

# Realisierung von einfachen Quellen zur Untersuchung der Störfestigkeit von IT-Netzwerken

B.Sc. Christian, Siebauer, christian@siebauer.com  
Dipl.-Ing. Tim, Peikert<sup>1</sup>, peikert@geml.uni-hannover.de  
Prof. Dr.-Ing. Heyno Garbe<sup>1</sup>, garbe@geml.uni-hannover.de  
Dr. Stefan Potthast<sup>2</sup>, stefanpotthast@bundeswehr.org

<sup>1</sup>Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Messtechnik, Leibniz Universität Hannover, Appelstr. 9a, 30167 Hannover, Deutschland

<sup>2</sup>Wehrwissenschaftliches Institut für Schutztechnologien – ABC-Schutz, Humboldtstraße 100, 29633 Munster, Deutschland

## 1. Allgemeiner Aufbau

In den letzten Jahrzehnten hat die technologische Entwicklung in der Gesellschaft enorme Fortschritte gemacht. Neben den zahlreichen Vorteilen, die diese Technologisierung bietet, steigt jedoch ebenfalls die Abhängigkeit von elektronischen Systemen. Eine Störung von IT-Systemen durch elektromagnetische Quellen kann daher schwere Folgen haben. Um das Risiko einer störenden Beeinflussung zu verringern ist es wichtig, die Empfindlichkeit elektronischer Systeme auf typische Störsignalformen zu testen. Neben den üblichen in der Normung benutzten Signalformen wie CW und dem gedämpften Sinus, werden breitbandige transiente Störimpulse immer interessanter. Handelsübliche Impulsgeneratoren liegen jedoch preislich im Bereich von mehreren Zehntausend Euros. Außerdem sei zu beachten dass solche Systeme zumeist nicht für den privaten Gebrauch gekauft werden können. Diese Arbeit beschäftigt sich daher damit, eine möglichst einfach zu realisierende und kostengünstige Breitband-Testquelle zu konstruieren. Diese soll helfen, eine schnelle Abschätzung durchführen zu können, wie gut die Störfestigkeit elektronischer Systeme gegenüber transientser Störeinkopplung ist.

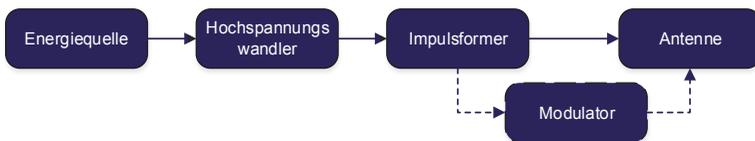


Abbildung 1: allgemeine Struktur von Quellen

Der prinzipielle Aufbau einer elektromagnetischen Quelle lässt sich in verschiedene Blöcke unterteilen und ist in Abbildung 1 dargestellt. Zunächst wird eine Energiequelle benötigt, welche die nachfolgenden Stufen versorgt. Der nächste Schritt dient der Umwandlung der Energiequellenspannung in eine Hochspannung. Diese wird anschließend im Impulsformer zunächst gesammelt und danach mit sehr hoher Spitzenleistung abgegeben. Die verwendete Impulsform, hängt von der, je nach Zielumgebung geforderten Bandbreite ab. Dem Impulsformer folgt oftmals ein Modulator. Dieser hat die Aufgabe den Sendeimpuls derart zu modulieren, dass sie einem bestimmten Sendeprotokoll entspricht. Dies kann genutzt werden um gezielt die Störanfälligkeit von Übertragungen zweier kommunizierender Systeme zu testen. Als letzte Stufe folgt die Abstrahlung des Testimpulses mittels einer oder mehrerer

angepasster Antennen. Hierbei ist es von hoher Bedeutung, dass die Antenne die geforderte Bandbreite, Richteigenschaft und Anpassung besitzt, damit ein hoher Anteil der erzeugten Energie ins Feld abgestrahlt wird.

## 2. Aufbau der Testquelle

Die nachfolgend erläuterte Testquelle ist batteriebetrieben und erzeugt einen Ausgangsimpuls von mehreren 10 kV. Die Impulsform ähnelt hierbei dem breitbandigen doppeltexponentiellen Impuls. Der prinzipielle Aufbau ist in Abbildung 2 dargestellt. Um aus der Batteriespannung die Hochspannung zu erzeugen, wird der Hochspannungswandler in drei Stufen unterteilt. Diese sind ein Sperrwandler, eine Villard-Kaskade und ein Marx-Generator. Die Gesamt-Spannungsverstärkung  $k_{ges}$  berechnet sich über die Multiplikation der einzelnen Stufen-Verstärkungen zu:

$$k_{ges} = k_{sperrwandler} * k_{villard} * k_{marx}$$

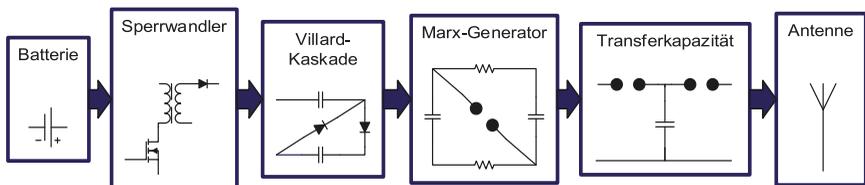


Abbildung 2: Blockschaltbild der Testquelle

Da die obere Grenzfrequenz des Impulses von der Anstiegszeit des Impulses abhängt, kann die Anstiegszeit optional durch eine Transferkapazität weiter verkürzt werden. Der Zusammenhang zwischen oberer Grenzfrequenz  $f_g$  und Anstiegszeit  $t_r$  ist nach [1] näherungsweise

$$f_g \cong \frac{0,34 \dots 0,45}{t_r}$$

Die Abstrahlung erfolgt über eine breitbandige Antenne, wie bspw. einem Hornstrahler.

### 2.1 Energieversorgung und Sperrwandler

Zur Energieversorgung der Testquelle wird eine Batterie mit 12 V Ausgangsspannung verwendet. Eine Versorgung durch das 230 V Spannungsnetz ist ebenfalls denkbar. Als Batterietyp eignen sich sowohl Blei-Akkus, als auch Lithium-Polymer-Akkus, da diese hohe Ausgangsströme liefern können. Letztere sind, aufgrund ihrer hohen Energiedichte und somit geringem Gewicht gut geeignet für mobile Testquellen.

Ein Sperrwandler ist ein Schaltnetzteil bei dem der Stromfluss durch den Primärkreis eines Transformators getaktet unterbrochen wird. In Abbildung 3 ist die, mit der Simulationssoftware LTSpice erstellte, PC-Simulations-Schaltung des Sperrwandlers und der Timerschaltung dargestellt. Die Primärwicklung des Transformators besitzt die Windungszahl  $N_1$  und die Sekundärwicklung die Windungszahl  $N_2$ . Während der durchgeschalteten Phase des Transistors liegt an der Primärwicklung die Spannung  $U_q$  an und der Strom durch die Primärwicklung steigt linear an. Da während dieser Phase die Diode  $D_1$  sperrt, kommt in der Sekundärwicklung kein Stromfluss zustande. Die eingebrachte Energie wird im Luftspalt des Transformators gespeichert, welcher daher auch als Speichertransformator bezeichnet wird [2].

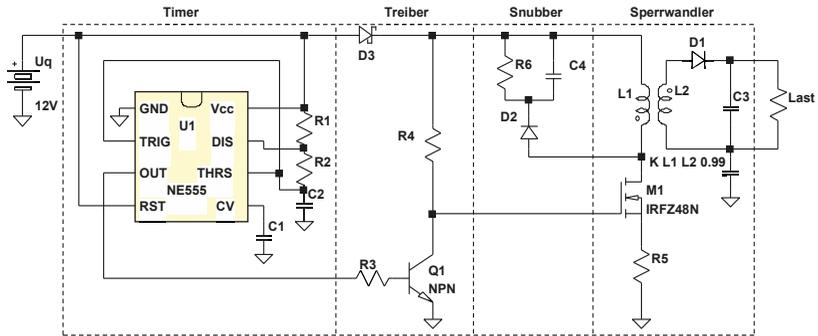


Abbildung 3: Simulationsmodell Sperrwandler

Während der Sperrphase des Transistors ist durch die Primärwicklung kein Stromfluss möglich, wodurch sich aufgrund des Induktionsgesetzes die Spannungen an den Transformatorwicklungen umpolen. Die Diode  $D_1$  befindet sich nun in Durchlassrichtung womit ein Stromfluss durch die Sekundärwicklung möglich wird und sich die im Transformator gespeicherte Energie abbaut. Der Mosfet  $M_1$ , wird mit dem Tastverhältnis  $\beta$  angesteuert. Die Ausgangsspannung  $U_a$  des Sperrwandlers berechnet sich nach [3] und [4] zu:

$$U_a = \frac{\beta}{1 - \beta} \cdot \frac{N_2}{N_1} \cdot U_q.$$

Die Erzeugung der Schaltfrequenz wird mit einer NE555-Timerschaltung realisiert. Um Spannungsspitzen abzuleiten, welche durch Streueffekte im Transformator auftreten, wird parallel zur Primärwicklung eine Entlastungsschaltung (Snubber-Schaltung) hinzugefügt. Damit die Batterie und die Timer-Schaltung vor Spannungsspitzen geschützt sind, empfiehlt es sich eine Schottky-Diode in Reihe zur Batterie einzusetzen und den NE555 mit einer separaten Batterie (z. B. 9-V-Block) zu betreiben.

## 2.2 Villard-Kaskade

Die Villard-Vervielfacherschaltung ist eine sogenannte Ladungspumpe und ermöglicht eine Verdopplung und Gleichrichtung einer angelegten Wechselspannung. Hierfür werden keine induktiven Bauteile benötigt [2] [5]. In Abbildung 4 ist eine LTSpice-Simulation der vier-stufigen Kaskadenschaltung der Testquelle dargestellt.

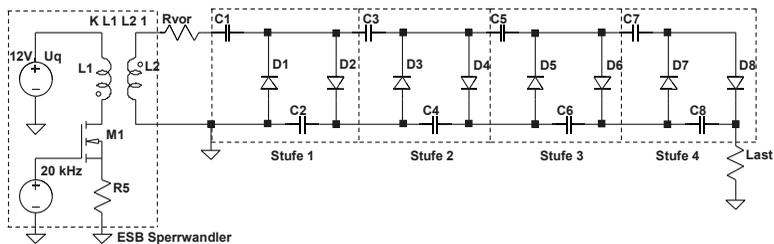


Abbildung 4: Simulationsmodell Villard-Kaskade

Das besondere an der Villard-Schaltung ist, dass durch Kaskadierung mehrerer dieser Schaltungen, die Ausgangsspannung theoretisch beliebig erhöht werden kann. Dies ist möglich, da an der Diode  $D_2$  eine pulsierende Gleichspannung anliegt. Diese dient wiederum als Eingangsspannung der nachfolgenden Verdopplerschaltung. Praktisch ist die maximale Spannungsverstärkung jedoch begrenzt. Eine Belastung am Ausgang führt zu einem Stromfluss durch die Kondensatoren und den Dioden. Dadurch treten Verluste auf, welche am Ausgang ein Sinken der Spannung und eine Restwelligkeit verursachen. Eine Formel zur Abschätzung der Spannungsverluste bietet Kronjäger [6], mit der Stufenanzahl  $n$ , der Kondensatorkapazität  $C$ , der Betriebsfrequenz  $f$  und dem Ausgangsstrom  $I$  an. Die Spannungsverluste lassen sich wie folgt berechnen:

$$\Delta U = \frac{I}{f \cdot C} \cdot \left( \frac{2}{3} n^3 + \frac{1}{2} n^2 - \frac{1}{6} n \right).$$

Hieraus wird ersichtlich, dass eine Erhöhung der Stufenanzahl ab einem gewissen Punkt nicht mehr zu einer Erhöhung der Ausgangsspannung führt und somit nicht sinnvoll ist. Weiterhin ist darauf zu achten, dass die verbauten Dioden für die verwendete Schaltfrequenz geeignet sind. In der Testquelle sollten daher hochspannungsfeste Schottky-Dioden verwendet werden.

### 2.3 Marx-Generator

Der Marx-Generator ist ein, 1923 von Erwin Otto Marx entwickelter, Impulsgenerator und besteht aus einer Kaskadierung mehrerer einstufiger Stoßspannungsgeneratoren. Der Schaltplan eines vier-stufigen Marx-Generators ist in Abbildung 5 dargestellt.

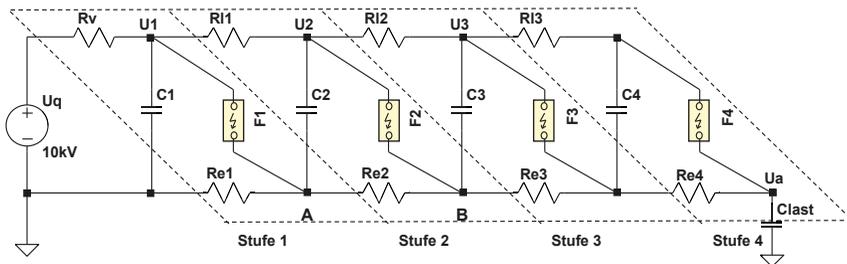


Abbildung 5: 4-stufiger Marx-Generator

Die Funktionsweise besteht darin, dass mehrere parallel geschalteter Hochspannungskondensatoren  $C_1$  bis  $C_4$  über die Ladewiderstände  $R_v$ ,  $R_i$  und  $R_e$ , zunächst auf eine gemeinsame Ladespannung geladen werden. Sobald ein bestimmter Spannungswert erreicht ist, werden die einzelnen Kondensatoren durch schnelle Leistungsschalter  $F_1$  bis  $F_4$  kurzzeitig in Reihe geschaltet, wodurch sich die resultierende Ausgangsspannung, je nach Stufenzahl, vervielfacht. Der hierbei entstehende Ausgangsimpuls entspricht einem doppeltexponentiellen Impuls. Sobald die Kondensatoren entladen sind, öffnet der Leistungsschalter wieder und der Ladevorgang findet erneut statt.

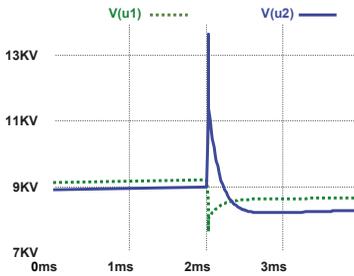


Abbildung 6: Marx-Impuls

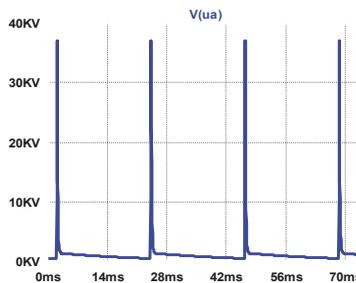


Abbildung 7: Marx-Ausgang

Als Leistungsschalter eignen sich besonders Funkenstrecken. Diese bestehen aus zwei gegenüberstehenden Elektroden mit einem Isolator dazwischen, bspw. Luft, an denen Spannung angelegt wird. Sobald die Spannungsdifferenz zwischen den Elektroden zu groß wird, kommt es zum Funkenüberschlag und die Funkenstrecke schließt. Die Zündspannung lässt sich über den Elektrodenabstand oder dem verwendeten Isolationsmaterial variieren. Als Alternative zur Funkenstrecke, können ebenfalls Gasentladungsröhren verwendet werden. Diese, eigentlich als Überspannungsschutz eingesetzten Bauelemente, bestehen aus einer gasgefüllten Keramik- oder Glasröhre und weisen eine kompakte Bauweise auf. Die Vorteile von Gasentladungsröhren, gegenüber der Realisierung durch zwei Kugel-Elektroden, sind der simple und sichere Einbau und die durch den Hersteller definierte Zündspannung. Problematisch bei der Verwendung von Gasentladungsröhren ist die geringe Stromstärke, bei dem diese wieder öffnen, da sich das ionisierte Gas im inneren des geschlossenen Gehäuses nicht verflüchtigen kann. Dies kann dazu führen dass die Gasentladungsröhre nach einmaligen Zünden geschlossen bleibt und der Marx-Generator somit nicht erneut geladen wird. Mittels eines zusätzlichen, in Reihe befindlichen Leistungsschalters, könnte der Ladestrom kurzzeitig unterbrochen werden. Da die verbauten Bauelemente einer gepulsten Belastung ausgesetzt werden, müssen diese eine hohe Pulsfestigkeit aufweisen. Daher wurden Keramik-Widerstände [7] und Keramik-Kondensatoren [8] eingesetzt. Um Energieverluste durch Corona-Effekte zu verringern, sollte bei Bau des Marx-Generators darauf geachtet werden, dass alle Lötstellen abgerundet sind und scharfe metallische Kanten vermieden werden. Außerdem empfiehlt es sich, den Marx-Generator in ein geeignetes Kunststoffgehäuse einzusetzen um die Gefahr vor versehentlichen Berühren zu vermindern.

## 2.4 Transferkapazität

Da die obere Grenzfrequenz des abgestrahlten Impulses von dessen Flankensteilheit abhängt, muss diese je nach Anwendungsbereich weiter erhöht werden. Einfluss auf die Flankensteilheit hat die Eigeninduktivität der kapazitiven Energiespeicher im Marx-Generator. Diese bewirkt, dass beim Schließen des Leistungsschalters, der Entladestrom nicht beliebig schnell ansteigen kann. Um diesem Effekt entgegenzuwirken werden Transferkapazitäten eingesetzt, welche eine geringere Eigeninduktivität besitzen. In Abbildung 8 ist die LTSpice-Simulation einer Schaltung dargestellt, welche Impulse mit steilerer Anstiegsflanke zu erzeugt [9]. Das Ersatzschaltbild des Marx-Generators besteht hierbei aus der Hochspannungsquelle  $U_q$ , der Stoßkapazität  $C_1$  mit der Serieninduktivität  $L_{ser1}$  und der Funkenstrecke  $F_1$ . Die Transferkapazität  $C_2$  besitzt ebenfalls eine Serieninduktivität  $L_{ser2}$ , wobei gilt,  $L_{ser1} > L_{ser2}$  und  $C_1 > C_2$ . Sobald der Marx-Generator

zündet, wird zunächst die Transferkapazität  $C_2$  über die beiden parasitären Induktivitäten  $L_{ser1}$  und  $L_{ser2}$  geladen. Wenn die Zündspannung der Funkenstrecke  $F_2$  erreicht ist, schließt diese und  $C_2$  wird über der Last entladen. Der Entladevorgang findet nur noch über der Induktivität  $L_{ser2}$  statt, wodurch eine steilere Anstiegsflanke möglich ist. In Abbildung 9 sind die Spannungsverläufe während eines Pulses dargestellt.

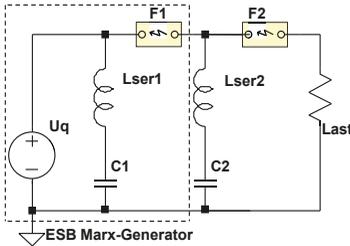


Abbildung 8: Transferkapazität

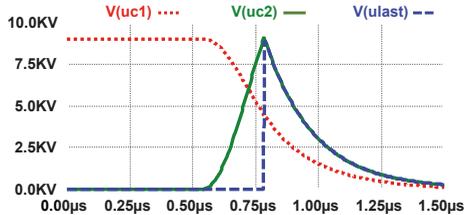


Abbildung 9: Transferkapazität Puls

Der für die Konstruktion notwendige niederinduktive Kondensator, kann mittels eines selbstgebauten Plattenkondensators realisiert werden. In Abbildung 10 ist der Aufbau eines Plattenkondensators mit fünf Leiterschichten dargestellt. Als Kondensatorplatten dienen Schichten aus Kupferfolie und als Isolator zwischen den Folien werden Kunststoffplatten verwendet. Die Kunststoffplatten haben die Dicke  $d$  und die relative Permittivität  $\epsilon_r$ . Die einzelnen Kupferfolien überlagern sich mit der Fläche  $A$ . Die Kapazität eines solchen Plattenkondensators mit  $n$  Kondensatorplatten lässt sich mit folgender Gleichung berechnen:

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A(n-1)}{d}$$

Damit die Transferkapazität mit nur einem Impuls auf die maximale Spannung geladen wird, muss diese kleiner sein, als die Kapazität des gezündeten Marx-Generators. Diese berechnet aufgrund der kurzzeitigen Reihenschaltung der Kondensatoren mit den Kapazitäten  $C_{stufe}$  und der Stufenzahl  $n$  zu:

$$C_{Marx} = \frac{C_{stufe}}{n}$$

Um einen elektrischen Durchschlag durch die Isolatoren zu vermeiden, wird ein Kunststoff mit ausreichend hoher Durchschlagsfestigkeit benötigt. Polystyrol-Platten haben eine Durchschlagsfestigkeit von 43 kV/mm bis 135 kV/mm mit einer relativen Permittivität von  $\epsilon_r=2,5$  [10] [11].

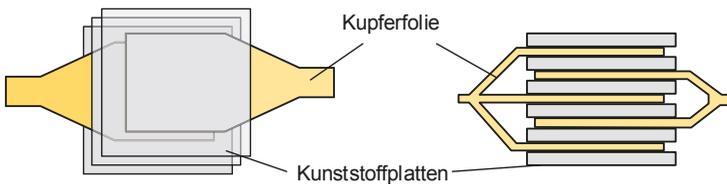


Abbildung 10: Kondensator Selbstbau

### 3. Vermessung des Systems

Das beschriebene System wurde im Labor ohne Transferkapazität aufgebaut und innerhalb einer GTEM-Zelle vermessen. Die in Abbildung 11 dargestellte Messung wurde mittels des Leistungs-Oszilloskop Infiniium 90000A DSO/DAS der Firma Agilent aufgezeichnet. Erkennbar ist die Ähnlichkeit zum Doppeltexponentiellen Impuls, siehe Abbildung 12.

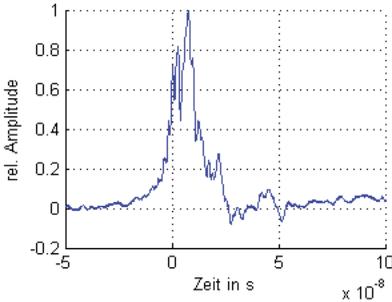


Abbildung 11: Messung Impuls

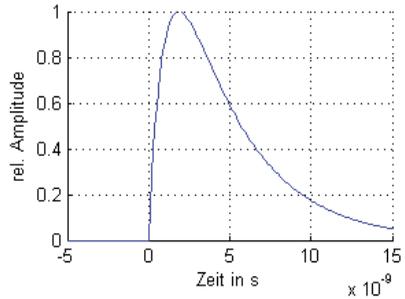


Abbildung 12: Doppeltexp. Impuls

Abbildung 13 zeigt das, mit dem Echtzeit-Spektrometer TDEMI 18 der Firma Gauss-Instruments, aufgezeichnete Spektrum mehrerer aufeinanderfolgender Pulse bis zu einer Frequenz von 160 MHz. In Abbildung 14 ist das Spektrum mehrerer Impulse bis zu einer Frequenz von 320 MHz abgebildet. In diesen wird das breitbandige Spektrum der Funkenentladung erkennbar. Als Wiederholrate der Quelle wurden etwa 16 Hz ermittelt.

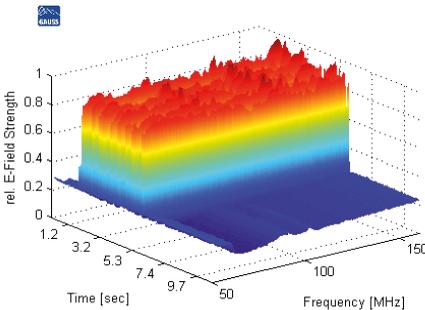


Abbildung 13: Echtzeitspektrum bis 160 MHz

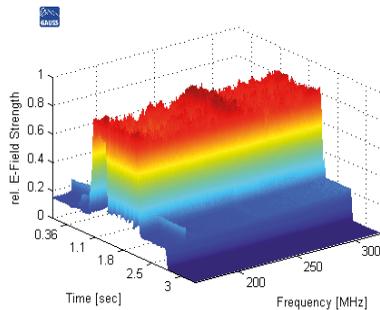


Abbildung 14: Echtzeitspektrum bis 320 MHz

### 4. Resümee

Im Labor eine leicht zu realisierende Testquelle gefertigt. Diese erzeugt einen breitbandigen, transienten, doppeltexponentiell-ähnlichen Impuls von mehreren zehntausend Volt. Durch Dimensionierung der einzelnen Hochspannungsstufen kann die Ausgangsspannung, die Impulsenergie und die Wiederholrate beeinflussen. Die für die Bauteile benötigten Kosten blieben dabei unter 1000 €, was deutlich macht, dass diese Quelle vor allem bei einem geringen Budget zweckmäßig ist. Die Testquelle ist somit

besonders geeignet für eine schnelle Abschätzung der Störfestigkeit von elektronischen Systemen gegenüber transienten Störungen.

## 5 Literaturverzeichnis

- [1] G.-H. Schild, Grundlagen der Impulstechnik, Stuttgart: Teubner, 1987.
- [2] H. Schmidt-Walter und R. Kories, Taschenbuch der Elektrotechnik, 10. Auflage, Europa Lehrmittel, 2013.
- [3] A. Mertens, *Leistungselektronik II*, IAL - Leibniz Universität Hannover, 2014.
- [4] U. Schlien, Schaltnetzteile und ihre Peripherie, 3. Auflage, Vieweg Praxiswissen, 2001.
- [5] U. Schlien, Schaltnetzteile und Ihre Peripherie: Dimensionierung, Einsatz, EMV, 4. Auflage, Vieweg + Teubner, 2009.
- [6] J. Kronjäger, Experimente mit Hochspannung, Franzis, 2000.
- [7] B. Blume, A. Albertsen und A. Mühlbauer, „Ohmsche Widerstände anwendungsbasiert auswählen,“ Vogel Business Media, 18.12.2007. [Online]. Available: <http://www.elektronikpraxis.vogel.de/passive/articles/100769/>. [Zugriff am 04.10.2014].
- [8] G. Guangyan, „Marx Generators,“ 2001. [Online]. Available: <http://www.loneoceans.com/labs/marx/>. [Zugriff am 04.10.2014].
- [9] A. Küchler, Hochspannungstechnik: Grundlagen - Technologie - Anwendungen, 3. Auflage, Springer-Verlag, 2009.
- [10] „Durchschlagsfestigkeit,“ 19.09.2014. [Online]. Available: <http://de.wikipedia.org/wiki/Durchschlagsfestigkeit#Materialwerte>. [Zugriff am 14.10.2014].
- [11] Kern-GmbH, *Datenblatt - Polystyrol (PS)*.