

Jahresenergieerträge unterschiedlicher Photovoltaik-Technologien bei verschiedenen klimatischen Bedingungen

Von der Fakultät Informatik, Elektrotechnik und Informationstechnik
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Bastian Zinßer
geboren in Karlsruhe

Hauptberichter: Prof. Dr. rer. nat. habil. Jürgen H. Werner

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Stefan Tenbohlen

Tag der Einreichung: 08.02.2010

Tag der mündlichen Prüfung: 04.10.2010

Institut für Physikalische Elektronik der Universität Stuttgart

2010

Berichte aus der Elektrotechnik

Bastian Zinßer

**Jahresenergieerträge unterschiedlicher
Photovoltaik-Technologien bei verschiedenen
klimatischen Bedingungen**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Aachen 2011

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.: Stuttgart, Univ., Diss., 2010

Copyright Shaker Verlag 2011

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-9965-1

ISSN 0945-0718

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

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung.....	19
1.1 Motivation.....	19
1.2 Literatur	20
1.3 Inhalt dieser Arbeit.....	21
2 Theoretische Grundlagen.....	23
2.1 Aufbau eines PV-Systems.....	23
2.2 Ein-Dioden-Modell der Solarzelle.....	24
2.3 Die Strom-/Spannungskennlinie.....	25
2.4 Temperaturabhängigkeiten.....	26
2.5 Einstrahlungsabhängigkeiten.....	33
2.6 Der Schwachlichtfaktor.....	37
2.7 Analytische Abhängigkeiten der Leerlaufspannung.....	39
2.8 Photostrom und Quantenausbeute.....	41
2.9 Besonderheiten von Cadmiumtellurid	43
3 Aufbau der Testsysteme.....	45
3.1 PV-Technologien – monokristallines Silizium (sc-Si).....	45
3.2 PV-Technologien – multikristallines Silizium (mc-Si).....	48
3.3 PV-Technologien – Dünnschichttechniken.....	49
3.4 Wechselrichter.....	50
3.5 Standorte.....	52
3.5.1 Stuttgart, Deutschland.....	52
3.5.2 Nikosia, Zypern.....	52
3.5.3 Kairo, Ägypten.....	53
4 Messtechnik.....	55
4.1 Einstrahlung.....	56
4.1.1 Pyranometer.....	57
4.1.2 Silizium Einstrahlungssensoren.....	57
4.1.3 Vergleich von Si-Sensor und Pyranometer.....	60
4.2 Spektroradiometer.....	62
4.3 Luft- und Modultemperatur.....	63
4.4 Strom und Spannung, Leistung und Energie.....	64
4.5 Datenerfassung und Speicherung.....	64
4.6 Messtechnik im ipe Labor.....	65
4.6.1 Lichttisch.....	65
4.6.2 Dunkelkennlinien.....	66
5 Auswertungen.....	69
5.1 Modulmessungen.....	69

5.1.1 Dunkelkennlinien.....	69
5.1.2 Hellkennlinien.....	72
5.1.3 Unterschiedliche STC Leistungsangaben der Solarmodule.....	72
5.1.4 Schwachlichtverhalten im Labor.....	76
5.2 Wetterbedingungen.....	79
5.2.1 Einstrahlung.....	79
5.2.2 Modultemperatur.....	80
5.2.3 Verschmutzung.....	83
5.3 Felddatenauswertung.....	83
5.4 Temperaturverhalten.....	84
5.4.1 Fehlerrechnung Temperaturkoeffizienten.....	90
5.5 Schwachlichtverhalten.....	91
5.5.1 Fehlerrechnung zum Schwachlichtwirkungsgrad.....	94
5.6 Spektralverhalten.....	95
5.7 Jahresenergieerträge.....	97
5.8 Performance Ratio.....	101
6 Modellierung der Jahresenergieerträge.....	103
6.1 Einfache Ertragsabschätzung.....	106
6.2 Betrieb unter STC Bedingungen.....	106
6.3 Berücksichtigung der Modultemperatur.....	108
6.4 Wechselrichter.....	111
6.5 Berücksichtigung der Reflexion.....	114
6.6 Modellierung mit dem Ein-Dioden-Modell.....	115
6.7 Simulation mit INSEL.....	117
6.8 Vergleich der verschiedenen Modellierungsverfahren.....	119
7 Ergänzende Ergebnisse.....	121
7.1 Jahresenergieerträge in Kairo.....	121
7.2 Polarisationsseffekt bei SunPower Rückseitenkontaktsolarzelle.....	123
7.3 Nachführung.....	125
7.4 Einfluss des Jahresenergieertrages auf die Wirtschaftlichkeit.....	127
8 Ausblick.....	129
9 Anhang.....	131
9.1 Abkürzungsverzeichnis.....	131
9.2 Abbildungsverzeichnis.....	133
9.3 Tabellenverzeichnis.....	135
9.4 Literaturverzeichnis.....	136
9.5 Veröffentlichungen.....	142
9.6 Lebenslauf.....	144
9.7 Erklärung.....	144
9.8 Danksagung.....	145