

Abhängigkeit der Pulsfestigkeitsergebnisse von Kfz-Komponenten von den verwendeten Testpulsgeneratoren

Dr. Bernd Deutschmann, Infineon Technologies, Automotive Power EMC Center, München, Germany

Dr. Frank Klotz, Infineon Technologies, Automotive Power EMC Center, München, Germany

Arnaud Wahl, Infineon Technologies, Automotive Power EMC Center, München, Germany

1. Einleitung

Eine Vielzahl von elektronischen Steuergeräten mit komplexen integrierten Schaltkreisen soll sicherstellen, dass unsere modernen Kraftfahrzeuge komfortabler, umweltfreundlicher und vor allem sicherer werden. Die Grundvoraussetzung dafür ist allerdings, dass sich empfindliche Sensor- und Kommunikationselektroniken sowie komplexe Leistungsschalter in Geräten, wie z.B. Motorsteuerung, Antiblockiersystem, Navigationssystem, Abstandskontrollsystem, Airbagsteuerung etc. nicht in ihrer Funktionsweise beeinflussen lassen.

Von entscheidender Bedeutung ist in diesem Zusammenhang die Robustheit dieser Steuergeräte gegenüber transienten Störungen (Über- oder Unterspannungen), die z.B. durch diverse Schaltvorgänge im verteilten Leitungsnetz erzeugt werden können. Repräsentative transiente Testpulse für 12V und 24V Bordnetze sind in der ISO7637 sowie ISO 16750 standardisiert [1], [2]. Seit 2011 gibt es eine neue Ausgabe der ISO7637-2 (3rd Edition 2011), in der ein deutlicher Anstieg der Testanforderungen (Prüfpulsamplituden / Testlevels) festgelegt ist. Daraus hat sich die Notwendigkeit abgeleitet, die resultierenden höheren transienten Belastungen für die Automobilelektronik genau zu analysieren, um mögliche neue Fehlermechanismen zu erkennen und diese bei der Entwicklung geeigneter Maßnahmen zu vermeiden bzw. zu minimieren [3].

2 Problemstellung

Im Zusammenhang mit dieser Analyse wurden signifikante Abhängigkeiten der Messergebnisse von den verschiedenen Testpulsgeneratoren festgestellt und daraufhin genauer untersucht. Bei der Untersuchung der Triggerschwellen von Schutz- und Diagnosefunktionen elektronischer Schaltungen haben sich generatorabhängig teilweise erhebliche Unterschiede im Ergebnis ein- und desselben Prüflings eingestellt.

So hat z.B. der Prüfling in einem EMV-Labor die Prüfung mit Testpulse 2a ohne Probleme bis zur maximalen Prüfpulsamplituden von 112V bestanden, in einem anderen EMV Labor, welches einen anderen Generator zur Erzeugung des Testpulses 2a verwendet, aber schon bei eine Pulsamplitude von 20V einen Ausfall gezeigt.

2.1 Rundversuch zur Generatorverifikation

Die Häufung solcher Beobachtungen hat schließlich dazu geführt, einen Rundversuch mit Laboren von Fahrzeugherstellern, Elektronikzulieferern und Pulsgeneratorherstellern über den DKE Arbeitskreis Pulsstörfestigkeit zu starten, um die Bandbreite der Ergebnisstreuungen zu erfassen, den technischen Hintergrund der Abhängigkeiten zu analysieren und Vorschläge zu erarbeiten die Standardisierung zu erweitern.

Bei dieser Generatorverifikation wurden die Messergebnisse von insgesamt 16 Pulsgeneratoren der am Rundversuch beteiligten Labore ausgewertet, gegenübergestellt und statistisch erfasst. Der Schwerpunkt der Analysen lag dabei auf der Untersuchung der Testpulse 1 und 2a, sowie deren Abhängigkeiten von verschiedenen Belastungen.

2.1.1 Standardisierte Pulsverifikation nach ISO 7637

Alle Untersuchungen basierten auf der im Standard vorgeschriebenen Generatorverifikation mittels Messung der Pulsspannung, wie sie im Bild 1 schematisch dargestellt ist. Die Verifikation erfolgte mit unbelastetem und mit belastetem Generator, wobei dem Standard entsprechend ein rein ohmscher Lastwiderstand R_L , der dem Generatorinnenwiderstand R_i entspricht, verwendet werden soll.

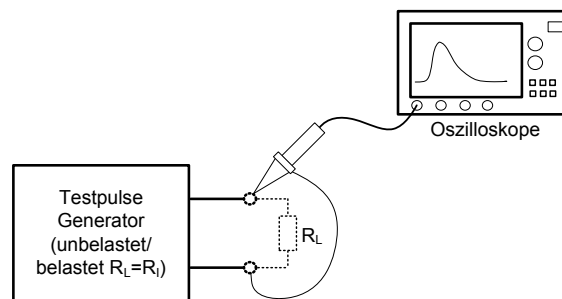


Bild 1: Beispiel des im ISO 7637 beschriebenen Setups zur Generatorverifikation

Der Standard fordert unter diesen Testbedingungen die Einhaltung der Pulsparameter wie sie in der Tabelle 1 für die beiden angesprochenen Testpulse dargestellt ist. Daraus ergibt sich, dass im unbelasteten Fall eine Toleranz der Pulsamplitude von $\pm 10\%$ und der Pulsdauer von $\pm 20\%$ zulässig ist. Im belasteten Fall sind dagegen $\pm 20\%$ Pulsamplitude und $\pm 20\%$ Pulsdauer erlaubt.

		Pulsamplitude U_s	Anstiegszeit t_r	Pulsdauer t_d
Testpuls 1	unbelastet	- 100 V (± 10 V)	1 μ s (+ 0, - 0.5 μ s)	2 ms (± 0.4 ms)
	belastet ($R_L = R_i = 10 \Omega$)	- 50 V (± 10 V)	-	1.5 ms (± 0.3 ms)
Testpuls 2a	unbelastet	+ 75 V (± 7.5 V)	1 μ s (+ 0, - 0.5 μ s)	50 μ s (± 10 μ s)
	belastet ($R_L = R_i = 2 \Omega$)	- 37.5 V (± 7.5 V)	-	12 μ s (± 2.4 μ s)

Tabelle 1: Verifikationsanforderungen nach ISO 7637 für Testpuls 1 und Testpuls 2a

Die sich daraus ergebenden theoretischen Abweichungen der Pulsparameter (allen voran der Pulsleistung und Energie) zwischen den erlaubten Testergebnissen wird in Tabelle 2, an Hand des Testpulses 1 für eine Pulsamplitude von $U_S = -100\text{ V}$ und einem Lastwiderstand vom $R_L = 10\ \Omega$, gezeigt.

	Im Standard definierte max. Abweichung		Normpuls	Zulässiges Testergebnis		Unterschied zwischen den zulässigen min. und max. Testergebnissen
	min	Max		min	Max	
Pulsamplitude $U_S = -100\text{ V}$	- 20 %	20 %	- 50 V	- 40 V	- 60 V	50 %
Pulsstrom I_S	-	-	5 A	- 4 A	- 6 A	50 %
Pulsdauer t_d	- 20 %	20 %	1.5 ms	1.2 ms	1.8 ms	50 %
Pulsleistung P_S	-	-	250 W	160 W	360 W	125 %
Pulsenergie E_S	-	-	108.7 mJ	41.7 mJ	141 mJ	238 %

Tabelle 2: Toleranzbetrachtung der Verifikation anhand von Testpuls 1 mit $U_S = -100\text{ V}$ und $R_L = 10\ \Omega$

Wie aus der Tabelle zu sehen ist, ergeben sich speziell für die Pulsleistung und Energie doch erheblich große Unterschiede in den zulässigen minimalen und maximalen Pulsparametern. Dies macht speziell die Auslegung von externen Schutzmaßnahmen wie Überspannungsableitern schwierig, da diese idealerweise für die max. auftretende Pulsenergie ausgelegt sein müssten.

Bei der Überprüfung der verwendeten Generatoren konnte eindeutig nachgewiesen werden, dass die gemessenen Spannungswerte aller 16 Generatoren, bezogen auf die im Standard definierte Verifikation, innerhalb der spezifizierten Toleranzbereiche liegen. Alle Generatoren erfüllen somit die Verifikationsanforderungen und würden größtenteils sogar noch engere Toleranzgrenzen erlauben.

Ein Beispiel der Untersuchungsergebnisse wird in Bild 2 anhand des Testpulses 1 gezeigt und soll diese Unterschiede verdeutlichen.

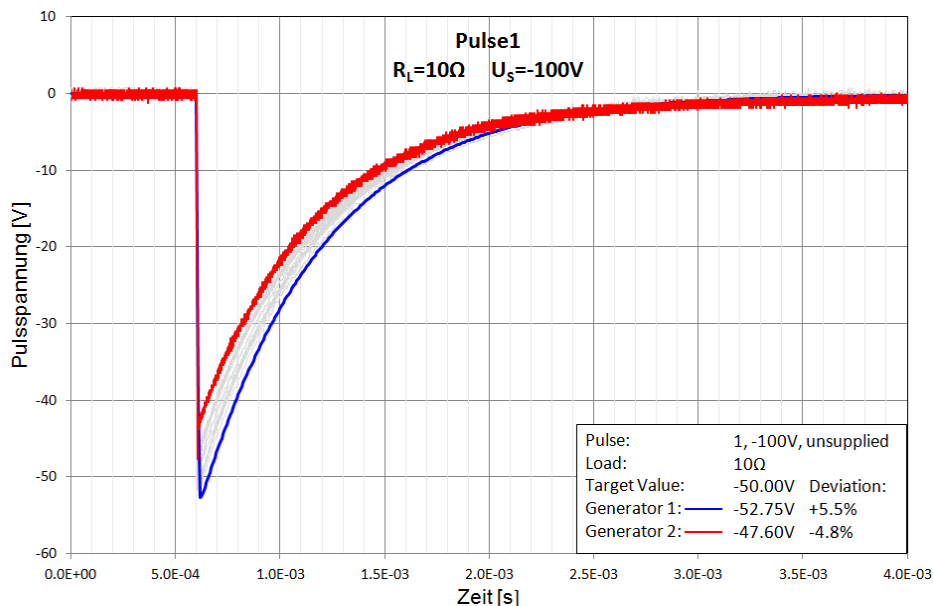


Bild 2: Unterschiede in den Pulsspannungsverläufen der untersuchten Generatoren (Testpulse 1, $U_S = -100\text{ V}$, $U_a = 0\text{ V}$, standardisierte Verifikation mit $R_L = R_i = 10\text{ Ohm}$)

Bezogen auf die im Standard vorgeschriebene Verifikation lagen der Generator mit der größten gemessenen Pulsamplitude (Generator 1) und der Generator mit der kleinsten Pulsamplitude (Generator 2) nur + 5.5 % und - 4.8 % vom "Normpuls" entfernt. Alle Abweichungen lagen somit innerhalb der von der Norm geforderten ± 20 % Toleranz. Bei der Leistung (siehe Bild 3) ergibt sich daraus schon eine Abweichung von + 17.0 % bei Generator 1 und - 12.4 % bei Generator 2.

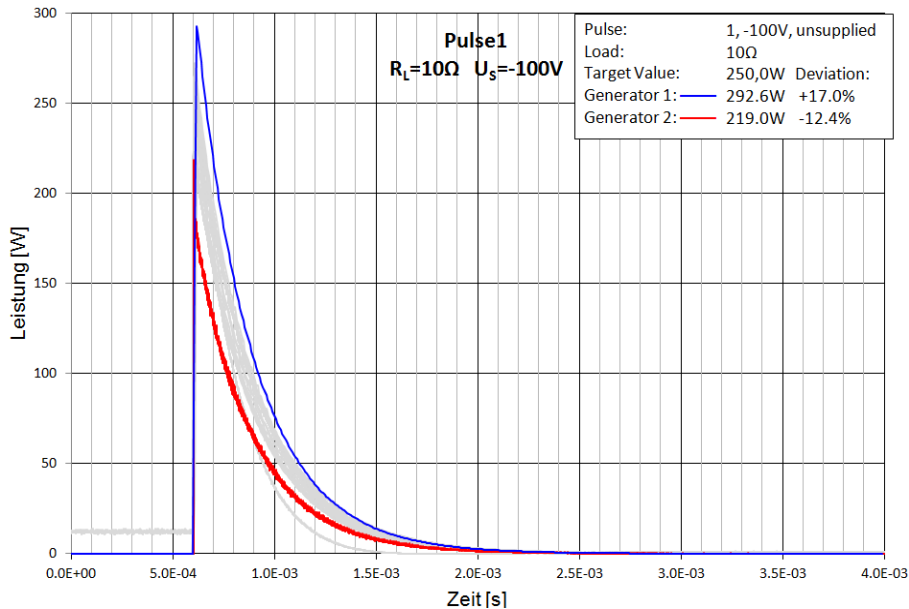


Bild 3: Unterschiede in den Pulsleistungsverläufen der untersuchten Generatoren (Testpulse 1, $U_s = -100$ V, $U_a = 0$ V, standardisierte Verifikation mit $R_L = R_i = 10$ Ohm)

2.1.2 Erweiterung der standardisierten Verifikation

Die standardisierte Generatorverifikation, die bei einer Boardnetzspannung von $U_a = 0$ V durchgeführt werden soll, wurde bei dem Rundversuch noch um applikationstypische Lasten erweitert. Diese sollen einen besseren Bezug zu realen Bedingungen im Fahrzeug darstellen und auch die Boardnetzspannungsversorgung von $U_a = 13.5$ V im Fahrzeug berücksichtigen.

Wie in Tabelle 3 dargestellt, wurden dabei zum Beispiel vier zusätzliche Lastfälle mit Belastungen in Form einer niederimpedanten ohmschen Last mit 1Ω als typischer Stromverbraucher, sowie einer hochimpedanten ohmsch/kapazitiven Last, wie sie z.B. ein zu testender Sensor darstellt, verwendet.

Bei der Verwendung der erweiterten (applikationsnahen) Belastungen traten jedoch erhebliche Unterschiede in den gemessenen Spannungs-, Strom-, Leistungs- und Pulsenergiewerten auf. Die Unterschiede ließen sich in erster Linie auf die Unterschiede in der Ausführung der Testpulsgeneratoren, speziell dem pulserzeugenden Netzwerk und vor allem der Ein- und Entkopplung der Pulse in die Boardnetzspannung zurückführen.

		Testpuls 1			Testpuls 2a		
		Pulsamplitude U_s	Spannungsversorgung U_a	Belastung R_L	Pulsamplitude U_s	Spannungsversorgung U_a	Belastung R_L
Nach ISO 7637	unbelastet	- 100 V	0 V	-	75 V	0 V	-
	belastet	- 100 V	0 V	10 Ω	75 V	0 V	2 Ω
erweitert	Lastfall 1	-	-	-	50 V 75 V 100 V 125 V	13.5 V	-
	Lastfall 2	- 50 V - 100 V - 150 V	0 V	1 Ω	50 V 75 V 100 V 125 V	13.5 V	1 Ω
	Lastfall 3	-	-	-	50 V 75 V 100 V 125 V	13.5 V	2 Ω
	Lastfall 4	- 50 V - 100 V - 150 V	0 V	1 k Ω // 100 nF	50 V 75 V 100 V 125 V	13.5 V	1 k Ω // 100nF

Tabelle 3: Übersicht der verwendeten erweiterten Generatorverifikation für Testpuls 1 und Testpuls 2a

Eine statistische Ergebnisauswertungen dieser Untersuchungen wurden bei der 6. GMM-Fachtagung Elektromagnetische Verträglichkeit in der Kfz-Technik vorgestellt [4] und sind derzeit auch im Entwurf eines Technischen Reports [5] zur ISO 7637-2 aufgezeigt und werden intensiv im Normungsgremium der DKE und ISO diskutiert.

2.1.3 Beispiele der gemessenen Unterschiede in den Pulsparametern

Ein Beispiel der gemessenen Unterschiede in den Verläufen der Pulsformen und im speziellen der sich ergebenden Pulsamplituden der verwendeten Testpulsgeneratoren wird im Bild 4 am Beispiel des Testpulses 2a verdeutlicht. In diesem Fall wurden bei allen Generatoren eine Pulsamplitude $U_s = 100$ V eingestellt und eine der angesprochenen applikationstypischen Belastungen (Lastfall 4) verwendet. Wie im Verlauf der gemessenen Pulsspannungen leicht zu erkennen ist, zeigte sich eine erhebliche Schwankungsbreite der Messwerte. Bei einem Generator ergab sich eine maximale Pulsamplitude über dem Belastungsnetzwerk von ca. 200 V, während sich bei einem anderen Generator eine um fast die Hälfte geringere Pulsamplitude einstellte. Diese worst case Fälle sind im Bild farbig eingezeichnet. Die dazwischen liegenden Messkurven der anderen Generatoren wurden im Bild grau hinterlegt und zeigen die große Schwankungsbreite der Ergebnisse.

Speziell die deutlichen Unterschiede in der sich ergebenden maximalen Pulsspannung kann dazu führen, dass die Ansprechschwellen von Ableitelementen, die zum Schutz der von integrierten Schaltkreise verwendet werden, in einem Fall aktiviert werden und den Puls ableiten, im anderen Fall aber noch gar nicht ansprechen, was zu völlig unterschiedlichen Ergebnissen der Pulsfestigkeitsprüfung führen kann.

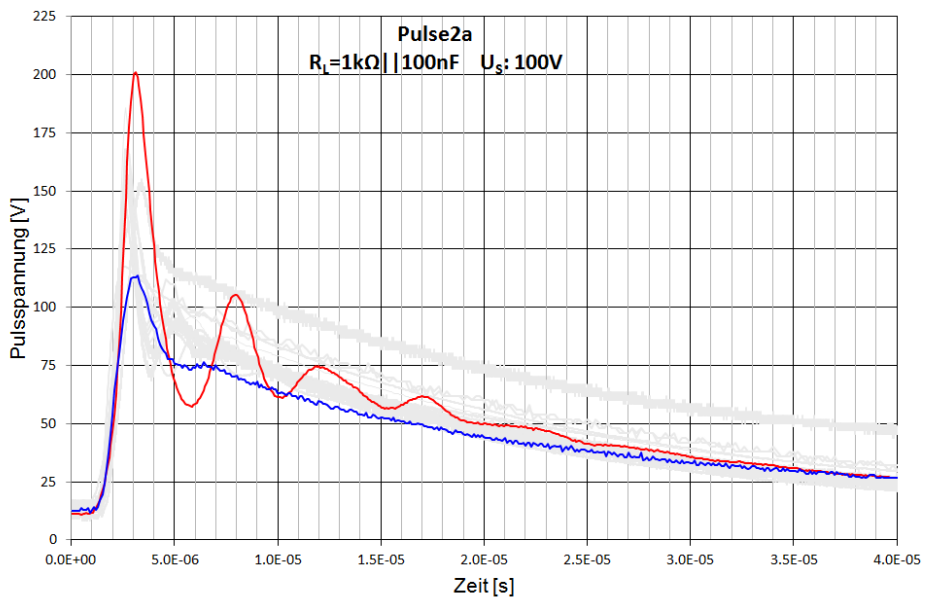


Bild 4: Unterschiede in den Pulsspannungsverläufen der untersuchten Generatoren (Testpulse 2a, $U_s = 100\text{ V}$, $U_a = 13.5\text{ V}$, applikationsnahe Belastung mit $R_L = 100\text{ k}\Omega // 100\text{ nF}$)

Ein weiteres interessantes Beispiel der sich ergebenden Unterschiede ist in Bild 5 wiederum für den Testpuls 2a im Bezug auf den Lastfall 3 dargestellt. In diesem Fall zeigt sich bei einigen Generatoren in der gemessenen Pulsspannung ein deutlicher Unterschwinger, so dass die angelegte 13.5 V Boardnetzspannung auf bis zu 3 V zusammenbricht. Dieser Unterschwinger ist in erster Linie auf die Rückwirkung der Impedanz des Entkoppelnetzwerkes im Generator zurückzuführen. Er kann zum Beispiel zur Folge haben, dass ein Prüfling mit einer Unterspannungserkennung beim Test mit einem Generator eine Unterspannung detektiert und einen Fehler ausgibt, beim Test mit einem anderen Generator aber keine Unterspannung vorhanden ist und somit der selbe Prüfling als fehlerfrei bewertet wird.

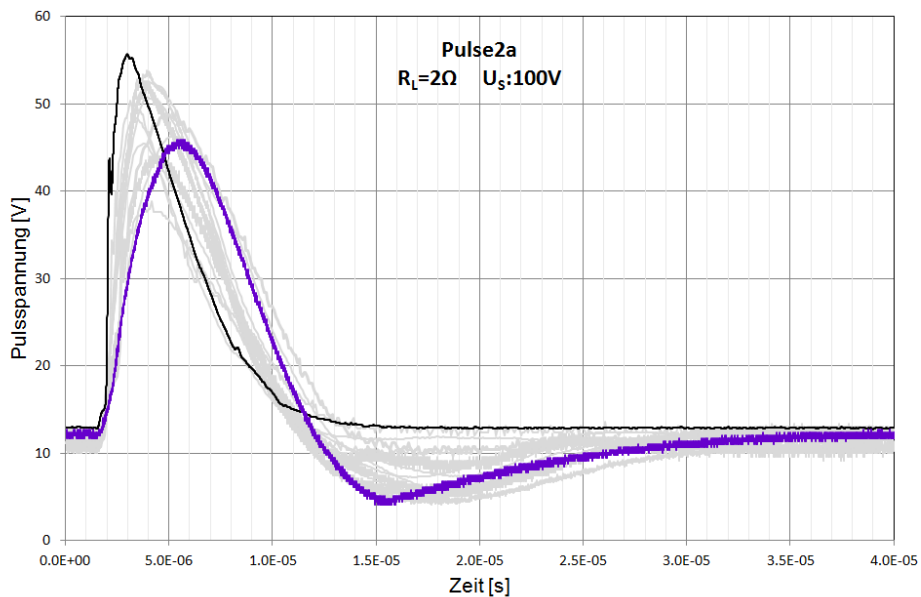


Bild 5: Unterschiede in den Pulsspannungsverläufen der untersuchten Generatoren (Testpulse 2a, $U_s = 100\text{ V}$, $U_a = 13.5\text{ V}$, $R_L = 2\text{ Ohm}$)

3 Maßnahmen zur Reduzierung der unterschiedlichen Ergebnisse bei der Störfestigkeitsprüfung

Wie kann nun mit der dargestellten Problematik der Ergebnisstreuung der Prüflinge umgegangen werden, um einheitliche Testergebnisse ein und desselben Prüflings bei unterschiedlichen Generatoren zu erlangen?

3.1 Vorgehensweise bei generatorabhängigen Testergebnissen

Eine kurzfristige Lösung des Problems ist nicht zu erwarten. Sowohl eine Überarbeitung, als auch eine Modifikation der Koppel- und Entkoppelnetzwerke in den Generatoren braucht Zeit. Daher wird vorerst eine praktikable Vorgehensweise vorgeschlagen, wie mit generatorabhängigen Ergebnisstreuungen umzugehen ist.

Eine unmittelbare Möglichkeit bietet die Überwachung des Pulses am Prüfling während des Tests mit einem hochohmigen Messabgriff. Hier ist es in jedem Fall empfehlenswert, die vom Generator erzeugten Pulsparameter in geeigneter Form auch während der Prüfung zu erfassen, um Rückschlüsse auf die Prüflingsbelastung und eine Interpretation der Ergebnisse zu ermöglichen. Dabei könnte im Falle einer gemessenen Pulsspannung, die höher als die eingestellte Pulsspannung ist, die Pulsamplitude am Generator so lange reduziert werden, bis die gemessene Spannung am Prüfling dem Zielwert entspricht. Hierbei ist aber zu bedenken, dass sich auch die Pulsenergie entsprechend verringert.

Im Fall einer auftretenden Unterspannung in der Boardnetzversorgung sollten die daraus resultierenden Fehler des Prüflings nicht in die Ergebnisbewertung einfließen.

3.2 Ermittlung der Generatoreigenschaften durch Erweiterung der Verifikation

In einem nächsten Schritt sollte die Ermittlung der tatsächlichen Generatoreigenschaften durch eine erweiterte Generatorverifikation erfolgen. Zusätzlich zu den derzeit im Standard definierten Verifikationswiderständen sollte die Pulsverifikation mit den vorgestellten Belastungszuständen und mit angeschlossener Boardnetzspannung durchgeführt werden.

3.3 Erweiterte Generatordefinition

Am sinnvollsten wäre es aber die Generatoren durch eine eindeutige Definition der passiven, pulsformenden Netzwerke sowie speziell der Entkopplungsnetzwerke zu standardisieren und somit zu vereinheitlichen. Eine denkbare Festlegung für die Entkoppelnetzwerke könnte hier aus den schon vorhandenen Definitionen der Boardnetznachbildung, wie sie in den Automotiven Normen der ISO und CISPR vorhanden sind, übernommen werden.

Ebenso können die großzügig definierten Pulsverifikationstoleranzen im derzeitigen ISO 7637 Standard entsprechend eingeeengt werden.

Bei der Erweiterung der Pulsverifikation sollten die, je nach verwendeten Generatortyp unterschiedlich stark auftretenden Abweichungen vom Normpuls, durch pulsspezifische enge Toleranzgrenzen beschränkt werden. Der Unterschwinger der Boardnetzspannung bei niederimpedanter Belastung, sowie der Überschwinger in der Pulsamplitude bei ohmsch/kapazitiver Belastung könnte in diesem Zusammenhang zum Beispiel auf 10 % begrenzt werden.

4 Zusammenfassung

Die Prüfung der Störfestigkeit gegenüber transienter Störvorgänge, wie sie zurzeit in der ISO 7637 definiert ist, führt des Öfteren zu unterschiedlichen Ergebnissen in der Prüflingsbewertung. Die Ursache dieser Abweichungen liegt aber nicht am Prüfling oder dem Messaufbau selbst, sondern ist in erster Linie den Generatoren, vor allen den darin verbauten unterschiedlichen Netzwerken zur Erzeugung und Entkopplung der Testpulse zuzuschreiben. Die im Rahmen einer durchgeführten Generatorverifikation ermittelten Ergebnisse zeigen deutlich, dass sich abhängig vom Generatortyp zum Teil erhebliche Unterschiede in den Messergebnissen zwischen den Geräten zeigen, vor allem wenn die Belastungen vom standardisierten Verifikationssetup abweichen.

Dies kann zur Folge haben, dass im Entwicklungsbetrieb widersprüchliche Ergebnisse generiert werden, die zu Fehlentwicklungen und in der Folge zu zusätzlichen Redesigns und Entwicklungsiterationen führen. Im schlimmsten Fall können unterschiedliche Produktbewertungen von verschiedenen EMV-Testlaboren desselben Prüflings erhebliche Probleme in Geschäftsbeziehungen verursachen.

Aus dem Grund lässt sich ein Analyse- und Handlungsbedarf ableiten, um aus standardisierten Pulsstörfestigkeitstests auch verlässlich vergleichbare Ergebnisse zu erhalten.

Ein besonderer Dank gilt an dieser Stelle allen am Rundversuch und der Ergebnisdiskussion beteiligten Experten aus den in alphabetischer Reihenfolge aufgeführten Firmen Bosch, Continental, EM Test, Infineon, Opel, Teseq, Volkswagen und WABCO.

-
- [1] ISO 7637-2:2011 “Road vehicles -- Electrical disturbances from conduction and coupling - Part 2: Electrical transient conduction along supply lines only”, TC 22/SC 3, www.iso.org
 - [2] ISO 16750-2 3rd Ed “Road vehicles - Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment - Part 2: Electrical loads”, ISO 2010
 - [3] B. Deutschmann, F. Klotz, “Neue Pulsanforderungen und deren Auswirkung auf die Kfz-Elektronik“, Proc. Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit, emv 2013, pp. 169 – 174, 07. – 09. März 2012, Düsseldorf
 - [4] F. Klotz, B. Deutschmann, A. Wahl, G. Oberjatzas, “ISO Kfz-Pulsgeneratoren - Verifikationsergebnisse und Erweiterung des Standards“, 6. GMM-Fachtagung Elektromagnetische Verträglichkeit in der Kfz-Technik, pp. 63-68, 26.- 27. September 2013, Stuttgart
 - [5] N2250 ISO/TC22/SC3/WG3, Technical Report ISO/TR 7637 German proposal, “Enhanced definitions and verification methods for harmonization of pulse generators according to ISO 7637-2”, 2013