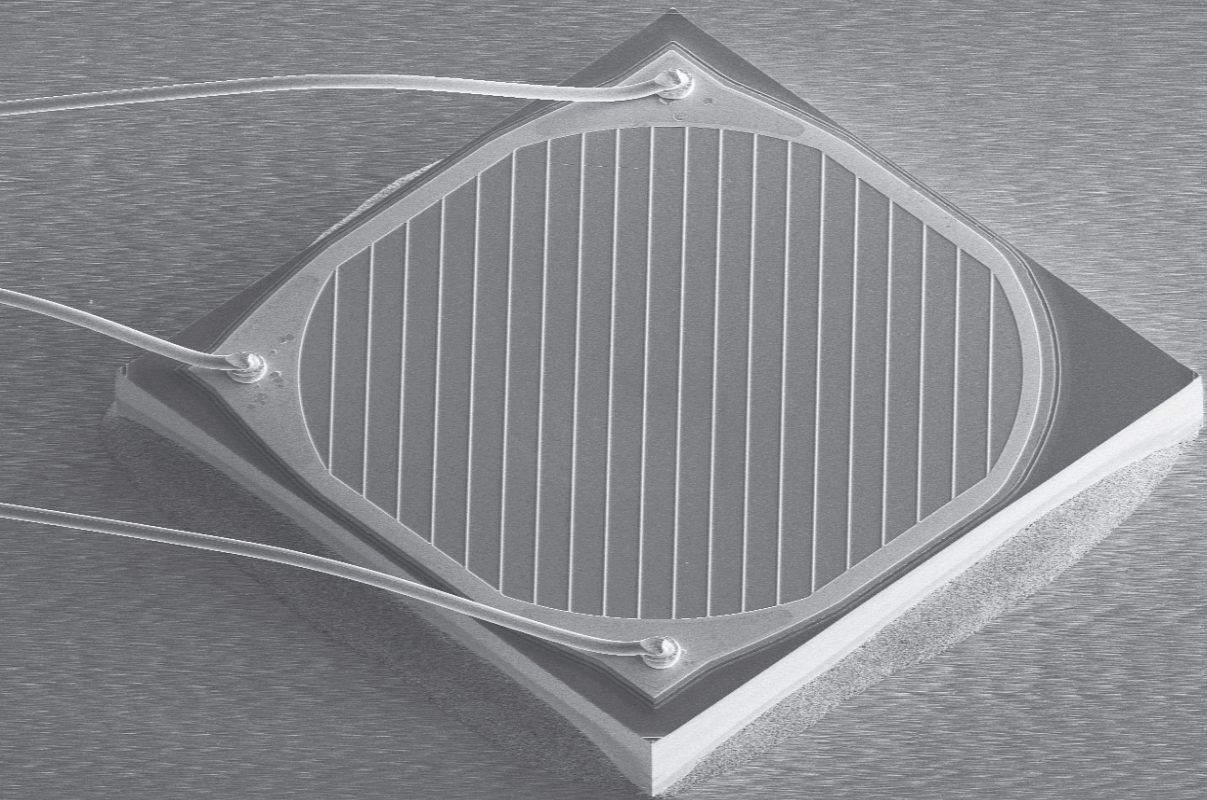


Validierung von Methoden für den Zuverlässigkeitsnachweis von Konzentratorsolarzellen

Fabian Eltermann



Validierung von Methoden für den Zuverlässigkeitsnachweis von Konzentratorsolarzellen

Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der
Technischen Fakultät der
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau

vorgelegt von
Fabian T. Eltermann

geboren in Starnberg

angefertigt am
Institut für Solare Energiesysteme ISE
der Fraunhofer-Gesellschaft (FhG)

in Kooperation mit
der Professur für Aufbau- und Verbindungstechnik am
Institut für Mikrosystemtechnik - IMTEK

Freiburg im Breisgau
März 2018

Dekan

Prof. Dr. sc. nat. Oliver Paul

Referenten

Erstgutachter/Hochschulbetreuer:	Prof. Dr.-Ing. Jürgen Wilde
Zweitgutachter:	Prof. Dr. rer. nat. Stefan W. Glunz
Beisitz:	Prof. Dr.-Ing. Gerald Urban
Vorsitz:	Prof. Dr.-Ing. Frank Balle

Betreuer am FhG-ISE

Dr. rer. nat. Andreas W. Bett

Tag der Abgabe

23.03.2018

Tag der Disputation

19.11.2018

Berichte aus der Mikrosystemtechnik

Fabian Eltermann

**Validierung von Methoden für den
Zuverlässigkeitsnachweis von
Konzentratorsolarzellen**

Shaker Verlag
Aachen 2019

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: Freiburg, Univ., Diss., 2018

Copyright Shaker Verlag 2019

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6551-0

ISSN 1610-5907

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

An dieser Stelle möchte ich mich zunächst ganz herzlich bei all den Personen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Mein besonderer Dank gilt:

Prof. Dr. Jürgen Wilde für das unmittelbare Interesse an dem Thema, die vielen fachlichen Diskussionen, Anregungen und Ratschläge, seine Geduld beim Zusammenfassen, die umfassende Förderung und damit die Chance mein Wissen an seiner Professur auf einen neuen Themenbereich anzuwenden,

Prof. Dr. Stefan W. Glunz für die prompte Bereitschaft die Arbeit als Zweitgutachter zu begleiten, die damit verbundene Unterstützung sowie die motivierenden Zusprüche in der Endphase,

Dr. Andreas W. Bett für die prima Betreuung, seine wissenschaftliche Förderung und seine umfangreiche Unterstützung rund um die Arbeit und darüber hinaus, seine ständige Diskussionsbereitschaft, die vielen damit verbundenen frühmorgendlichen Besprechungen, trotz seines übervollen Terminkalenders und die wunderbare Arbeitsatmosphäre, die er durch sein großartiges Engagement geschaffen hat,

Maike Wiesenfarth für die prima Zusammenarbeit in der Arbeitsgruppe „Konzentratormodule und -systeme“, die vielen Diskussionen um unerklärliche Alterungsphänomene und die Motivation, diese zu erforschen,

Dr. Gerald Siefer für die vielen Diskussionen über Charakterisierung von III-V Solarzellen, krumme Kennlinien, zu hohe Ströme, usw. und die vielen gemeinschaftlichen Besuche des SC Freiburg im Dreisamstadion,

Alexander Dilger, Tobias Dörsam, Dr. Joachim Jaus sowie Sascha van Riesen und Dr. Andreas Gombert für die tolle Zusammenarbeit im ConTEC und die Unterstützung bei der Baugruppenherstellung,

Armin Bösch, Simon Tugend, Matthew Muller und Dr. Marc Steiner für die Unterstützung bei der Herstellung und Charakterisierung von Testmodulen und die tollen Messtage auf dem Q-Dach bei max. Sonnenschein,

Elisabeth Schäffer, Lisa Ziegler, Fatih Sabuncu, Daniel Eckstein, Michael Schachtner, Elvira Fehrenbach, Jutta Zielonka, Dr. Eduard Oliva, Kasimir Reichmuth und Tobias Gandy für die Unterstützung bei Solarzellencharakterisierung und -belastung sowie die Einweisung in die vielzähligen Messplätze und -aufbauten,

meinen Bürokollegen Max Dreger, Jan Buchwald, Arne Kisser, Sebastian Gamisch, Dr. Ulrich Fiedeler, Dr. Thomas Mißbach, Dr. Christoph Rapp, Dirk Frohberger, Kerstin Röder, Dr. Oliver Kraus, Dr. Henning Helmers, Dr. René Kellenbenz, Dr. Peter Fuß-Kailuweit, Dr. Stefan Heckelmann und vielen mehr für die prima Atmosphäre, die großartige Zusammenarbeit, die hilfreichen Diskurse in die Solarzellenphysik, den vielen Stößkram, die gemeinsamen Mountainbike-Touren, die vielen abendlichen Besuche der Boulderhallen und sonstige Aktivitäten in und rund um Freiburg, aus denen tolle Freundschaften entstanden sind,

meinen Arbeitskollegen aus der Abteilung „III-V Photovoltaik und Konzentrator-technologie“ unter der Leitung von Dr. Frank Dimroth für das motivierte Arbeitsumfeld und die Begeisterung am Schneesuhwandern,

meinen Kollegen an der Professur für „Aufbau- und Verbindungstechnik“ u. a. Markus Feißt und Eike Möller für die tolle Integration in das neue Arbeitsumfeld und die schönen Fachgespräche rund um den Fußball,

meinen Freunden Angelika, Arne, Chris, Dani, Don, Hanz, Heppa, Korbi, Jan, Mat, Max, Michou, Moo, Pia, Philip, Raban, Sebastian, Steffen, Tobi und vielen mehr für die vielen Durchhalteparolen in der Endphase,

meiner Familie und besonders meinen Eltern Monika und Alois.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	11
1.1	Motivation	11
1.2	Strategie und Ziele der Arbeit	14
2	Grundlagen und Stand der Technik.....	16
2.1	Mehrfachsolarzellen	16
2.2	Modulaufbau und Solarzellenbaugruppe.....	20
2.3	Optisch-elektrisches Leistungsverhalten	22
2.4	Einsatzbedingungen und Belastungen	23
2.5	Theoretische Degradationsmechanismen	26
2.5.1	System und Modul	27
2.5.2	Baugruppe und Kontaktierung der Solarzelle.....	28
2.5.3	Solarzelle	28
2.5.4	Tabellarische Übersicht	30
2.6	Beschreibung von Degradation, Lebensdauer und Zuverlässigkeit	31
3	Experimentelle Durchführung.....	36
3.1	Untersuchungsstrategie.....	36
3.2	Testbaugruppen bzw. Prüfmuster	37
3.3	Testmodule und Außenteststand.....	39
3.4	Umweltprüfungen und simulierte Belastungen	40
3.4.1	Prüfbedingungen.....	40
3.4.2	Klimakammern und Temperaturprofile	42
3.4.3	Aufbauten zur externen Stromversorgung.....	44
3.5	Übersicht: Optisch-elektrische Charakterisierung.....	45
3.6	Vollautomatischer Blitzlicht-Sonnensimulator	48
3.6.1	Beschreibung	48
3.6.2	Erfassung von Intensitätsänderungen des Leuchtmittels.....	49
3.6.3	Kompensation mittels Referenzmuster	51
3.7	Ergänzende Methoden der Defektanalyse	55
4	Entwicklung von Testmodulen.....	57
4.1	Entwicklungsstrategie.....	57

4.2	Thermische Auslegung.....	58
4.2.1	Wärmetransportmechanismen	58
4.2.2	Thermische Ersatzschaltung und Widerstände	61
4.2.3	Modellierung der Wärmeströme.....	66
4.2.4	Prognose der Solarzellentemperatur	73
4.3	Aufbau der Module.....	79
4.3.1	Installation der Sensoren.....	79
4.3.2	Bestimmung von Kleberschichtdicken auf Bodenplatte.....	81
4.3.3	Nachbildung und Segmentierung für FEM.....	82
4.3.4	Übersicht der Eingabeparameter.....	84
4.3.5	Diskussion der Ersatzschaltung und Temperaturprognose	85
4.4	Validierung der Belastungssteigerung.....	86
4.4.1	Auswahl von Messtagen.....	86
4.4.2	Beschreibung der gemessenen Betriebsbedingungen: $\vartheta_{\max}$, dT/dt und rF	87
4.4.3	Gegenüberstellung der Berechnungsmodelle	94
4.4.4	Vergleich von Messung und Simulation.....	95
4.4.5	Überprüfung der Eingabeparameter	97
4.4.6	Modellanpassung	99
5	Ergebnisse der Feldprüfung	102
5.1	Datenfilter zur Eingrenzung der Umgebungsbedingungen	102
5.2	Langzeitmessung an Testmodulen	103
5.3	Langzeitmessung an Testmodulen mit Modifikation	104
5.4	Beschreibung von Ausfällen.....	106
5.5	Defektanalyse	108
5.5.1	Elektrolumineszenz nach Totalausfall.....	108
5.5.2	Materialanalyse mittels REM, FIB und EDX.....	109
6	Ergebnisse der beschleunigten Alterung	115
6.1	Thermisch.....	115
6.1.1	Temperaturabhängige Leistungsdegradation.....	115
6.1.2	Sprunghafte Leistungsänderung bei Gitterfehlanpassung	116
6.1.3	Dominante Degradationserscheinung	118
6.1.4	Degradation am Metallgitter.....	121
6.1.5	Verbindungsdegradation.....	123

6.2	Thermisch-elektrisch	124
6.3	Elektrisch	125
6.4	Korrosiv	127
6.4.1	Leistungsänderung durch Oberflächenkorrosion	127
6.4.2	Korrosionserscheinungen	132
6.5	Thermisch-zyklisch	133
6.6	Beschreibung der Ausfälle	136
6.7	Defektanalysen	137
6.7.1	Initiale Stromdegradation bei Gitterfehlanspassung	137
6.7.2	Temperatureffekt	143
6.7.3	Beschleunigung des Temperatureffekts über 200 °C	145
6.7.4	Diodenstromeffekt	145
6.7.5	Reflexionsänderung aufgrund von Feuchteeinwirkung	146
6.7.6	Korrosionserscheinungen am Germanium	148
7	Diskussion: Mechanismen, Modellierung und Methoden	150
7.1	Degradationsmechanismen	150
7.2	Modellierung von Reaktionskinetik und Lebensdauer	153
7.3	Bewertung und Optimierung der Prüfmethodik	159
8	Zusammenfassung und Ausblick	163
A	Anhang	166
A.1	Stoffwerte und Bodenplattenausschnitt	166
A.2	Ersatzschaltung in SPICE	167
A.3	Prüfgruppen und Prüfungen	168
B	Verzeichnisse	169
B.1	Variablen und Abkürzungen	169
B.2	Literatur	175
B.3	Normen	191
B.4	Datenblätter	191