

Charakterisierung und systematische Bewertung von externen ESD Schutzelementen

Yiqun Cao, Infineon Technologies AG, IFAG ATV PTP TSP, Neubiberg
Bastian Arndt, Continental Automotive GmbH, Regensburg
Friedrich zur Nieden, Frank Kremer, TU Dortmund, Dortmund
Dr. Matthias Stecher, Infineon Technologies AG, Neubiberg
Prof. Dr. Stephan Frei, TU Dortmund, Dortmund

1 Kurzfassung

Externe Schutzelemente werden häufig verwendet, um auf einer Platine verbaute Halbleiterbauelemente gegen ESD-Belastung zu schützen. Verschiedene Bauelemente kommen für Schutzaufgaben in Frage und werden von den jeweiligen Herstellern für den ESD-Schutz beworben. Oftmals wird nicht die gewünschte Wirkung erzielt. Im Rahmen dieser Arbeit wurden spezielle, ESD-Messtechniken zum systematischen Vergleich der verschiedenen Typen von Schutzelementen wie z.B. Varistoren, TVS Dioden, Gasableiter und leitfähige Polymere, aber auch Widerständen und Kondensatoren, entwickelt. Diese Verfahren können universell für die Bauelementecharakterisierung eingesetzt werden und liefern aussagekräftige und vergleichbare Kennwerte. Von zentraler Bedeutung für Untersuchungen ist ein neu entwickeltes TLP-System, das sich als wichtiges und universelles Messmittel erwies, um ESD Schutzelementen zu charakterisieren und deren Wirkung zu verifizieren. Neben TLP-Untersuchungen wurden Messungen mit IEC 61000-4-2 ESD Generatoren durchgeführt und das Verhalten der Schutzelemente mit diesen praxisnahen und genormten Pulsen untersucht. Die Charakterisierung im Frequenzbereich mit Hilfe von S11 Messungen ist weiterhin erforderlich, um Kapazitäten und Induktivitäten der Bauelemente zu bestimmen. Aus den Ergebnissen kann gefolgert werden, dass Varistoren und TVS-Dioden einen recht effektiven ESD Schutz bieten können, während die Gasableiter und Polymere wegen zu hohen Durchbruchspannungen nur in Sonderfällen wirksam sein können. Ein systematischer Vergleich der ESD-Wirksamkeit ist möglich und es kann schnell entschieden werden, welche Schutzkomponenten für ein zu schützendes System in Frage kommen. Ein weiteres wichtiges Anwendungsgebiet für die Daten ist die Parametrierung von Modellen der Schutzelemente für Simulationen, darauf wird in diesem Beitrag jedoch nicht näher eingegangen.

2 Einleitung

ESD-Prüfungen auf Systemebene nach IEC 61000-4-2 oder ISO 10605 [1,2] spielen heute eine wichtige Rolle im Freigabeprozess von elektrischen Komponenten und Systemen. Um die ESD-Spezifikationen für das Gesamtsystems einzuhalten, sind externe Schutzelemente oft erforderlich, die integrierten Schaltungen mit geringfügigem On-Chip ESD-Schutz gegen Beschädigung abzusichern. Auch wenn Schutzelemente oft als sehr uneingeschränkt wirkungsvoll von den Herstellern beworben werden, muss der Anwender häufig in der Praxis feststellen, dass ein Schutzelement nicht die erwünschte und angekündigte Wirkung zeigt. Die ESD-Prüfung wird trotz zusätzlichem Schutzelement nicht bestanden. Dabei sind die Angaben von Herstellern für Schutzelemente nicht grundsätzlich falsch. Die Messbedingungen sind jedoch nicht spezifiziert und unterschiedliche zu schützende Komponenten und Sys-

temumgebungen führen zu unterschiedlichen Ergebnissen. Ein universelles Verfahren zur Charakterisierung und Bewertung von Schutzelementen muss diese Problematik berücksichtigen. Um den Entwurf eines ESD-Schutzes von Systemen einfacher und zuverlässiger zu gestalten, ist es notwendig, das statische und dynamische Verhalten von Schutzelementen genau zu kennen. In Datenblättern der Hersteller finden sich meist nur Informationen zu Durchbruchspannungen oder maximalen Strömen bei Anwendung gegen IEC 61000-4-5-Pulse (8/20 μ s) [3]. Die Messbedingungen und Impedanzverhältnisse bleiben unklar. Im Rahmen dieser Arbeit wurden spezielle, ESD-orientierte Messtechniken zur Charakterisierung und zum Vergleich verschiedener Schutzelemente entwickelt. Die erzeugten Daten sind so aussagekräftig, dass sie auch für die Modellbildung herangezogen werden können. Varistoren, TVS Dioden, Gasableiter und leitfähige Polymeren aber auch Widerstände und Kondensatoren wurden berücksichtigt. Das entwickelte Verfahren kann universell für die Bauelementecharakterisierung eingesetzt werden und liefert aussagekräftige sowie vergleichbare Kennwerte.

3 Messtechnik

3.1 Hochstrom-Charakterisierung mit TLP

3.1.1 Aufbau des Hochstrom-TLPs

TLP (Transmission-Line-Pulser) [4] sowie vf (very fast)-TLP erwiesen sich als sehr aussagekräftige und wichtige Messmittel, um ESD Schutzelementen zu charakterisieren und deren Schutzwirkung zu verifizieren. Wie in [5,6] gezeigt, sind TLPs für die Untersuchung von Schutzstrukturen geeignet. Sowohl die sehr gut einstellbare Pulsenergie, als auch die einfach zu messenden transienten Spannungs- und Stromkurven dienen dazu, dass die Eigenschaften der Schutzelemente bezüglich ESD sehr gut beschrieben werden können. Die Pulsbreite kann für die Charakterisierung so kurz gewählt werden, dass die Bauteile durch die thermische Belastung auch bei hohen Spannungen nicht zerstört werden. Somit ist es möglich, die statischen V/I-Kennlinien selbst in sehr hohen Strom- und Spannungsbereichen zu bestimmen. Darüber hinaus kann die Anstiegszeit der Pulse auch variiert werden, so dass die Reaktionen der Bauelemente gegen unterschiedliche ESD-Entladungen bestimmt werden kann.

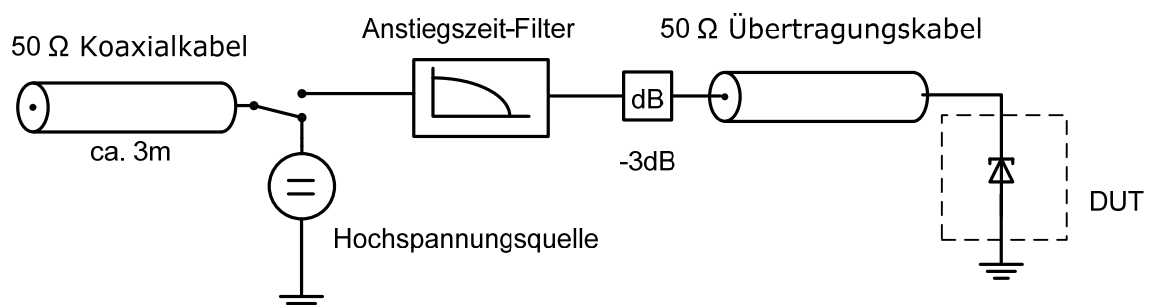


Abbildung 1: Vereinfachtes Blockdiagramm der Hochstrom-TLP

Externe Bauelemente als der primäre ESD-Schutz verhalten sich meist wesentlich robuster gegen ESD im Vergleich zu integrierten ESD-Schutzstrukturen. Übliche ESD Generatoren liefern eine Ladespannung bis zu 30 kV, so dass die initiale Strom-

spitze über 100 A erreichen kann. Aus diesen Gründen war es sinnvoll, das Standard TLP-System auf eine Hochstrom-Version zu modifizieren, um Bauteile auch im höheren Strombereich charakterisieren zu können. In dem hier verwendeten Aufbau (Abbildung 1) wurde nur ein 3 dB-Abschwächer eingesetzt um die reflektierte Wellen wegen Fehlanpassung innerhalb des TLP-Systems zu unterdrücken. Der Hochspannungsschalter in dem TLP funktioniert bis zu 4 kV, damit kann der maximale Strom durch den Prüfling (DUT) $(4 \text{ kV}/50 \Omega) \cdot 0.708 = 56.6 \text{ A}$ betragen, wenn das DUT ein Kurzschluss ist. Um die Pulsenergie vergleichbar mit der nach IEC 61000-4-2 einzustellen, wurde ein ca. 3 m langes Ladekabel, das zu einer entsprechenden Pulsbreite von 30 ns führt, genutzt. Darüber hinaus wurde ein 1 ns Anstiegszeit-Filter [7] für die meisten Messungen eingesetzt. Dies korrespondiert auch mit der Anstiegszeit von IEC-Generatoren im Kontaktentlademodus.

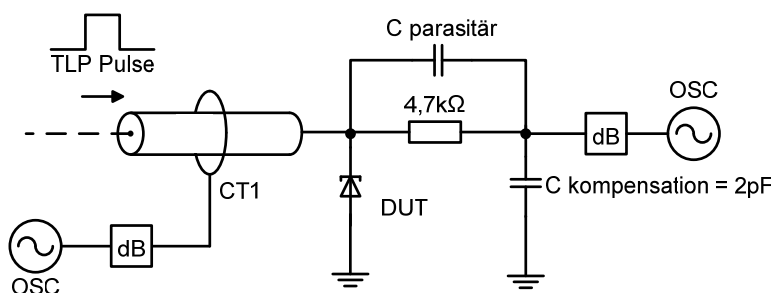


Abbildung 2: Konfiguration für die Messung von Strom und Spannung

Abbildung 2 zeigt das Prinzip der Strom- und Spannungsmessung. Der Stromsensor CT1 von Tektronix bietet eine ausreichende Messbandbreite und Dynamik auch für Pulse mit hoher Amplitude. In den Messergebnissen war, solange der Strom den Ferritkern des Sensors nicht in die Sättigung trieb, keine Verzerrung der Pulsform zu sehen. Der Sensor CT1 arbeitet zuverlässig für den TLP-Aufbau mit 1 ns Anstiegszeit, 30 ns Pulsbreite und einer maximalen Stromamplitude von 60 A. Andererseits wurde die Spannungsmessung mit einem RC-Netzwerk realisiert. Der hochohmige Widerstand (4,7 kΩ) verhindert den unerwünschten Strompfad parallel zum DUT. Der zusätzliche Kondensator (2 pF) dient dazu, dass die negative Auswirkung der parasitären Kapazität des Widerstands sich kompensieren lässt. Das in Gleichung 1 beschriebene Verhältnis erlaubt eine Messung auch von höheren Spannungen.

$$C_{\text{parasitär}} / C_{\text{kompensation}} = R_{\text{Messgerät}} / R_{\text{längs}} = 50 \Omega / 4,7 \text{ k}\Omega = 1/95 \quad (1)$$

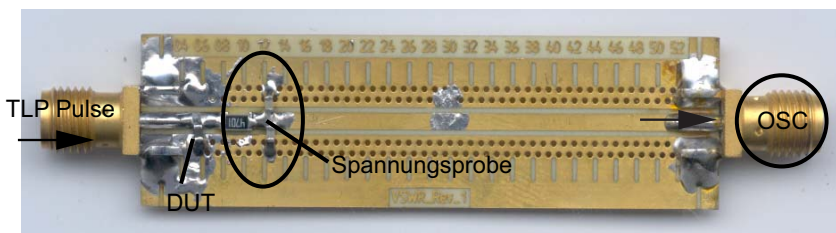


Abbildung 3: Testplatine für die Charakterisierung der externen Schutzelementen

Durch S-Parameter Messungen wurde die Messbandbreite von ca. 4,4 GHz bestimmt. Abb. 3 zeigt das Foto der Testplatine wo das RC-Netzwerk zur Spannungsmessung integriert ist. Die Kompensationskapazität wurde mit zwei 1 pF SMD Kondensatoren realisiert. Das Hochstrom-TLP wurde mittels eines 25 Ω Widerstands ka-

libriert. Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse der Kalibrierung und die Einstellung der Fenster für die Aufnahme der V/I Kennlinien.

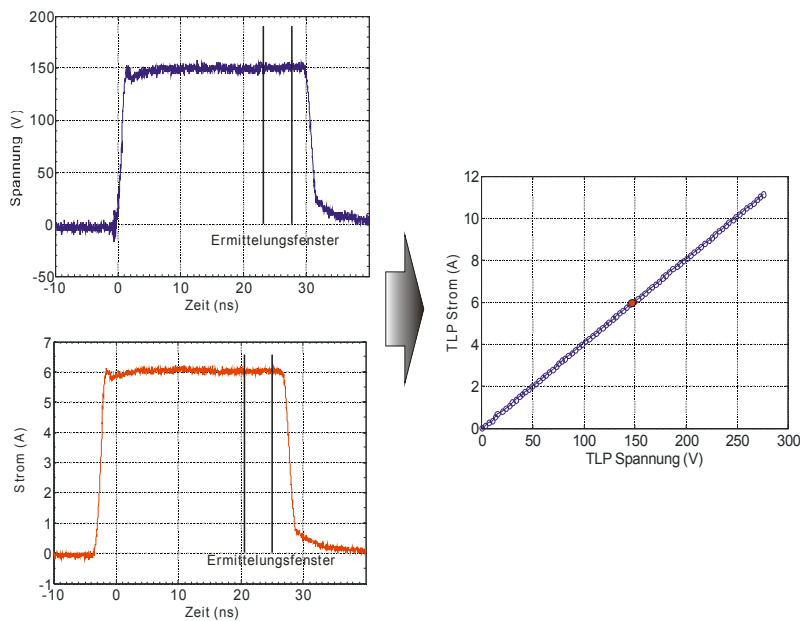


Abbildung 4: TLP Ergebnisse für die Kalibrierung mit einem 25 Ω Widerstand

3.1.2 Charakterisierungen der Schutzelementen mit TLP

In Rahmen der Arbeit wurden verschiedene Varistoren, TVS-Dioden sowie Gasableiter und Polymere mit dem TLP charakterisiert. Die Eigenschaften der Widerstände und Kondensatoren ändern sich kaum, auch wenn die Ströme höher sind. Daher sind diese beiden auch im Hochstrombereich noch linearen Elemente nicht mit dem TLP intensiver untersucht worden. Alle anderen Bauelemente wurden bis zu etwa 60 A charakterisiert.

3.1.2.1 Varistoren

Bei einem Varistor handelt es sich um ein Bauelement, das spannungsabhängig seinen Widerstand ändert, und sich zum Schutz gegen Überspannungen eignet.

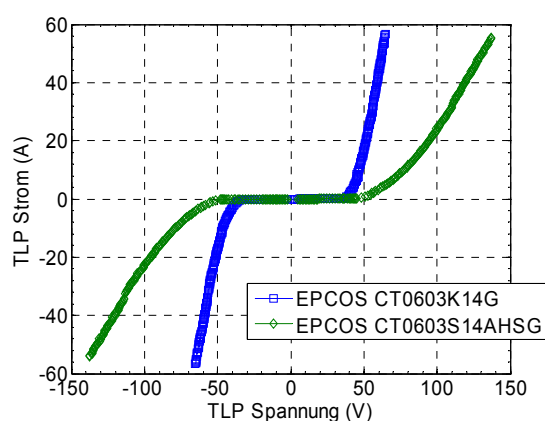


Abbildung 5: V/I Charakteristiken von Varistoren im Hochstrom-Bereich

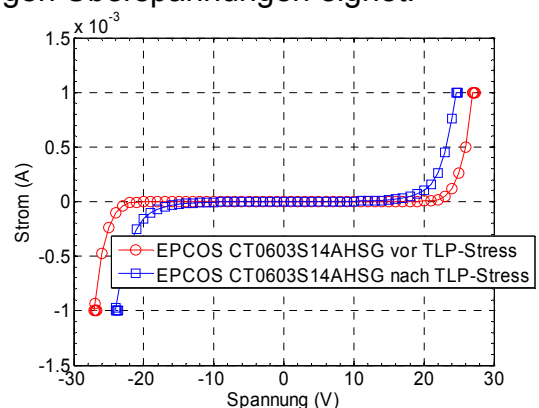


Abbildung 6: DC-Charakteristiken von dem Varistor CT0603S14AHSG vor und nach TLP- Belastung

In der Arbeit wurden zwei Varistoren von EPCOS CT0603K14G und CT0603S14AHSG mit dem TLP charakterisiert. Die V/I-Kurven sind in Abbildung 5 dargestellt. Ein symmetrisches Verhalten der beiden Bauteile konnte gezeigt werden.

Obwohl die Triggerspannungen fast identisch sind, zeigen beide Elemente ein sehr unterschiedliches Verhalten. Diese sehr wichtige Information wird normalerweise in den Datenblättern nicht gegeben. Außerdem ist es zu beachten, dass sich die Durchbruchspannungen der beiden Varistoren nach der ESD-Belastung geändert haben. In Abbildung 6 wird dies anhand des Bauelements CT0603S14AHSG dargestellt. Das Phänomen wurde auch in [8] beschrieben.

Die TLP-Untersuchungen liefern nicht nur die statische V/I-Kurven der Bauteile sondern erlauben auch, das dynamische Verhalten zu bestimmen. Um die Antworten der Varistoren auf die TLP-Anregung detailliert zu analysieren, wurden die TLP-Messungen mit verschiedenen Pulsanstiegszeiten (t_r) durchgeführt. Abbildung 7 zeigt die Unterschiede in der Spannungsform des CT0603K14G bei unterschiedlichen Anstiegszeiten. Die Spannungsspitze am Anfang wird zumindest teilweise von den parasitären Induktivitäten verursacht, so dass die Spannungsamplituden nicht bei 50 V liegen sondern über 90 V ansteigen können. Dieser Effekt muss berücksichtigt werden, falls die zu schützenden Bauelemente sehr empfindlich gegen Spannungsspitzen sind.

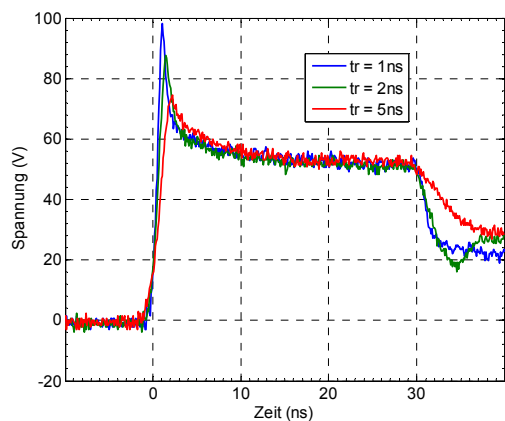


Abbildung 7: Spannungsform ($I=20A$) von CT0603K14G in Abhängigkeit von Anstiegszeiten

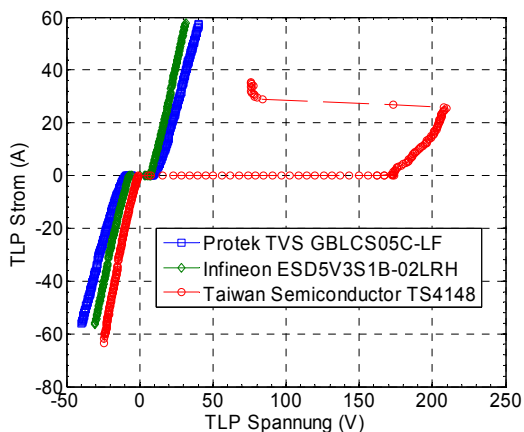


Abbildung 8: V/I Charakteristiken von TVS-Dioden im Hochstrom-Bereich

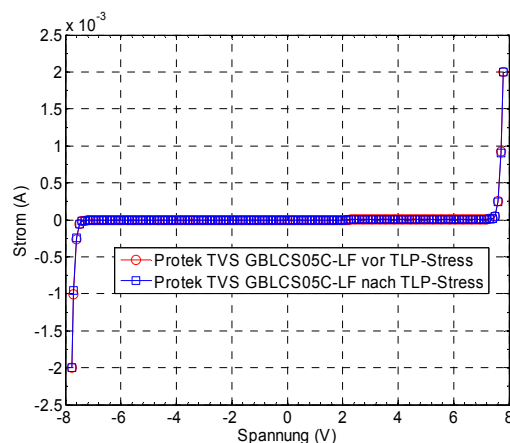


Abbildung 9: DC-Charakteristiken von GBLCS05C-LF bevor und nach TLP-Belastung

3.1.2.2 TVS-Dioden

TVS-Dioden leiten üblicherweise mit Hilfe ihrer robusten PN-Übergänge ESD-Ströme ab. Spezielle Dotierungsprofile sowie Zener- oder Avalanche-Durchbruch werden verwendet, um verschiedenen Durchbruchspannungen einzustellen. Abbildung 8

zeigt die V/I Kennlinien der untersuchten TVS-Dioden zusammen mit den Kennlinien von unipolaren und bipolaren Dioden. Anderes als bei Varistoren zeigt die TVS-Diode (GBLCS05C-LF) keine Verhaltensänderung nach der TLP-Belastung (Abbildung 9). Die dynamische Charakteristik der TVS-Diode ist in Abbildung 10 gezeigt. Im Vergleich zum Varistor CT0603K14G zeigt Diode eine noch stärkere Abhängigkeit von den Anstiegszeiten der Pulse. Bei 1 ns Anstiegszeit ist die Spannungsüberhöhung an der Diode sogar noch größer.

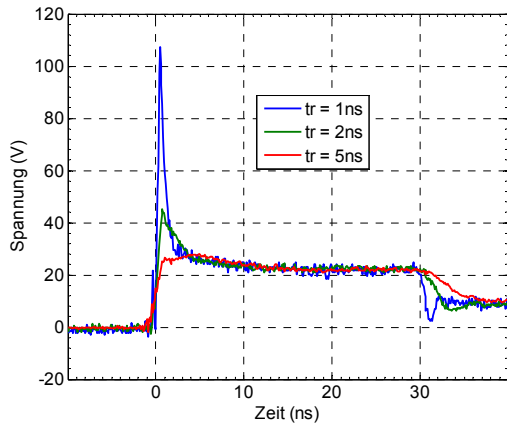


Abbildung 10: Spannungsform (I=20A) von GBLCS05C-LF in Abhängigkeit von Anstiegszeiten

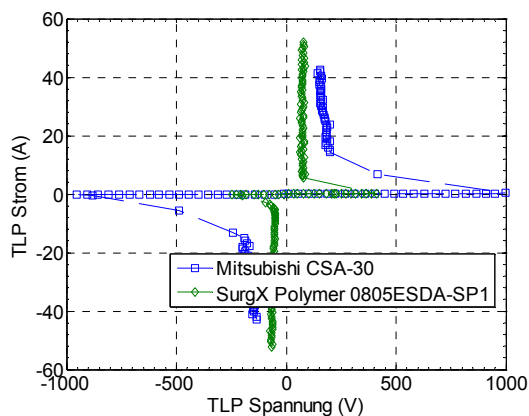


Abbildung 11: V/I Charakteristiken von dem Gasableiter und leitfähigen Polymer im Hochstrom-Bereich

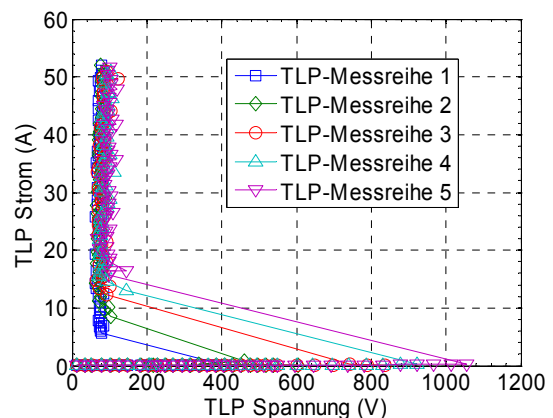


Abbildung 12: Durchbruchspannungen in Abhängigkeit von der TLP-Messreihe des Polymers SurgX 0805ESDA-SP1

3.1.2.3 Gasableiter und leitfähige Polymere

Als weitere Schutzelemente wurden ein Gasableiter, Mitsubishi CSA-30, und ein spannungsabhängiges Polymerbauelement, SurgX 0805ESDA-SP1, ausgewählt. Beide Bauelemente zeigen einen Snapback-Effekt und sehr hohe Durchbruchspannungen (Abbildung 11). Daher waren vollständige DC-Charakterisierungen wegen der Einschränkungen durch den verwendeten TLP nicht möglich. Es zeigte sich, dass die Durchbruchspannung des Polymers nach jeder TLP-Messreihe angestiegen ist (Abbildung 12). Der Leckstrom und die Haltspannung haben sich aber nicht geändert.

3.2 Charakterisierung mit IEC Generatoren

Neben den TLP-Untersuchungen wurden auch Messungen mit IEC 61000-4-2 ESD-Generatoren durchgeführt und das Verhalten der Schutzelemente mit diesen praxisnahen Pulsen näher untersucht. Um die ESD Wirksamkeit der Schutzkonzepte zu klassifizieren, wurden definierte Lasten parallel zu den Schutzelementen geschaltet. Da die Impedanzverhältnisse von IC-Ein- und Ausgängen sehr variieren können, wurden Untersuchungen mit 10 Ω , 25 Ω und 2 k Ω Widerständen als einfache Abschlussbeschaltungen durchgeführt. In Abbildung 13 sind beispielsweise die Spannungsüberschwingungen von sämtlichen getesteten Schutzelementen in Abhängigkeit von Ladespannungen dargestellt. In den ESD Tests wurde an das jeweilige Bauteil parallel ein 25 Ω Widerstand angeschlossen. Die Schutzwirkungen gegen ESD von verschiedenen Elementen können damit leicht beurteilt werden. Die Ergebnisse aus den TLP-Messungen werden bestätigt.

Typ	Bezeichnung	Parasitäre Parameter	
		C	L
Widerstand	EPCOS 1k Ω 0805	5pF	4,0nH
Kondensator	EPCOS 10nF 0805 X7R		1,2nH
Varistor	EPCOS CT0603K14G	155pF	2,0nH
	EPCOS CT0603S14AHSG	18pF	2,0nH
TVS Diode	Protek TVS GB LCS05C-LF	1,2pF	1,8nH
	Taiwan Semiconductor TS4148	750fF	n. s.
Gasableiter	Mitsubishi CSA-30	100fF	1,8nH
	SurgX 0805 ESDA-SPI	100fF	n. s.
	Tyco PESD0603-140	200fF	n. s.

Tabelle 1: Parasitäre Kapazitäten und Induktivitäten von verschiedenen Schutzelementen

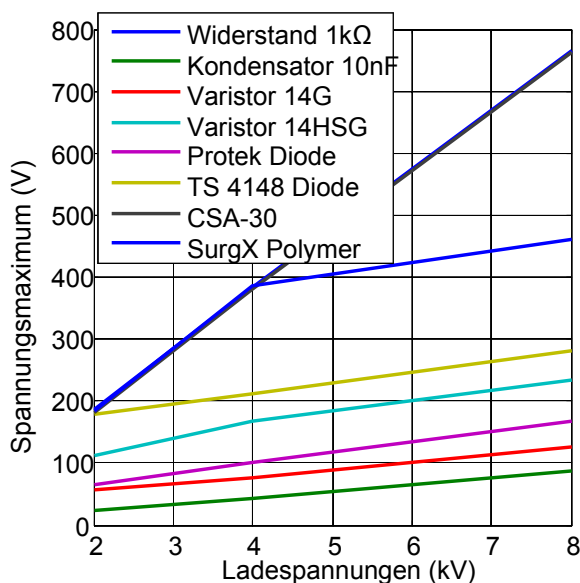


Abbildung 13: Spannungsüberschwingungen in Abhängigkeit von der Ladespannung bei ESD-Prüfungen an 25 Ω Impedanz

3.3 Charakterisierung der Betriebsparameter mit dem Network-Analyzer

Eine Charakterisierung der Eigenschaften im Normalbetrieb ist es erforderlich, die Kapazitäten und Induktivitäten der Bauelemente zu bestimmen. Mit Hilfe von S11-Messungen mit einem Network-Analyzer wurden diese Werte für typische Bauelemente ermittelt und in Tabelle 1 zusammengestellt.

4 Zusammenfassung

Aus den TLP-Messergebnissen ist abzulesen, dass die meisten Varistoren und TVS-Dioden einen recht effektiven ESD Schutz bieten können, während die Gasableiter und spannungsvariable Polymere wegen zu hohen Durchbruchspannungen (>200 V) die Schutzanforderungen der Praxis kaum erfüllen können. Die V/I Kennlinien, die auch das Snapback-Verhalten, wenn vorhanden, wiedergeben, erlauben die eindeutige Charakterisierung der Bauelemente. Für die Beurteilung des dynamischen Verhaltens sind weiterhin die Spannungsspitzen im Verhältnis zu den Anstiegszeiten der applizierten Prüfpulse zu beachten.

Die Wirksamkeit der ESD-Schutzelemente hinsichtlich der maximal auftretenden Spannungen bei IEC-ESD-Entladungen ist dargestellt. Ein Vergleich von verschiedenen Schutzkonzepten an einer 25 Ohm Impedanz in Abhängigkeit von der Ladespannung des ESD Generators wird gezeigt. Die relevanten Eckdaten für 9 wichtige ESD-Schutzelemente werden tabellarisch gegenübergestellt.

Mit den gezeigten Daten zu der ESD-Wirksamkeit kann schnell entschieden werden, welche Schutzkomponenten für ein zu schützendes System in Frage kommen. Ein weiteres Anwendungsgebiet für die Daten ist die Modellierung der Schutzelemente für Simulationen.

Literatur

- [1] IEC 61000-4-2 ed. 2 CD: Electromagnetic Compatibility (EMC) Part 4: Testing and measurement techniques – Section 2: Electrostatic discharge immunity test, 2007
- [2] ISO 10605 CDV for 2nd ed.: Road vehicles - Electrical disturbances from electrostatic discharges
- [3] IEC 61000-4-5: Electromagnetic Compatibility (EMC) Part 4: Testing and measurement techniques – Section 5: Surge immunity test
- [4] T. Maloney, N. Khuarana, "Transmission Line Pulse Technique for Circuit Modeling and ESD Phenomena", in Proc. of the EOS/ESD Symp. 1985, pp. 49-54
- [5] K. Shrier, T. Truong and J. Felps, "Transmission Line Pulse Test Methods, Test Techniques and Characterization of Low Capacitance Voltage Suppression Device for System Level Electrostatic Discharge Compliance", in Proc. of the EOS/ESD Symp. 2004
- [6] R. Ashton, L. Lescouzeres, "Characterization of Off Chip ESD Protection Devices", in Proc. of the EOS/ESD Symp. 2008
- [7] Y.Cao, W.Simbürger and D. Johnsson, "Rise-Time Filter for Transmission-Line Pulse Measurement Systems" in German Microwave Conference IEEE, 16-18 March 2009
- [8] http://www.joinset.com/catalog/s28-35_whatvaristor.pdf