

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Photovoltaische Generatoren	5
2.1	Die Solarzelle	5
2.2	Das Solarmodul	9
2.3	Aufbau und Herstellung	11
2.4	Schindelverschaltung von Solarzellen	12
2.5	Charakterisierung von Solarmodulen	17
2.6	Thermische Wechsellasttests	23
3	Verschattungsresilienz von Schindelsolarmodulen	25
3.1	Numerische Berechnung von Verschattungsverlusten	27
3.2	Einstrahlungsäquivalenz	28
3.3	Elektrisches Modell für Solargeneratoren	31
3.3.1	Erweitertes Zwei-Dioden-Modell	31
3.3.2	Bestimmung der Modellparameter	33
3.3.3	Superposition von Kennlinien	36
3.3.4	Modullayouts	39
3.3.5	Lateraler Widerstand	43
3.4	Modellvalidierung	44
3.4.1	Quantitative Validierung über I - V -Kennlinienmessungen bei Verschattung	45
3.4.2	Qualitative Validierung modulinterner Stromflüsse mittels Magnetic Field Imaging	49
3.5	Theoretischer Vergleich der Schindel-Layouts	55
3.5.1	Stromausbeute	56

3.5.2	Füllfaktoreffekt	59
3.6	Kombinatorischer Ansatz zur Modellierung von Verschattungen	64
3.6.1	Ziars Gleichung	64
3.6.2	Charakteristische Verteilung der mittleren Einstrahlung	67
3.6.3	Rekursive Bestimmung der K^{av}	71
3.6.4	Charakteristische Verteilung der Leistung	74
3.7	Monte Carlo Simulationen zur Bestimmung des globalen Leistungsmittelwerts $\bar{P}^{av}$	77
3.7.1	Prüfung der charakteristischen Verteilungen	78
3.7.2	Konvergenz	80
3.7.3	Berechnung realer Modullayouts	83
3.7.4	Einfluss von Bypassdioden	84
3.8	Realitätsnahe Schattenformen	89
3.8.1	Parametrisierung	91
3.8.2	Bewertung der Verschattungsresilienz	95
3.8.3	Einfluss des lateralen Widerstands	98
3.8.4	Verschattungsresilienz für zufällige Schattencluster	100
3.8.5	Verschattungsresilienz für rechteckige Verschattungen	104
3.9	Freifeld Ertragsexperiment	108
3.10	Kapitelzusammenfassung	111

4 Thermomechanische Schädigung der Schindelfügestelle 115

4.1	Methodik	115
4.2	Berechnung thermomechanischer Spannungen	118
4.2.1	Mechanische Spannungen und Dehnungen	118
4.2.2	Formulierung von Randwertproblemen	121
4.2.3	Finite Elemente Methode	123
4.2.4	Konstitutive Gesetze	125
4.3	Versagensthypothesen für Silicium und leitfähige Klebstoffe	136
4.3.1	Weibullanalyse für keramische Werkstoffe	136
4.3.2	Versagensthypothesen für Klebungen	141
4.4	Finite Elemente Modelle	145
4.4.1	Modellgeometrien	145

4.4.2	Vernetzung und Netzunabhängigkeit	149
4.5	Schädigung der Fügestelle im Experiment	151
4.5.1	Dehnungszustand der Fügestelle	153
4.5.2	Beschleunigte Alterungsexperimente	154
4.5.3	Analyse der Fügstellenmikrostruktur	159
4.5.4	Zusammenfassung der Erkenntnisse zur Degradation der Schindelfügestelle	167
4.6	Schädigung der Solarzellen im Experiment	168
4.6.1	Defektbeschreibung und Hypothese	168
4.6.2	Finite Elemente Simulationen	174
4.6.3	Anisotrope Thermische Dehnung	179
4.6.4	Reduktion des Versagensmechanismen	184
4.6.5	Zusammenfassung der Erkenntnisse zur Rissbildung in den So- larzellen	190
4.7	Kapitelzusammenfassung	191
5	Zusammenfassung und Ausblick	193
5.1	Verschattungsresilienz	193
5.2	Fügstellenzuverlässigkeit	196

Literaturverzeichnis	199
Akronym- und Symbolverzeichnis	215
A Appendix	225
A.1 Thermomechanische Schädigung der Schindelfügestelle	225
A.1.1 Lineare Viskoelastizität	225
A.1.2 Dynamisch Mechanische Analyse	228
A.1.3 Gültigkeit der Zeit-Temperatur-Superposition	241
A.1.4 Auftragsmengen Schablonendruckverfahren	242
A.1.5 Röntgentransmissionsmikroskopie	244
A.1.6 Zelldegradation des Referenzsystems in Alterungsexperimenten	246
A.1.7 Konversionstabelle elastischer Konstanten	248
A.2 Verschattungsverluste von Schindelsolarmodulen	249
A.2.1 Widerstand Metallisierung	249
A.2.2 Verteilung Einstrahlungswerte i_j	250
A.2.3 Fehler zwischen analytischer und konvergierter ST	250
A.2.4 Codebeispiele	251
B Publikationsliste	253
C Curriculum Vitæ	255