

# 1 Einleitung

Der Mensch ist in nahezu allen Bereichen des täglichen Lebens abhängig von elektronischen Kommunikations-, Steuer- oder Antriebssystemen. Der Ausfall eines technischen Systems kann verheerende Folgen haben, da nicht nur Arbeitsabläufe, Steuerprozesse und damit die Wirtschaftlichkeit, sondern auch Menschenleben von diesen abhängig sein können. Die uneingeschränkte Funktionsfähigkeit und damit die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) von elektronischen Systemen selbst sowie untereinander zu gewährleisten, ist heutzutage eine unabdingbare Disziplin. Die EMV soll laut Gesetz bei elektronischen Systemen folgendes gewährleisten [1]:

1. Die von elektronischen Systemen verursachten elektromagnetischen Störungen dürfen kein Niveau erreichen, bei dem ein bestimmungsgemäßer Betrieb von Funk- und Telekommunikationsgeräten oder anderen Betriebsmitteln nicht möglich ist.
2. Sie müssen gegen die bei bestimmungsgemäßem Betrieb zu erwartenden elektromagnetischen Störungen hinreichend unempfindlich sein, um ohne unzumutbare Beeinträchtigung bestimmungsgemäß arbeiten zu können.

Ein frühes und tragisches Beispiel dafür, dass es ohne Maßnahmen bezüglich der EMV eines Gerätes zu gravierenden Problemen kommen kann, stellt der durch ein nicht ausreichend geschirmtes Kabel ausgelöster Raketenstart eines Kampffjets auf dem Flugzeugträger USS Forrestal im Jahre 1967 dar, der viele Todesopfer forderte [2]. Weitere Beispiele werden in [3] genannt.

Der Bedarf nach immer höheren Datenraten und kompakteren elektronischen Komponenten führt zu steigenden Nutzsignalfrequenzen, niedrigeren Betriebsspannungen und höheren Packungsdichten, was mit einer erhöhten Empfindlichkeit moderner elektronischer Systeme durch äußere Störungen einhergeht. Auf der anderen Seite werden die Störquellen immer zahlreicher und arbeiten bei immer höher werdenden Leistungen. Dazu zählen nicht nur unvermeidbare Störquellen des alltäglichen Gebrauchs wie z.B. Sender für den Mobilfunk, sondern auch ungewollte elektromagnetische Störpulse hoher Leistung (engl. HPEM<sup>1</sup>).

---

<sup>1</sup> HPEM: High Power Electromagnetics

Die EMV beschäftigt sich mittlerweile auch mit diesen HPEM-Störpulsen, da die Amplituden der auftretenden Störsignale extreme Feldstärkewerte bis zu mehreren 100 kV/m annehmen können. Laut [4] wird ab einer möglichen Feldstärke, die 100 V/m übersteigt, von HPEM-Pulsen gesprochen, womit sich diese Störungsform deutlich von generellen EMV-Störeinflüssen im Bereich von 3-10 V/m absetzt. Zusätzlich deckt das Frequenzspektrum von HPEM-Störsignalen den resonanten Bereich gängiger elektronischer Systeme ab, die aufgrund vorhandener Eingänge für Spannungsversorgungsleitungen und Datenleitungen oder sonstiger Öffnungen (z.B. Lüftungsschlitze) ein empfindliches Ziel für HPEM-Störquellen bieten. Daher wird auch die Bedrohung durch den bewussten Einsatz von speziellen, selbstgebaute Quellen durch Terroristen immer größer. Es sind bereits mehrere Fälle dokumentiert worden, in denen es zu einer bewussten Beeinflussung eines elektronischen Systems gekommen ist, wie z.B. der Ausfall von Teilen des russischen Telekommunikationsnetzes durch selbstgebaute HPEM-Quellen [5]. Dabei ist die Anzahl von unaufgeklärten Fällen dieser Art wahrscheinlich sehr groß, da der Angriff mit einer elektromagnetischen Waffe meist unentdeckt bleibt. Der Grund hierfür ist, dass die Täter einen großen Abstand vom zu störenden System wahren können, da HPEM-Störquellen auch in großer Entfernung noch elektrische Spitzenfeldstärken im kV/m-Bereich erreichen können.

Um solche Vorfälle zu vermeiden, ist dieses Bedrohungsszenario in der letzten Zeit auch ein wichtiges Diskussionsthema und Forschungsgebiet geworden. Die durch HPEM- (speziell ultrabreitbandige) Signale auftretenden Störungen und Effekte auf Bauteilebene ([6]-[8]) und auch auf Systemebene ([9]-[12]) sind in einer Vielzahl von Veröffentlichungen untersucht worden. Dabei kann es auf Bauteilebene im schlimmsten Falle zu einer Zerstörung von Halbleiter-Bauelementen durch Latch-Up oder einer Einschmelzung durch Wärmeentwicklung sowie auf Systemebene z.B. bei Computersystemen bis zum vollständigen Systemausfall kommen. Das macht auch die Entwicklung von Schutzkonzepten zur Sicherstellung der Funktionsfähigkeit der betroffenen Systeme unabdingbar. Hierbei müssen Abschirmmaßnahmen zum Schutz gegen feldgebundene Störeinkopplung sowie Filterschaltungen zum Schutz gegen leitungsgebundene Störeinkopplung Berücksichtigung finden. Durch die eingangs beschriebenen immer höher werdenden Nutzsignalbandbreiten der heutigen elektronischen Systeme wird der Einsatz von linearen Filtern immer schwieriger, wodurch nichtlineare Schutzelemente sehr häufig zusätzlich eingesetzt werden.

## ***1.1 Zielstellung und Methodik der Arbeit***

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist es, Schutzmaßnahmen (insbesondere Schutzschaltungen) gegen verschiedene Formen von HPEM-Störsignalen zu entwickeln und in komplexen elektronischen Systemen einzusetzen. Die Schutzelemente werden hierbei messtechnisch und mit Hilfe von Simulationssoftware untersucht, was zu einer allgemeinen Ableitung eines Schutzkonzeptes für komplexe Systeme gegen Störungen durch HPEM-Signale und Richtlinien für neue Schutzkomponenten führt. Ein „Allheilmittel“ gegen alle möglichen elektromagnetischen Störungen angepasst auf verschiedenste Applikationen ist nicht realisierbar. Es sollen vielmehr Möglichkeiten aufgezeigt werden, wie Komponenten komplexer Systeme effizienter gegen HPEM-Störungen geschützt werden können. Ein wichtiger Aspekt dieser Arbeit ist es, ein Bewusstsein für die Notwendigkeit und Realisierbarkeit dieser Schutzmaßnahmen für sicherheitskritische Systeme zu entwickeln. Dabei wird insbesondere Wert darauf gelegt, dass die zu entwickelnden Maßnahmen von einem Entwicklungs- bzw. Systemingenieur wie auch von Installateuren und Technikern in der Entwicklungsphase des zu schützenden Systems umsetzbar und realisierbar sind.

In Kapitel 2 werden zunächst die zu Grunde gelegten HPEM-Störungsformen und Bedrohungsszenarien definiert, wobei besonders auf die genaue Beschreibung der Störsignalparameter Wert gelegt wird. In Kapitel 3 wird auf die Einkopplung in ein komplexes System eingegangen (hier speziell ein IT-Testsystem), wobei insbesondere auftretende Effekte und eingekoppelte Störsignale präsentiert werden. Im folgenden Kapitel 4 wird die labortechnische Generierung von HPEM-Störsignalen thematisiert, um Schutzschaltungen und Systeme unter HPEM-Bedingungen untersuchen zu können. In Kapitel 5 werden allgemeine lineare und nichtlineare Schutzschaltungen beschrieben und in einer Simulationsumgebung modelliert. Zusätzlich wird das transiente Ansprechverhalten der entwickelten Schutzschaltungen bei Beaufschlagung mit verschiedenen HPEM-Störsignalen in Simulation und Messung untersucht. Kapitel 6 liefert eine abschließende Bewertung der untersuchten Schutzkonzepte auf Systemebene. Hierbei werden Richtlinien für zukünftige Entwicklungen von Schutzschaltungen abgeleitet. In Kapitel 7 werden die Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst.



## 2 Bedrohung durch HPEM-Störsignale

Die Kenntnis und Definition der elektromagnetischen Umgebung eines Systems sind für Empfindlichkeitsuntersuchungen und die Auslegung von Schutzkonzepten grundlegend. In der EMV können elektromagnetische Felder, die von außen in Systemkomponenten einkoppeln können, der Grund für kurzzeitige Fehlfunktionen oder gar Ausfälle sein, wobei es vom System und der Applikation abhängt, in wie weit schon eine kurze Interferenz für das System kritisch sein kann. Elektromagnetische Pulse haben aufgrund ihrer häufig großen Breitbandigkeit und der zumeist hohen abgestrahlten Leistungen ein besonderes Störpotential.

In diesem Kapitel werden zunächst allgemeine transiente elektromagnetische Störsignale und speziell elektromagnetische Pulse hoher Leistung (HPEM-Signale) beschrieben. Außerdem wird auf die Standardisierung und Definition von HPEM-Signalen, die bewusst zur Störung von elektronischen Systemen eingesetzt werden könnten, eingegangen. Dies führt zu einer allgemeingültigen Charakterisierung dieser Störsignale, die auch als Grundlage für diese Arbeit dient. Daraufhin werden spezielle HPEM-Pulse im Zeit- und Frequenzbereich charakterisiert und die jeweiligen relevanten Signalparameter ermittelt. Abschließend wird auf mögliche Szenarien eingegangen, in denen HPEM-Störquellen bewusst zur Störung von Systemen eingesetzt werden könnten, sowie das Bedrohungspotential dieser Störformen analysiert.

### 2.1 Elektromagnetische Störpulse

In der Elektrotechnik wird zwischen periodischen Störungen, die über ihre Frequenz und Amplitude definiert werden, und transienten Störungen unterschieden. Dies sind nichtperiodische Vorgänge, die unipolar oder bipolar sowie in Form von Impulspaketen (engl. Bursts) auftreten können [3]. Hierbei kann der Störpuls als elektromagnetischer Feldimpuls oder als eingekoppelte Störspannung oder Störstrom vorliegen.

Insbesondere elektromagnetische Störpulse hoher Leistung haben ein besonderes Störpotential. Dabei sind diese HPEM-Quellen nicht auf natürliche Phänomene wie z.B. Blitzentladungen (engl. LEMP<sup>2</sup>) oder elektrostatische Entladungen (engl. ESD<sup>3</sup>) beschränkt, sondern wer-

---

<sup>2</sup> LEMP: Lightning Electromagnetic Pulse

<sup>3</sup> ESD: Electrostatic Discharge

den durch eine Vielzahl an künstlichen Störquellen, wie z.B. Schaltvorgänge in Hochspannungsanlagen (engl. SEMP<sup>4</sup>) ergänzt.

Eine Sonderstellung nehmen Störquellen ein, die zur bewussten Störung oder gar Zerstörung von elektronischen Systemen hergestellt und eingesetzt werden. Der Einsatz solcher Quellen kann u.a. einen militärischen Hintergrund haben, wie z.B. die strategische Zündung einer nuklearen Waffe, wobei ein elektromagnetischer Puls extrem hoher Energie entsteht (engl. NEMP<sup>5</sup>). Bei Zündung oberhalb der Erdatmosphäre (exoatmosphärischer NEMP) ionisiert die dabei entstehende hochenergetische Strahlung die Moleküle der Atmosphäre, wodurch ein starkes elektromagnetisches Feld entsteht (engl. HEMP<sup>6</sup>) [13]. Aufgrund der relativ geringen Anstiegszeit und der hohen Amplitude des entstehenden Feldpulses reicht das Spektrum des HEMP bis hin zu mehreren hundert MHz [14].

Der Fortschritt bei der Entwicklung von elektromagnetischen Quellen zur Erzeugung von elektromagnetischen Pulsen, die bewusst zur Störung oder Zerstörung von elektronischen Systemen eingesetzt werden, ist sehr schnell. Das führt zu abgestrahlten elektromagnetischen Feldern immer höherer Amplitude mit Spektralanteilen bis hin zu mehreren GHz. Da viele komplexe elektronische Systeme gerade in diesem Bereich empfindlich reagieren, ist eine Störung oder gar Zerstörung dieser Systeme sehr wahrscheinlich. Aufgrund dieser immer größer werdenden Bedrohung ist von URSI<sup>7</sup> im August 1999 der Begriff IEMI<sup>8</sup> eingeführt worden. Dadurch sind spezielle HPEM-Störpulse, die für IEMI-Angriffe genutzt werden können, Gegenstand vieler laufender Forschungsvorhaben wie auch dieser Arbeit geworden. Man unterscheidet hierbei zwischen schmalbandigen (Hochleistungsmikrowellen-Puls, engl. HPM<sup>9</sup>), breitbandigen (u.a. gedämpfte Sinusschwingungspulse, engl. DS<sup>10</sup>) und ultrabreitbandigen (engl. UWB-Puls<sup>11</sup>) Quellen. Abbildung 2-1 vergleicht die Spektren verschiedener HPEM-Pulse im Frequenzbereich und macht das Störpotential z.B. im Vergleich zum LEMP oder HEMP deutlich. In Abschnitt 2.3 wird auf die verschiedenen Formen von HPEM-Pulsen mit Anteilen im HF-Bereich im Detail eingegangen.

---

<sup>4</sup> SEMP: Switching Electromagnetic Pulse

<sup>5</sup> NEMP: Nuclear Electromagnetic Pulse

<sup>6</sup> HEMP: High Altitude Electromagnetic Pulse

<sup>7</sup> URSI: Union Radio-Scientifique Internationale

<sup>8</sup> IEMI: Intentional Electromagnetic Interferences

<sup>9</sup> HPM: High Power Microwaves

<sup>10</sup> DS: Damped Sinusoid

<sup>11</sup> UWB: Ultra Wideband

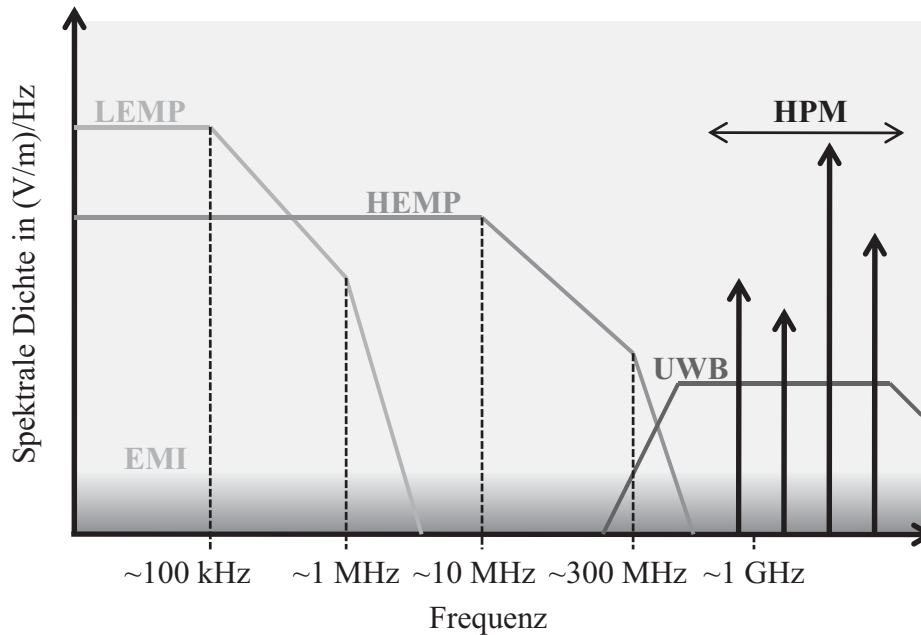


Abbildung 2-1: Frequenzspektren von verschiedenen elektromagnetischen Pulsen (vgl. [4], [15])

## 2.2 Ermittlung von HPEM-Signalparametern

Zur Beurteilung des transienten Ansprechverhaltens verschiedener Schutzschaltungen bei unterschiedlichen Störpulsformen ist ein Vergleich der Störsignale sowie eine genaue Signalbeschreibung und Parametrisierung wichtig. In diesem Abschnitt werden die bisher entwickelten HPEM-Standards und die wichtigsten Parameter sowie deren Bestimmung im Zeit- und Frequenzbereich für die Bewertung von transienten Signalen hoher Leistung beschrieben.

### 2.2.1 Standardisierung

Da die Entwicklung von HPEM-Quellen erst in den letzten Jahrzehnten enorm fortgeschritten ist, sind die Arbeiten an allgemeingültigen Standards auch seit jüngster Zeit voran gekommen. Seit 1992 beschäftigt sich die Kommission SC 77C als Teil der IEC<sup>12</sup> mit der Entwicklung und Veröffentlichung von HPEM-Standards unter Berücksichtigung des HEMP- und der verschiedenen HPEM-Störpulse sowie den auftretenden Effekten durch IEMI [16]. Bei der Umsetzung von Schutzmaßnahmen wird meist auf die alten HEMP-Schutzkonzepte verwiesen.

Die Normen zum HEMP werden bereits seit vielen Jahren veröffentlicht und laufend überarbeitet. HPEM-Normen sind in den letzten Jahren erst veröffentlicht worden oder befinden sich noch in der Entwurfsphase. In IEC 61000-2-13 [4] werden HPEM-Umgebungsparameter de-

<sup>12</sup> IEC: International Electrotechnical Commission