzustellen, ist die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) von elektronischen Systemen untereinander zu gewährleisten. Die Nachfrage nach immer höheren Datenraten und kompakteren elektronischen Komponenten führt zu erhöhten Nutzfrequenzen, niedrigeren Betriebsspannungen und höheren Packungsdichten, die mit einer erhöhten Empfindlichkeit der modernen elektronischen Systeme verbunden sind. Dadurch reagieren Systeme anfälliger auf äußere Störungen, insbesondere auf Störquellen, die bewusst zur Beeinflussung eines elektronischen Systems eingesetzt werden (z.B. aus terroristischen Hintergründen). Diese Quellen zur Erzeugung elektromagnetischer Pulse extrem hoher Leistung (HPEM) decken schmalbandige Mikrowellenimpulse bis hin zu ultrabreitbandigen Pulsen ab. Bei der Einkopplung in ein System kann es zu einer vorübergehenden Beeinträchtigung der Funktion bis hin zur Zerstörung von Halbleiterbauelementen kommen. Deshalb ist die Entwicklung von Maßnahmen zur Härtung des zu schützenden Systems essentiell. Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung von Schutzkonzepten, die gegen HPEM-Störungsformen eingesetzt werden können, sowie die Analyse der Wirkung von Schutzschaltungen in verschiedenen Bereichen wie der Spannungsversorgung oder auch der Datenübertragung von komplexen Systemen. Das Ansprechverhalten der Schutzelemente wird hierbei messtechnisch und mit Hilfe von Simulationssoftware untersucht, was zu einer allgemeinen Ableitung eines Schutzkonzeptes für komplexe Systeme gegen Störungen durch HPEM und Richtlinien für neue Schutzkomponenten führt.

Abstract

The failure of a technical system can have devastating consequences nowadays, for not only the economy but also human lives depend on them. To ensure the functionality of electronic systems, the electromagnetic compatibility (EMC) to and among other systems is to be provided. The demand for higher data rates and more compact electronic components leads to increasing data signal frequencies, lower operating voltages and higher packing densities, which can be associated with an increased vulnerability of modern electronic systems. For this reason systems are more susceptible to interferences, particularly disturbance sources that intentionally are used to disable electronic systems, e.g. for a terrorist purpose. These sources for generating electromagnetic pulses with extremely high power (HPEM), overlay narrow-band microwave pulses to ultra wideband pulses. The coupling in a system may cause a temporary functional impairment or destruction of semiconductor devices. This leads to the necessity of usable protection concepts. The present work deals with the development of hardening measures, that can be used against different HPEM interferences, and the investigation of the behavior of protection elements in different parts of complex systems as for the power supply or for data communication lines. The response of the protection elements is measured and verified with the help of simulation software, leading to a general protection scheme for complex systems against disturbances by HPEM and guidelines for new protection components.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Zielstellung und Methodik der Arbeit	3
2	Bedrohung durch HPEM-Störsignale.....	5
2.1	Elektromagnetische Störpulse	5
2.2	Ermittlung von HPEM-Signalparametern	7
2.2.1	<i>Standardisierung</i>	7
2.2.2	<i>Zeitbereich</i>	8
2.2.3	<i>Frequenzbereich</i>	12
2.3	IEMI-Bedrohungspulsformen.....	15
2.3.1	<i>Definition von UWB-Pulsen</i>	15
2.3.2	<i>Definition von HPM-Pulsen</i>	17
2.3.3	<i>Definition von DS-Pulsen</i>	19
2.4	Bedrohungspotential durch IEMI.....	21
2.5	Stand der Forschung	22
3	Einkopplung von HPEM-Störsignalen in komplexe Systeme	25
3.1	Allgemeine Kopplungsmechanismen.....	25
3.2	Einkoppelvorgänge unter HPEM-Bedingungen in generische PCB-Strukturen	29
3.2.1	<i>Einkopplung von UWB-Pulsen</i>	29
3.2.2	<i>Einkopplung von HPM-Pulsen</i>	31
3.2.3	<i>Einkopplung von DS-Pulsen</i>	33
3.3	Störfestigkeitsuntersuchung eines IT-Testsystems.....	34
3.3.1	<i>Beschreibung des Testsystems</i>	34
3.3.2	<i>Charakterisierung der Störungen unter HPEM-Bedingungen</i>	35
3.3.3	<i>Messung von leitungsgebundenen Störsignalen</i>	39
3.4	Bestimmung von Transferfunktionen kritischer Koppelpfade	43
3.4.1	<i>Modellierung und Untersuchung der Kabelstrukturen</i>	43
3.4.2	<i>Modellierung und Untersuchung der Gehäusestruktur</i>	47
4	Generierung von HPEM-Signalen	53
4.1	Messaufbauten für UWB-Messungen	53

4.1.1	<i>UWB-Halbleiterpulsgeneratoren mit hoher Pulswiederholrate</i>	54
4.1.2	<i>UWB-Messaufbauten mit industriellen Quellen</i>	59
4.2	Messaufbau für HPM-Messungen.....	59
4.2.1	<i>Messaufbau in der HPM-Simulationsanlage</i>	60
4.2.2	<i>HPM-Signalerzeugung unter Laborbedingungen</i>	61
4.3	Messaufbau für DS-Messungen.....	64
4.3.1	<i>Messaufbau mit industrieller DS-Quelle</i>	64
4.3.2	<i>Verwendung von Parallelschwingkreisen</i>	65
4.3.3	<i>Verwendung definierter Einkoppelstrukturen</i>	66
4.4	Definition von Referenzpulsen.....	67
4.4.1	<i>Referenzpulse gleicher Pulsenergie</i>	68
4.4.2	<i>Referenzpulse mit maximaler Amplitude</i>	69
5	Schutzschaltungen gegen HPEM-Störsignale.....	71
5.1	Allgemeine Schutzelemente und Filterschaltungen.....	72
5.1.1	<i>Nichtlineare Schutzkomponenten</i>	72
5.1.2	<i>Lineare Filter</i>	75
5.1.3	<i>Aufbau und Einsatzbereich der untersuchten Schutzkomponenten</i>	77
5.2	Modellierung und Simulation von Schutzelementen.....	81
5.2.1	<i>Modellierung über Bauteilparameter-Messungen</i>	83
5.2.2	<i>Erweiterte Modellierung durch gewichtete S-Parameter</i>	86
5.2.3	<i>Verwendete SPICE-Modelle für die Simulation</i>	88
5.3	Transientes Ansprechverhalten nichtlinearer Elemente unter HPEM-Bedingungen.....	90
5.3.1	<i>Transientes Ansprechverhalten unter UWB-Bedingungen</i>	90
5.3.2	<i>Transientes Ansprechverhalten unter HPM-Bedingungen</i>	92
5.3.3	<i>Transientes Ansprechverhalten unter DS-Bedingungen</i>	96
5.3.4	<i>Einfluss extremer Pulsparameter</i>	97
5.3.5	<i>Bestimmung von Zerstörungsgrenzen</i>	100
5.4	HPEM-Störsignaldämpfung durch lineare Filter.....	101
5.4.1	<i>Bestimmung von Zerstörungsgrenzen</i>	102
5.5	Schutzwirkung von mehrstufigen Schutzschaltungen.....	103

5.6	Bewertung der Schutzschaltungen	106
6	Bewertung von HPEM-Schutzmaßnahmen auf Systemebene	109
6.1	Entwicklung eines HPEM-Systemschutzkonzeptes	109
6.1.1	<i>Einsatz von Ethernet-Schutzelementen</i>	110
6.1.2	<i>Entwicklung von erweiterten Netzfilterstrukturen</i>	114
6.1.3	<i>Maßnahmen für Gehäusestrukturen</i>	116
6.2	Wirkung der Schutzkomponenten auf Systemebene	118
6.2.1	<i>Schutz der Ethernet-Datenübertragung</i>	119
6.2.2	<i>Schutz der Spannungsversorgung</i>	124
6.2.3	<i>Schutz der Gehäusestruktur</i>	127
6.3	Fazit.....	130
7	Zusammenfassung.....	133
8	Literaturverzeichnis.....	137

