

**Prüfgeneratoren zur Simulation von  
Blitzimpulsströmen im Labor und ihre  
Wechselwirkung mit den Prüfobjekten**

Michael Rock



**Universitätsverlag Ilmenau  
2012**

# Impressum

## **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Angaben sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Diese Arbeit hat der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Ilmenau als Habilitation vorgelegen.

- |                       |                                                                              |
|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Gutachter:         | Univ.-Prof. Dr.-Ing. Frank Berger<br>(Technische Universität Ilmenau)        |
| 2. Gutachter:         | Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ernst Gockenbach<br>(Leibniz Universität Hannover)      |
| 3. Gutachter:         | Univ.-Prof. Dr.-Ing. Volker Hinrichsen<br>(Technische Universität Darmstadt) |
| Tag der Verteidigung: | 15. Juni 2012                                                                |

Technische Universität Ilmenau/Universitätsbibliothek

**Universitätsverlag Ilmenau**

Postfach 10 05 65

98684 Ilmenau

[www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag](http://www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag)

## **Herstellung und Auslieferung**

Verlagshaus Monsenstein und Vannerdat OHG

Am Hawerkamp 31

48155 Münster

[www.mv-verlag.de](http://www.mv-verlag.de)

**ISBN** 978-3-86360-032-7 (Druckausgabe)

**URN** urn:nbn:de:gbv:ilm1-2012100134

---

## Inhaltsverzeichnis

<b>Verzeichnis verwendeter Symbole und Abkürzungen</b> .....	<b>XI</b>
Symbole .....	XI
Abkürzungen, Indices und Zeichen .....	XVIII
<b>1 Einführung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Hintergründe zur Betrachtung von Impulsstromgeneratoren .....	1
1.2 Impulsformen.....	2
1.3 Definition der Impulsstromformen.....	4
1.4 Literatur .....	4
<b>2 Stromverläufe natürlicher Blitzentladungen und ihre Kenngrößen</b> .....	<b>6</b>
2.1 Historischer Rückblick .....	6
2.2 Stromkomponenten der Blitzentladung .....	6
2.3 Normung der Blitzstromgrößen.....	8
2.4 Blitzströme und Blitzteilströme.....	9
2.5 Wirkungen der Blitzströme .....	10
2.5.1 Elektrische Wirkungen .....	10
2.5.2 Thermische Wirkung im stromdurchflossenen Leiter .....	10
2.5.3 Mechanische Wirkungen .....	11
2.5.4 Thermische Wirkungen am Lichtbogenfußpunkt.....	13
2.5.5 Induktionswirkungen .....	14
2.6 Wirkung der Blitzstromkomponenten .....	15
2.6.1 Erstblitzstoßströme .....	15
2.6.2 Folgeblitzstoßströme .....	16
2.6.3 Blitzlangzeitströme.....	17
2.7 Literatur .....	18
<b>3 Bedeutung der Simulation von Blitzstromkomponenten mit Prüfgeneratoren</b> .....	<b>19</b>
3.1 Nachbildung der Wirkungen von Blitzströmen.....	19
3.2 Prüfung von Ableitern mit Blitzimpulsströmen und Stoßströmen .....	19
3.3 Anforderungen an die Nachbildung von Impulsströmen.....	20
3.4 Impulsstromerzeugung mit kapazitivem primären Energiespeicher .....	20
3.5 Literatur .....	22
<b>4 Mathematische Formulierung der Blitz- und Generatorströme</b> .....	<b>23</b>
4.1 Kennwerte des aperiodischen Impulsstromes der Form $10/350 \mu\text{s}$ .....	23
4.2 Einfluss von Stirn-, Rückenhalbwertszeit und Amplitude auf die integralen Impulsstromgrößen bei der Form $10/350 \mu\text{s}$ .....	28
4.3 Toleranzen von Scheitelwert, Ladung und Spezifischer Energie für den Erstblitzstoßstrom bei Prüfungen .....	31
4.4 Kennwerte des periodisch gedämpften Impulsstromes der Form $8/20 \mu\text{s}$ .....	32
4.5 Frequenzzuordnung bei Impulsströmen .....	35
4.5.1 Höchste interessierende Frequenz .....	35
4.5.2 Spektrum und Frequenzen aperiodisch gedämpfter Impulsströme .....	36
4.5.3 Spektrum und Frequenzen periodisch gedämpfter Impulsströme .....	39
4.5.4 Spektrum und Frequenzen von Rechteckimpulsströmen .....	41
4.6 Literatur .....	45
<b>5 Grundlegende Beschreibung von Prüfgeneratoren</b> .....	<b>46</b>
5.1 CLR-Stoßkreis .....	46
5.1.1 Stoßstromgenerator für Blitzströme der Form $10/350 \mu\text{s}$ .....	46

5.1.2	Parametervariation für den Stromimpuls der Form 10/350 $\mu\text{s}$ .....	48
5.1.2.1	Einflüsse auf den Impulsstromscheitelwert .....	52
5.1.2.2	Einflüsse auf die Impulsladung.....	53
5.1.2.3	Einflüsse auf die Spezifische Impulsenergie.....	54
5.1.2.4	Einflüsse auf die Stirnzeit .....	55
5.1.2.5	Einflüsse auf die Rückenhalbwertszeit .....	56
5.1.3	Stoßstromgeneratoren für Folgeblitzstoßströme der Form 0,25/100 $\mu\text{s}$ .....	57
5.1.3.1	Erzeugung von Folgeblitzstoßströmen mit verkürztem Rücken.....	60
5.1.4	Einfluss der Elemente im Reihenkreis auf den Stoßstromverlauf .....	62
5.1.4.1	Einfluss der Elemente im aperiodisch gedämpften Stoßkreis.....	62
5.1.4.2	Einfluss der Elemente im periodisch gedämpften Stoßkreis.....	64
5.2	Crowbar-Stoßkreis .....	66
5.2.1	Stoßstromgenerator mit Crowbar-Schalter für Blitzströme der Form 10/350 $\mu\text{s}$ ..	67
5.2.1.1	Einfluss des Kurzschlusszeitpunktes auf Stromverlauf, Ladung und Spezifische Energie .....	71
5.2.1.2	Gegenüberstellung der Crowbar-Zeitpunkte Nulldurchgang der Spannung an der Kapazität und Stromscheitel .....	73
5.2.1.3	Triggerung und Zuschaltung des Crowbar-Schalters.....	74
5.3	Hybridgenerator .....	76
5.3.1	Elemente im Hybridgeneratorkreis .....	77
5.3.2	Impulsspannung bei kapazitiver Belastung des Hybridgenerators .....	77
5.4	Erzeugung von Langzeitströmen.....	82
5.4.1	Erzeugung von Rechteckimpulsen mit Kettenleitern.....	83
5.4.2	Erzeugung von Rechteckströmen mit Kondensatorbatterie und veränderlichem Widerstand .....	90
5.4.2.1	Erzeugung eines Rechteckstromes mit zeitvariablem Dämpfungswiderstand.....	92
5.4.2.2	Erzeugung eines Rechteckstromes mit aufklingendem Sägezahnverlauf.....	94
5.4.2.3	Erzeugung eines Rechteckstromes mit zeitmoduliertem Sägezahnverlauf.....	97
5.4.3	Vergleich der mit Generatoren erzeugten Langzeitstromverläufe .....	100
5.5	Kopplung von Hochstrom- und Hochspannungsgeneratoren .....	101
5.5.1	Kopplung von zwei Spannungsquellen.....	102
5.5.2	Kopplung von Strom- und Spannungsquelle .....	103
5.5.3	Kopplung von zwei Stromquellen.....	104
5.5.4	Kombinationen von Impulsstrom- und Impulsspannungsquellen .....	105
5.5.5	Kopplung von Impulsstromgenerator und Wechselstromquelle.....	105
5.5.6	Kombinierte Prüfanordnungen.....	107
5.5.6.1	Überlagerung eines aperiodischen Stoßstromes mit einem Langzeitstrom .....	108
5.5.6.2	Überlagerung eines periodischen Stoßstromes mit einem Langzeitstrom .....	110
5.5.6.3	Überlagerung eines aperiodischen Stoßstromes mit einem Wechselstrom.....	112
5.5.6.4	Überlagerung eines periodischen Stoßstromes mit einem Wechselstrom .....	113
5.5.6.5	Überlagerung eines aperiodischen Stoßstromes und einer Stoßspannung.....	114
5.5.6.6	Überlagerung eines Langzeitstromes und einer Stoßspannung .....	115
5.5.6.7	Bewertung der Kombinationsschaltungen .....	116
5.6	Nachbildung von Blitzströmen im Labor.....	117
5.7	Literatur.....	120
<b>6</b>	<b>Einfluss von Prüfobjekten auf Impulsform und Impulskenngößen .....</b>	<b>122</b>
6.1	Rückwirkung von Prüfobjekten auf den Impulsstromverlauf.....	122
6.1.1	Rückwirkung eines ohmsch-induktiven Prüfobjektes auf den aperiodischen Impulsstromverlauf .....	122
6.2	Einfluss und Beschreibung nichtlinearer Prüfobjekte.....	125
6.2.1	Nachbildung einer Varistor-Kennlinie mit Widerstandsgeraden.....	125

6.2.2	Nachbildung einer Funkenstrecken-Kennlinie mit zwei Widerstandsgeraden.....	130
6.2.3	Nachbildung einer Funkenstrecken-Kennlinie mit Widerstandsgerade und Konstantspannung .....	133
6.2.4	Nachbildung einer idealen Überspannungsschutzeinrichtung.....	137
6.3	Vergleich von CLR-Stoßkreis und Crowbar-Stoßkreis.....	140
6.3.1	Definition der Bezugskenngrößen für den Vergleich.....	141
6.3.2	Vergleichende Gegenüberstellung von CLR-Kreis und Crowbar-Kreis.....	141
6.3.2.1	Stromverlauf bei Kurzschluss.....	142
6.3.2.2	Dimensionierung der Kreiselemente auf Kurzschluss.....	143
6.3.2.3	Stoßkreise auf Kurzschluss ausgelegt – Einfluss von Prüfobjekten als ohmsch-induktive Last oder als Konstantspannungslast .....	147
6.3.2.4	Stoßkreis auf Last des Prüfobjektes abgestimmt – Maximale Größe der ohmsch-induktiven Last oder der Konstantspannungslast .....	153
6.3.2.5	Einfluss des Durchschlagvorganges in einer Entladungsstrecke auf den Impulsstromverlauf.....	153
6.3.2.6	Einfluss des Lichtbogens in einer Entladungsstrecke auf den Impulsstromverlauf.....	155
6.3.2.7	Stoßkreis mit Varistor als Prüfobjekt .....	158
6.3.3	Verhalten des Crowbar-Stoßstromgenerators bei Belastung mit einer Gegenspannung durch das Prüfobjekt .....	162
6.4	Rückwirkung von Prüfobjekten im periodisch gedämpften CLR-Stoßkreis.....	164
6.5	Literatur .....	167
<b>7</b>	<b>Anwendungsmöglichkeiten von CLR-Stoßkreisen .....</b>	<b>168</b>
7.1	Erzeugung verschiedener Stromformen mit CLR-Kreisen.....	168
7.2	Crowbar-Kreise für die Erzeugung weiterer Stromformen .....	168
7.2.1	Crowbar-Kreis für die Erzeugung von Langzeitströmen.....	168
7.2.2	Crowbar-Kreis für die Erzeugung von 0,25/100- $\mu$ s-Impulsströmen.....	172
7.2.3	Stoßkreis mit explodierendem Draht zur Erzeugung von Folgeblitzströmen .....	173
7.3	Generator für 10/350- $\mu$ s- und 8/20- $\mu$ s-Impulsströme .....	176
7.3.1	Vergleich der Impulsströme mit den Formen 10/350 $\mu$ s und 8/20 $\mu$ s.....	176
7.3.2	Einfacher Kombinations-CLR-Stoßkreis .....	179
7.3.3	Aufbau von Generatoren mit Teilstoßkapazitäten.....	181
7.3.3.1	Aufladung von zwei Kapazitäten in Parallelschaltung und Entladung in Parallel- oder Reihenschaltung über L-R-Netzwerke .....	183
7.3.3.2	Aufbau als MARX-Generator mit Teilstoßkapazitäten.....	184
7.3.4	CLR-Crowbar-Stoßkreis für Impulsstromkombination.....	185
7.3.5	Hybridverhalten im 8/20- $\mu$ s-Betrieb .....	187
7.4	Erzeugung von aperiodischen Impulsströmen gleicher Amplitude und gleicher Spezifischer Energie mit einem gedämpften Reihenschwingkreis.....	189
7.5	Erzeugung von aperiodischen Impulsströmen gleicher Amplitude und gleicher Ladung mit einem gedämpften Reihenschwingkreis .....	191
7.6	Stoßstromgenerator mit Hybridfunktion .....	193
7.7	Erzeugung von unipolaren Stoßströmen der Form 8/20 $\mu$ s.....	195
7.8	Erzeugung von Sinushalbwellenströmen.....	199
7.8.1	Einfacher Reihenschwingkreis .....	200
7.8.2	Schwach gedämpfter Reihenschwingkreis .....	201
7.8.3	CLR-Kreis mit Dioden und Kommutierungszeit .....	206
7.8.3.1	Wirkung von Lichtbögen im CLR-Kreis mit Dioden.....	209
7.8.3.2	Verhalten eines CLR-Kreises mit Dioden bei Leerlauf und Kurzschluss .....	210
7.8.3.3	Vor- und Nachteile eines CLR-Kreises mit Dioden.....	212

7.8.4	Schwingkreis mit induktiver Energiespeicherung für die Erzeugung eines Sinushalbwellenstromes .....	213
7.8.5	Crowbar-Kreis für die Erzeugung eines Sinushalbwellenstromes .....	215
7.9	Literatur .....	217
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>219</b>
	<b>Anhänge .....</b>	<b>221</b>
<b>A1</b>	<b>Ausgewählte Funktionen zur Beschreibung aperiodischer Impulsströme .....</b>	<b>221</b>
A1.1	Begriffe Stromimpuls und Impulsstrom .....	221
A1.2	Anforderungen an analytische Funktionen für aperiodische Impulsströme .....	221
A1.3	Dreieck-Geraden-Funktion .....	223
A1.4	Funktion aus zwei exponentiellen Anteilen .....	226
A1.5	HEIDLER-Funktion .....	228
A1.6	Blitzstoßstrom bei Bezug integraler Größen auf die Amplitude .....	232
A1.7	Literatur .....	235
<b>A2</b>	<b>Analytische Beschreibung periodischer Impulsströme .....</b>	<b>237</b>
A2.1	Zeitfunktion und charakteristische Punkte gedämpft schwingender Stoßströme .....	237
A2.2	8/20- $\mu$ s-Stoßstrom mit verschwindender Steilheit beim Strombeginn .....	241
A2.3	Literatur .....	242
<b>A3</b>	<b>Zeitparameter von Impulsen und ihre Zuordnung zum Zeitverlauf .....</b>	<b>243</b>
A3.1	Näherung für Impulsdefinition aperiodisch gedämpfter Stoßströme .....	248
A3.2	Näherung für Impulsdefinition gedämpft schwingender Stoßströme .....	248
A3.3	Näherungsweise Bestimmung der mathematischen Zeitparameter anhand einer normierten Funktion aus 2 exponentiellen Anteilen für den aperiodischen Fall .....	248
A3.4	Näherungsweise Bestimmung der mathematischen Zeitparameter anhand einer normierten abklingenden Sinusfunktion für den Schwingfall .....	255
A3.5	Literatur .....	257
<b>A4</b>	<b>Dimensionierung von CLR-Stoßkreisen .....</b>	<b>258</b>
A4.1	Beziehungen für den CLR-Reihenkreis .....	258
A4.2	Normierte Stromverläufe im CLR-Reihenkreis .....	262
A4.3	Wellenwiderstand von CLR-Reihenkreisen .....	264
A4.4	CLR-Reihenkreis für starke aperiodische Dämpfung .....	265
A4.4.1	Elemente und Energie im CLR-Reihenkreis .....	273
A4.5	CLR-Reihenkreis für den aperiodischen Grenzfall .....	273
A4.6	CLR-Reihenkreis für schwache periodische Dämpfung .....	275
A4.7	Literatur .....	280
<b>A5</b>	<b>Dimensionierung von Crowbar-Stoßkreisen .....</b>	<b>281</b>
A5.1	Stoßstromgenerator mit Crowbar-Schalter für den 10/350- $\mu$ s-Blitzstrom .....	282
A5.2	Crowbar-Schaltung mit parasitären Elementen und Prüfobjektimpedanz .....	283
A5.3	Literatur .....	285
<b>A6</b>	<b>Dimensionierung von Hybridgeneratoren .....</b>	<b>286</b>
A6.1	Impulsspannung bei Leerlauf des Hybridgenerators .....	286
A6.2	Impulsstrom bei Kurzschluss des Hybridgenerators .....	287
A6.3	Hybridgenerator für 1,2/50- $\mu$ s-Impulsspannung und für 8/20- $\mu$ s-Impulsstrom .....	288
A6.4	Berechnung der Elemente mit Bezug auf den fiktiven Innenwiderstand .....	290
A6.5	Weitere Hybridgeneratorschaltungen .....	291
A6.6	Literatur .....	294