

FORTSCHRITT-  
BERICHTE

**VDI**

Dipl.-Ing. Steffen Wendsche, Bad Soden

**Störfestigkeit computerbasier-  
ter Geräte gegenüber pulsför-  
migen elektrischen Störgrößen  
– Statistische Modellierung und  
Störfestigkeitsprüfung mit sta-  
tistischen und selbstadaptiven  
Methoden**

Reihe **21**: Elektrotechnik

Nr. **219**

# Inhaltsverzeichnis

<b>VERZEICHNIS DER FORMELZEICHEN UND ABKÜRZUNGEN .....</b>	<b>IX</b>
<b>KURZFASSUNG .....</b>	<b>XVI</b>
<b>1 EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
<b>2 BESONDERHEITEN DER STÖRFESTIGKEIT COMPUTERBASIERTER GERÄTE GEGENÜBER PULSFÖRMIGEN STÖRGRÖßEN.....</b>	<b>4</b>
2.1    Besonderheiten der Störfestigkeit computerbasierter Geräte.....	4
2.1.1    Derzeitiger Erkenntnisstand .....	4
2.1.2    Schlußfolgerungen für die Festlegung von Phasen unterschiedlicher Störempfindlichkeit und offene Probleme .....	6
2.2    Überblick über grundsätzliche Ansätze zur Modellierung der Störfestigkeit von Geräten gegenüber pulsförmigen Störgrößen.....	8
2.3    Analyse ausgewählter Verfahren zur Störfestigkeitsprüfung gegenüber pulsförmigen Störgrößen.....	9
2.3.1    Verfahren zur Bestimmung der Störfestigkeit gegen Entladung statischer Elektrizität nach EN 61000-4-2.....	10
2.3.1.1    Prüfalgorithmus .....	10
2.3.1.2    Bewertung.....	11
2.3.2    Bestimmung der Störfestigkeit gegen ESD nach ANSI C63.16-1991.....	11
2.3.2.1    Grundlagen .....	11
2.3.2.2    Prüfalgorithmus .....	13
2.3.2.3    Bewertung.....	16
2.3.3    Verfahren zur Bestimmung der Störfestigkeit gegen Entladung statischer Elektrizität nach Nick/Osborn/Wu.....	19
2.3.3.1    Prüfalgorithmus .....	19
2.3.3.2    Bewertung.....	20
2.4    Zusammenfassung des aktuellen Kenntnisstandes und Präzisierung der Zielstellung der vorliegenden Arbeit .....	20
<b>3 PRÜFAUFBAU ZUR UNTERSUCHUNG DER STÖRFESTIGKEIT COMPUTERBASIERTER GERÄTE.....</b>	<b>22</b>
3.1    Prinzip eines geeigneten Prüfaufbaus.....	22
3.2    Verwendeter Prüfaufbau zur Untersuchung der Störfestigkeit computerbasierter Geräte.....	23
<b>4 UNTERSUCHUNGEN ZUR STÖRFESTIGKEIT DER PHASEN IM OPERATIONSZYKLUS COMPUTERBASIERTER GERÄTE.....</b>	<b>26</b>
4.1.1    Notwendigkeit der statistischen Beschreibung der Störfestigkeit der Phasen im Operationszyklus eines computerbasierten Gerätes .....	26

4.1.2	Zulässigkeit der statistischen Modellierung der Störfestigkeit der Phasen im Operationszyklus eines computerbasierten Gerätes .....	27
4.1.3	Zusammenfassung der Ergebnisse und Schlußfolgerungen für die Modellierung der Störfestigkeit computerbasierter Geräte .....	29
<b>5</b>	<b>MODELLIERUNG DER STÖRFESTIGKEIT COMPUTERBASIERTER GERÄTE GEGENÜBER PULSFÖRMIGEN STÖRGRÖßEN .....</b>	<b>30</b>
5.1	Grundansatz der Modellierung .....	30
5.2	Modellierung der Störfestigkeit computerbasierter Geräte bei konstanter Amplitude der Störbeanspruchung .....	30
5.2.1	Modellierung der Störfestigkeit einer Phase im Operationszyklus .....	31
5.2.2	Modellierung der mittleren Störfestigkeit im Operationszyklus .....	33
5.3	Modellierung der Störfestigkeit computerbasierter Geräte gegenüber statistisch verteilten Störampplituden .....	35
5.3.1	Modellierung der Störfestigkeit einer Phase im Operationszyklus .....	35
5.3.2	Modellierung der mittleren Störfestigkeit im Operationszyklus .....	39
5.4	Zusammenfassung und Bewertung der vorgenommenen statistischen Modellierung der Störfestigkeit computerbasierter Geräte .....	41
<b>6</b>	<b>ERWEITERTE STATISTISCHE AUSWERTUNG EINER SPANNUNGSSTUFE EINER STÖRFESTIGKEITSPRÜFUNG .....</b>	<b>43</b>
6.1	Zu interpretierende Prüfergebnisse .....	43
6.2	Posterior-Dichten als Beschreibung der durch die Störfestigkeitsprüfung erlangten Kenntnis über die Störwahrscheinlichkeiten .....	44
6.3	Bestimmung der Posterior-Dichte der Störwahrscheinlichkeiten aus den beobachteten Störhäufigkeiten .....	45
6.4	Zusammenhang zwischen Prüfumfang und erzielbarer Genauigkeit der aus dem Prüfergebnis bestimmten Störwahrscheinlichkeiten .....	47
6.5	Untersuchung der Gültigkeit der statistischen Schätzung der mittleren Störwahrscheinlichkeiten aus den Prüfergebnissen .....	50
6.6	Bestimmung der kumulierten Störwahrscheinlichkeit .....	51
6.7	Zusammenhang zwischen Prüfumfang und erzielbarer Genauigkeit der bestimmten kumulierten Störwahrscheinlichkeit .....	53
6.8	Zusammenhang zwischen der statistischen Interpretation mittels Posterior-Dichten und der Konfidenzschätzung einer unbekanntem Störwahrscheinlichkeit .....	56
6.9	Zusammenfassung .....	58
<b>7</b>	<b>VERBESSERTE STATISTISCHE AUSWERTUNG MEHRSTUFIGER STÖRFESTIGKEITSPRÜFUNGEN .....</b>	<b>60</b>
7.1	Ausgangspunkt und Präzisierung der Aufgabenstellung .....	60
7.2	Annahmen über die Störempfindlichkeit des Prüfobjektes zwischen den diskreten Prüfspannungsstufen .....	61

7.3	Bestimmung der Störungswahrscheinlichkeiten in einer Störumgebung aus den Ergebnissen einer mehrstufigen Störfestigkeitsprüfung.....	63
7.4	Bestimmung der kumulierten Störungswahrscheinlichkeit aus den Ergebnissen einer mehrstufigen Störfestigkeitsprüfung .....	65
7.5	Zusammenhang zwischen Prüfumfang und erzielbarer Genauigkeit der Bestimmung der kumulierten Störungswahrscheinlichkeit.....	67
7.6	Bestimmung der EMV-Zuverlässigkeit in einer Störumgebung.....	68
7.7	Zusammenfassung.....	70
<b>8 BEDEUTUNG DER ZEITLICHEN VERTEILUNG DER PRÜFIMPULSE FÜR DIE STÖRFESTIGKEITSPRÜFUNG COMPUTERBASIERTER GERÄTE .....</b>		<b>72</b>
8.1	Grundlegende Aufgaben der Störfestigkeitsprüfung computerbasierter Geräte....	72
8.2	Notwendige zeitliche Verteilung der Prüfpulse zur Bestimmung der mittleren Störwahrscheinlichkeiten im Operationszyklus eines Gerätes.....	72
8.3	Untersuchungen zur Gültigkeit der abgeleiteten zeitlichen Verteilung der Prüfpulse für die Bestimmung der mittleren Störwahrscheinlichkeiten im Operationszyklus.....	74
8.4	Notwendige zeitliche Verteilung der Prüfpulse zur Bestimmung der maximalen kumulierten Störwahrscheinlichkeit im Operationszyklus eines Gerätes .....	76
8.5	Zusammenfassung und Schlußfolgerungen .....	78
<b>9 EFFEKTIVE BESTIMMUNG DER MAXIMALEN STÖRWAHRSCHEINLICHKEIT IM OPERATIONSZYKLUS COMPUTERBASIERTER GERÄTE MITTELS SELBSTADAPTIVER PRÜFVERFAHREN .....</b>		<b>80</b>
9.1	Ausgangspunkt und Präzisierung der Aufgabenstellung .....	80
9.2	Bewertungskriterien für Effektivität und Korrektheit der Bestimmung der maximalen Störwahrscheinlichkeit.....	81
9.2.1	Effektivität der Bestimmung der maximalen Störwahrscheinlichkeit.....	81
9.2.2	Korrektheit der Schätzung der maximalen Störwahrscheinlichkeit .....	82
9.3	Auswahl geeigneter Algorithmen zur Adaption der Prüfwahrscheinlichkeiten in einer Störfestigkeitsprüfung.....	83
9.3.1	Beschreibung des Lernproblems und Auswahl des Lernprinzips.....	83
9.3.2	Übersicht über die verwendeten Reinforcement-Algorithmen.....	85
9.4	Schätzung der maximalen Störwahrscheinlichkeit bei Einsatz adaptiver Prüfwahrscheinlichkeiten.....	88
9.5	Prinzip der adaptiven Bestimmung der maximalen Störwahrscheinlichkeit unter Einsatz von Reinforcement-Algorithmen .....	89
9.6	Simulative Analyse der Leistungsfähigkeit ausgewählter Algorithmen für die Bestimmung der maximalen Störwahrscheinlichkeit.....	90
9.6.1	Beschreibung des Simulationssystems.....	90
9.6.1.1	Modellierung des Prüfpulses.....	90
9.6.1.2	Modellierung der Reaktion des Prüfobjektes auf Störbeanspruchungen.....	91

9.6.2	Verwendete Prüfobjektmodelle .....	92
9.6.3	Auswahl des Lernalgorithmus für die adaptive Bestimmung der maximalen Störwahrscheinlichkeit .....	92
9.7	Praktische Bestimmung der maximalen Störwahrscheinlichkeit im Operationszyklus computerbasierter Geräte mittels des entwickelten selbstadaptiven Prüfverfahrens .....	96
9.8	Gedanken zur Verbesserung und Erweiterung des Prüfverfahrens.....	98
9.8.1	Steigerung der Effektivität durch Verwendung von Prior-Wissen .....	98
9.8.2	Steigerung der Effektivität bei mehreren Phasen maximaler Störwahrscheinlichkeit .....	100
9.8.3	Einsatz des Verfahrens zur Identifikation kritischer Phasen.....	100
9.8.4	Erweiterung auf mehr als zwei Fehlerklassen.....	102
9.8.5	Grenzen des Verfahrens .....	102
9.9	Vergleich der adaptiven Bestimmung der maximalen Störwahrscheinlichkeit mit dem Verfahren nach Nick/Osborn.....	103
9.10	Zusammenfassung.....	104
<b>10 VORSCHLAG FÜR DIE STÖRFESTIGKEITSPRÜFUNG COMPUTERBASIRTER GERÄTE.....</b>		<b>106</b>
<b>11 DISKUSSION DER WIEDERHOLBARKEIT VON STÖRFESTIGKEITSPRÜFUNGEN .....</b>		<b>110</b>
11.1	Ausgangspunkt und Präzisierung der Aufgabenstellung .....	110
11.2	Voraussage über zu beobachtende Störhäufigkeiten bei einer Wiederholung der Störfestigkeitsprüfung .....	111
11.3	Wahrscheinlichkeit des erneuten Bestehens einer Normprüfung nach EN 61000-4-2.....	112
11.4	Schlußfolgerungen für die Festlegung von Kriterien für die Bestätigung der Prüfergebnisse in einer Wiederholungsprüfung .....	114
<b>12 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....</b>		<b>117</b>
<b>ANHANG I: MATHEMATISCHER ANHANG .....</b>		<b>122</b>
<b>ANHANG II: PRÜFPROTOKOLLE .....</b>		<b>135</b>
<b>LITERATURVERZEICHNIS.....</b>		<b>146</b>