

Felix Erhard

**Beitrag zur Störlichtbogendetektion  
in Photovoltaikanlagen**



Universitätsverlag Ilmenau

2017

# 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 Dissertation vorgelegen.

Tag der Einreichung: 23. August 2016  
1. Gutachter/-in: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Frank Berger  
(Technische Universität Ilmenau)  
2. Gutachter/-in: Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat  
(Technische Universität Braunschweig)  
3. Gutachter/-in: Dr.-Ing. Michael Anheuser  
(Siemens AG, Amberg)  
Tag der Verteidigung: 30. Mai 2017

Technische Universität Ilmenau/Universitätsbibliothek

### **Universitätsverlag Ilmenau**

Postfach 10 05 65  
98684 Ilmenau  
<http://www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag>

readbox unipress  
in der readbox publishing GmbH  
Am Hawerkamp 31  
48155 Münster  
<http://unipress.readbox.net>

**ISSN** 2194-2838 (Druckausgabe)  
**ISBN** 978-3-86360-165-2 (Druckausgabe)  
**URN** urn:nbn:de:gbv:ilm1-2017000246

---

### Titelfotos:

© iStockphoto.com : JLGutierre ; timmy ; 3alexnd ; Elxeneize ; tap10  
yuyang/Bigstock.com

M. Streck, FG EGA | F. Nothnagel, FG EGA | D. Westermann, FG EEV

## **Inhaltsverzeichnis**

### **Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen und Formelzeichen XII**

### **1 Einleitung 1**

### **2. Relevante Betrachtung zur Photovoltaik 11**

2.1 Photoelektrischer Effekt 11

2.2 Grundlagen der Halbleiterphysik 15

2.3 Solarzelle – Funktionsweise und Aufbau 21

2.4 Aufbau einer Photovoltaikanlage 23

### **3. Relevante Betrachtungen zum Lichtbogen 31**

3.1 Der betrachtete Lichtbogen 31

3.2 Physikalische Eigenschaften 36

3.3 Störlichtbögen in Photovoltaikanlagen 41

3.3.1 Entstehungstypen 41

3.3.2 Entstehungsursachen und -orte 43

3.3.3 Gefahrenpotential 44

### **4. Feldversuche und Laborversuche 57**

4.1 Feldversuche 57

4.1.1 Vorrichtungen zur Erzeugung von Lichtbögen 57

4.1.2 Messaufbau und -equipment 66

4.1.3 Ermittlung der Auswirkungen serieller Lichtbögen auf das elektrische Verhalten von Photovoltaikgeneratoren 70

---

4.1.4 Fazit	82
4.1.5 Ermittlung der Auswirkung des Zündmoments serieller Lichtbögen auf das elektrische Verhalten von Photovoltaikgeneratoren	83
4.1.6 Fazit	98
4.2 Laborversuche	99
4.2.1 Messaufbau und -equipment	99
4.2.2 Untersuchung des Zündmoments serieller Lichtbögen	103
4.2.3 Fazit	107
<b>5. Modellbildung und Simulation</b>	<b>109</b>
5.1 Der Photovoltaikgenerator	111
5.1.1 Bestehende Modelle	111
5.1.2 Verwendetes Modell	117
5.1.3 Modifikation zur Anwendung auf Photovoltaikgeneratoren	120
5.1.4 Parameterermittlung	121
5.1.4.1 Ströme und Spannungen	122
5.1.4.2 Widerstände	135
5.1.4.3 Kapazitäten	137
5.1.5 Verifikation des Photovoltaikgenerator-Modells	137
5.2 Die Gleichstromverkabelung	139
5.3 Der Wechselrichter	143
5.4 Der Lichtbogen/das Anregungssignal	146
5.5 Das Gesamtmodell	148
5.6 Experimentelle Verifikation	152
5.7 Alternatives Modellierungs-/Analyseverfahren - Die Übertragungsfunktion	154
5.7.1 Linearisierung der Anlagenschaltung	155

---

5.7.2 Aufstellung des Gleichungssystems des linearisierten Gesamtmodells und Berechnung der exakten Übertragungsfunktion	161
5.7.3 Ermittlung der vereinfachten Übertragungsfunktion des Gesamtmodells	163
5.8 Ergebnisse der Simulation	164
5.9 Fazit	173
<b>6. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>175</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>181</b>
<b>Anhang</b>	<b>205</b>
A. Kennlinien des selbstkonzipierten Lichtbogengenerators	205
B. Technische Daten der verwendeten Solarmodule	206
C. Kennlinien der Lichtbogenentstehungstypen	209
D. Berechnungen zur Übertragungsfunktion	211