



Roland Krzikalla (Autor)  
**Beeinflussung und Schutz von elektronischen  
Bauelementen auf PCB-Ebene unter  
Berücksichtigung extremer elektromagnetischer  
Störungen**

Roland Krzikalla

---

**Beeinflussung und Schutz von  
elektronischen Bauelementen auf PCB-  
Ebene unter Berücksichtigung extremer  
elektromagnetischer Störungen**

---



Cuvillier Verlag Göttingen  
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag

<https://cuvillier.de/de/shop/publications/940>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,  
Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: [info@cuvillier.de](mailto:info@cuvillier.de), Website: <https://cuvillier.de>

# 1 Einleitung

Elektronische Geräte spielen im heutigen Leben eine zentrale Rolle. Während vor einigen Jahren z.B. Computer nur in sehr wenigen Bereichen als unterstützende Hilfsmittel eingesetzt worden sind, werden sie heute in nahezu allen erdenklichen Anwendungsgebieten verwendet. Das liegt zum einen an der hohen Verfügbarkeit von elektronischen Schaltkreisen und den damit deutlich sinkenden Preisen, zum anderen aber auch an der immens steigenden Rechenleistung und den daraus resultierenden erweiterbaren Möglichkeiten. Es lassen sich viele Beispiele für den effizienten Einsatz von elektronischen Systemen im heutigen Leben finden. Im Folgenden werden einige Wichtige diskutiert.

Kommunikation ist durch den Einsatz von digitalen Übertragungstechniken robuster, qualitativ hochwertiger, effizienter und deutlich billiger geworden. Die ersten Generationen von Mobiltelefonen sind nicht nur unhandlich und extrem teuer gewesen, die Datenübertragung selbst hat sich einfach stören oder gar abhören lassen. Mit der Einführung der digitalen Mobilfunknetze sind die mobilen Endgeräte kleiner und billiger, aber auch die Datenübertragung schneller und sicherer geworden. Auch kabelgebundene Kommunikation ist durch den Einsatz von Digitaltechnik erheblich schneller und zuverlässiger geworden. Heutige moderne asynchrone DSL<sup>1</sup>-Verbindungen ermöglichen Datenübertragungsraten von bis zu 32 MBit/s (Stand Anfang 2009). Analoge Datenübertragungen mit Modems ermöglichten üblicherweise lediglich Datenraten bis zu 56 kBit/s. Daraus ergaben sich für den Anwender Möglichkeiten, die in dem Umfang vorher nicht bestanden haben. Elektronische Finanztransaktionen werden durch starke digitale Verschlüsselungstechniken sicherer, der Zugriff auf weltweites audiovisuelles Wissen kann schneller erfolgen oder elektronische Märkte können ein breiteres Angebot präsentieren.

In der Automobilindustrie werden elektronische Systeme immer häufiger eingesetzt, um die Sicherheit im Transportwesen weiter zu erhöhen und den Kraftstoffverbrauch weiter zu reduzieren. In nahezu allen modernen Neuwagen sind Sicherheitssysteme wie das elektronische Stabilitätsprogramm ESP oder das Antiblockiersystem ABS serienmäßig eingebaut, die ohne den Einsatz von elektronischen Steuergeräten und Sensoren nicht hätten realisiert werden können. Auch erst die elektronische Steuerung und Regelung von Motoren ermöglicht es, eine optimierte Kraftstoffnutzung und somit eine reduzierte Schadstoffentwicklung voranzutreiben. In der Luft- und Raumfahrt überwachen elektronische Systeme das Verhalten von Flugzeugen und greifen unterstützend ein, wenn kritische Situationen vorausgesehen werden oder bereits eingetroffen sind. Auch der steigende Logistikaufwand von Transportgütern an Umschlagbahnhöfen, Frachthäfen oder Flughäfen wäre ohne computergestützte Systeme in diesem Umfang und dieser Zuverlässigkeit nicht zu bewältigen.

Neben den rein technisch bezogenen Gebieten finden computergestützte Systeme immer mehr Anwendung z.B. in der Medizin oder dem Wirtschaftswesen. Bildgebende Messtechniken, wie beispielsweise der Kernspintomographie oder der digitalen Röntgentechnik, ermöglichen es den Ärzten, schnellere und sichere Diagnosen zu erstellen, um somit Krankheiten besser zu heilen oder Leben zu retten. Börsen, Banken oder Versicherungen, aber auch Privatpersonen können schneller große Datenmengen verarbeiten und Finanzanalysen erstellen, um daraus eine optimierte Wirtschaftsstrategie zu entwickeln.

---

<sup>1</sup> DSL

Digital Subscriber Line

Diese und weitere Beispiele zeigen die große Verbreitung und das enorme Anwendungspotential von elektronischen Systemen in unserer Gesellschaft. Daneben zeigt sich jedoch aber auch der Wunsch nach immer schnelleren, kleineren und billigeren elektronischen Komponenten. Die bisherige Entwicklung resultierte dabei in einer Reduktion von Strukturgrößen und Spannungspegeln, die eine Erhöhung von Taktraten ermöglichte.

Die Reduktion der Strukturgröße von elektronischen Komponenten und das Herabsetzen der Nutzspannungspegel bergen jedoch auch Risiken. Werden solche Komponenten elektromagnetischen Störungen ausgesetzt, können bereits deutlich geringere Störpegel ein Fehlverhalten des Gesamtsystems hervorrufen. Sowohl die Reduktion der Strukturgrößen als auch das Herabsetzen der Nutzspannungspegel stehen daher mehr und mehr im Gegensatz zur Sicherstellung der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) von elektronischen Systemen [3]. Die Elektromagnetische Verträglichkeit beschreibt grundsätzlich die Fähigkeit einer elektronischen Einrichtung, in ihrer elektromagnetischen Umgebung den Anforderungen entsprechend zu funktionieren, ohne diese Umgebung, zu der auch andere Einrichtungen gehören, unzulässig zu beeinflussen [1]. Die Richtlinien, nach denen die EMV von elektronischen Geräten und Systemen getestet wird, werden dabei in verschiedenen nationalen und internationalen Normen beschrieben, die darüber hinaus von Herstellerseite erweitert werden können. Diese Normen legen grundsätzlich zwei Arten von Sicherstellungsmerkmalen fest. Zum einen wird die Störaussendung von elektromagnetischen Feldern durch elektronische Einrichtungen begrenzt, zum anderen wird die Störfestigkeit von elektronischen Einrichtungen gegenüber elektromagnetischen Störungen gefordert. Üblicherweise finden daher in allen Entwicklungsphasen von elektronischen Komponenten, Systemen oder Einrichtungen begleitende EMV-Tests statt, die gemäß den anzuwendenden Normen ausgelegt werden. In vielen Fällen stellt dabei die Sicherstellung der Störfestigkeit gegen elektromagnetische Störungen, insbesondere gegenüber transiente Störungen, eine besondere Herausforderung dar.

## ***1.1 Stand der Forschung***

Durch den eingangs erwähnten Entwicklungsprozess von elektronischen Systemen hin zu immer höheren Datentransferraten ist in der aktuellen Forschung die Nutzung von extrem breitbandigen Signalen besonders vorangetrieben worden. Diese sogenannten UWB<sup>2</sup>-Signale haben in praktischen Anwendungen meist Bandbreiten von einigen hundert Megahertz. Diese Nutzsignale sind jedoch auch gleichzeitig potentielle Störungen gegenüber anderen elektronischen Geräten. Die abschließende Normung von geeigneten EMV-Tests gegenüber ultra breitbandigen Signalen ist derzeit in der Aufbauphase (Stand 2008) [2].

Zweifelsfrei konnte jedoch das enorme Störpotential von pulsformigen UWB-Signalen mit hoher Amplitude aufgezeigt werden. Im Laufe dieser Arbeit wird auf diesen Punkt noch tiefergehend eingegangen. Aufgrund der extrem großen Bandbreite von ultra breitbandigen Störungen ist die Wahrscheinlichkeit der Störeinkopplung in elektronische Einrichtungen relativ groß und dadurch ebenso die Störanfälligkeit gegenüber dieser Art von Störsignalen. Weiterhin ist das Verhalten von traditionellen Schutzschaltungen, die gegen übliche transiente Störungen eingesetzt werden, hinsichtlich des Verhaltens gegenüber UWB-Störungen untersucht worden [4]. Es hat sich gezeigt, dass diese Schutzschaltungen keine ausreichende Schutzwirkung gegen UWB-Störungen gewährleisten. Das Ansprechverhalten von traditionellen Schutzschaltungen liegt dabei in etwa der Größenordnung der Anstiegszeiten von UWB-Störungen, wodurch das Ableiten des Störstroms nicht ausreichend schnell genug

---

<sup>2</sup> UWB      ultra wideband

geschieht. Um dennoch einen Schutz gegenüber UWB-Störungen zu gewährleisten, sind verschiedene deutlich schnellere Schutzelemente hinsichtlich des UWB-Verhaltens ausgewählt und bewertet worden. Dabei konnte eine grundsätzliche Reduktion der Energie und der Amplitude von direkt beaufschlagten UWB-Pulsen beobachtet werden [5].

Die Schutzwirkung der verwendeten Bauelemente ist dabei jedoch lediglich aufgrund des Restsignals bewertet worden, nicht aufgrund des veränderten Verhaltens von realen Systemen, in denen die Schutzkomponenten eingesetzt worden sind. Weiterhin sind in den vorangegangenen Untersuchungen stets direkt beaufschlagte UWB-Pulse mit einem sehr hohen DC-Anteil verwendet worden. Störungen, die aufgrund von feldgeführten UWB-Störungen durch Einkoppelvorgänge innerhalb eines elektronischen Systems auftreten können, bleiben dabei unberücksichtigt.

## ***1.2 Einordnung und Aufbau der Arbeit***

Aus den beschriebenen Problemstellungen werden für diese Arbeit folgende Ziele abgeleitet: Es soll eine Methode entwickelt werden, elektronische Systeme gegen leitungsgebundene extreme elektromagnetische Störungen zuverlässig zu härten. Um dies zu erreichen, soll zunächst ein Aufbau entwickelt werden, der definierte leitungsgebundene Signale generiert, die typischerweise durch Störeinkopplung von extremen elektromagnetischen Störungen auf Leiterbahnen entstehen. Die so erzeugten Signale sollen zum Nachweis der Schutzwirkung mit einem geeigneten Messstand elektronischen Baugruppen, sowie davor geschalteter Schutzschaltungen zugeführt werden, um das unterschiedliche Verhalten der Baugruppen darstellen zu können. Weiterhin soll ein Schutzkonzept entwickelt werden, das systematisch auf elektronische Systeme Anwendung findet. Darüber hinaus erfolgt eine allgemeine Beschreibung der Schutzwirkung von Schutzelementen. Abschließend soll der Nachweis der Wirksamkeit von entworfenen Schutzkonzepten und den daraus hervorgegangenen Schutzschaltungen erbracht werden.

Diese Arbeit gliedert sich daher in acht Abschnitte. Nach der hier erfolgten Einleitung in die Thematik und die Aufgabenstellung wird im zweiten Kapitel die Definition von ultra breitbandigen Signalen auf Basis des Frequenzbereiches erläutert. Diese Definition wird anschließend zusätzlich auf den Zeitbereich erweitert, da eine reine Frequenzbereichsdefinition Signale zulässt, die im Rahmen dieser Arbeit ausgeschlossen werden. Anschließend erfolgt eine umfassende Diskussion über das Störpotential von UWB-Signalen. Anhand verschiedener Literaturquellen wird eine detaillierte Gefahrenabschätzung von eingekoppelten ultra breitbandigen Störungen auf allen Systemebenen getroffen, die die Notwendigkeit der in dieser Arbeit gesetzten Ziele verdeutlichen.

Im dritten Kapitel werden die Störpulse definiert, die aufgrund von Einkoppelvorgängen in elektronischen Systemen resultieren und gegen die letztlich zuverlässige Schutzkonzepte entwickelt werden sollen. Diese Definition stützt sich auf die Frequenz- und Zeitbereichsdefinitionen für ultra breitbandige Signale, dem Einkoppelverhalten von komplexen elektronischen Systemen sowie dem Ausbreitungsverhalten von eingekoppelten UWB-Signalen auf PCB-Ebene. Der Nachweis dieser theoretisch erarbeiteten Störsignalverläufe wird im vierten Kapitel anhand von Einkoppelsimulationen und -messungen mithilfe eines Testsystems, sowie verschiedenen PCB-Einkoppelplatinen erbracht.

Im fünften Kapitel wird die Nachbildung von leitungsgebundenen Störpulsen unter Laborbedingungen erläutert, die aufgrund von feldgeführten UWB-Pulsen auf PCB-Leitungen

resultieren. Es werden hierzu zwei verschiedene Ansätze vorgestellt, diskutiert und bewertet, um die in Kapitel 3 definierten Testpulse zu erzeugen, wobei ein Ansatz eine vollkommen neue Herangehensweise zur Erzeugung von ultra breitbandigen Störpulsen beschreibt.

Für die Entwicklung von geeigneten Schutzstrategien gegen eingekoppelte UWB-Störungen wird im sechsten Kapitel zunächst das zeitliche Verhalten von ausgewählten nichtlinearen Schutzelementen bei Beaufschlagung mit eingekoppelten UWB-Störungen messtechnisch analysiert. Darauf aufbauend wird ein Verfahren zur Definition von Schutzkonzepten für elektronische Systeme gegen ultra breitbandige Einkopplungen vorgestellt. Darüber hinaus wird ein neues Verfahren erörtert, mit dem die Schutzwirkung von Schutzelementen quantitativ dargestellt werden kann. Abschließend wird eine Übersicht über UWB-Schutzmaßnahmen zur Härtung elektronischer Systeme gegen eingekoppelte UWB-Störungen erstellt.

Die Wirksamkeit der in Kapitel 6 vorgestellten Schutzkonzepte wird im siebenten Kapitel messtechnisch gezeigt. Dazu wird für eine Datenübertragungstrecke beispielhaft ein Schutzkonzept entworfen und anhand von UWB-Einkoppelmessungen dessen Wirksamkeit demonstriert.