

Alterungserscheinungen bei Photovoltaikmodulen Langzeiterfahrung einer PV-Testanlage an der TU-Berlin

*DR.-ING. VOLKER QUASCHNING, DIPL.-ING. AXEL GROCHOWSKI
UND PROF. DR.-ING. HABIL. ROLF HANITSCH*

Technische Universität Berlin · Institut für Elektrische Energietechnik

Sekr. EM4, Einsteinufer 11, D-10587 Berlin

Tel.: 030/314-25394 · Fax: 030/314-21133

E-Mail: Volker.Quaschning@iee.tu-berlin.de · <http://www.iee.tu-berlin.de/personen/quasch>

1 Einleitung

Seit mehr als 20 Jahren wird an der TU Berlin im Fachgebiet Elektrische Energietechnik Forschung im Bereich der Solarenergie betrieben. Hierbei wurden in verschiedenen Jahren Photovoltaikmodule beschafft. Die ältesten Module stammen aus dem Jahr 1977 und befinden sich zusammen mit neueren Modulen auf dem Dach des Institutsgebäudes. Da einige Module bereits starke optische Schäden aufweisen, wurde eine umfangreiche Analyse der Alterungserscheinungen der Module durchgeführt, die eine visuelle Überprüfung und eine elektrische Leistungsüberprüfung umfaßte. Anhand der Ergebnisse dieser Untersuchung lassen sich generelle Aussagen über die zu erwartende Lebensdauer und das Auftreten von Alterungserscheinungen treffen. Weiterhin können anhand der Untersuchungen Abschätzungen der Leistungseinbußen aufgrund bestimmter Alterungserscheinungen erfolgen, die sich auch auf andere Module übertragen lassen.

Insgesamt wurden 98 Module aus vier verschiedenen Baureihen aus den Jahren 1977, 1982 und 1984 untersucht. Von sämtlichen Modulen wurden die U-I-Kennlinien aufgenommen und daraus die MPP-Leistung bei Standardtestbedingungen bestimmt. Diese Leistung wurde dann mit den Herstellerangaben aus den jeweiligen Datenblättern (siehe Tabelle 1) verglichen und Aussagen über Leistungseinbußen und Fehler einzelner Module gemacht.

Tabelle 1: Datenblatt-Informationen der untersuchten Solarmodule

Baureihe	MQ 32	PQ 10/10	PQ 10/20	PQ 10/40
Hersteller	AEG Telefunken	AEG	AEG	AEG
Baujahr	1977	1982	1984	1984
MPP-Leistung	9,2 W _p	9,2 W _p	19,2 W _p	38,4 W _p
Zellwirkungsgrad	11,5 %	9,2 %	9,6 %	9,6 %
Modulwirkungsgrad	8,5 %	6,8 %	7,4 %	7,7 %
Kurzschlußstrom	0,685 A	2,22 A	2,41 A	2,41 A
Leerlaufspannung	18,7 V	5,6 V	11,2 V	22,4 V
Zellenzahl je Modul	32	10	20	40
Material	Si-monokristallin	Si-polykristallin	Si-polykristallin	Si-polykristallin
Modulhöhe	450 mm	556 mm	563 mm	1076 mm
Modulbreite	240 mm	243 mm	459 mm	462 mm
Zellgröße	50 · 50 mm ²	100 · 100 mm ²	100 · 100 mm ²	100 · 100 mm ²
Anzahl der Module	20	60	9	9

2 Sichtbare Alterungserscheinungen der Module

2.1 Ursachen der Alterungserscheinungen

Einen erheblichen Einfluß auf die Leistungsausbeute hat das sogenannte Browning, die Gelb- oder Braunfärbung der Kunststoffeinkapselung infolge von UV- und Wärmestrahlung. Weitere Defekte der Module können als Folge des Brownings entstehen, so z.B. Zellausbleichung, Blasenbildung beim Kunststoff, Degradation des Kunststoffs und zum Teil auch Zellkorrosion. Durch die erhöhte Wärmeabsorption wird die Kunststoffverfärbung im Laufe der Betriebszeit sogar noch verstärkt /1//2/.

Zellkorrosion tritt als Folge von Glasbruch, Browning und Kunststoffdegradation und dem damit verbundenen Eindringen von Feuchtigkeit auf und führt an den betroffenen Modulen ebenfalls zu Einstrahlungseinbußen und erhöhter Wärmeentwicklung sowie zu schadhafte Veränderungen der Kunststoffeinkapselung und der Zellstruktur.

Beschädigungen sehr kleiner Zellflächen entstehen aufgrund von Hot Spots. Dieser Effekt kann als Folge von Teilabschattungen auftreten /3//4/. Die Spannung der abgeschatteten Zelle wird negativ, so daß die Zelle als Verbraucher arbeitet. Die Leistung wird in Wärme umgesetzt. Die Sonnenstrahlung erhitzt zusätzlich die Solarzelle, wodurch Kunststoffblasen sowie thermische Schäden an der Einkapselung und am Zellmaterial auftreten können.

2.2 Klassifizierung der Fehler

Sämtliche Module wurden auf sichtbare Alterungserscheinungen überprüft. Bei den Modulen der Baureihe PQ 10/40 waren bis auf eine leichte alterungsbedingte Trübung des Kunststoffes keine Fehler zu erkennen. Bei den Modulen der Baureihe PQ 10/20 wiesen zwei Module montagebedingte Glasbrüche mit geringer Zellkorrosion auf.

Bei den Modulen der Baureihen PQ 10/10 und MQ 32 konnten verschiedene Fehler wie Glasbruch, Browning, Degradation und Blasenbildung beim Kunststoff der Einkapselung, Hot Spots, Zellkorrosion, Zellausbleichung und Fertigungsfehler bei allen Modulen beobachtet werden.

Bei sämtlichen Modulen der Baureihe PQ 10/10 war ein mehr oder minder starkes Browning der Kunststoffeinkapselung sowie Zellkorrosion zu erkennen. Bei 67 % der Module sind Zellausbleichungen, zum Teil bis zur Farblosigkeit einzelner Zellen, aufgetreten. Kunststoffblasen, besonders als Folge starker Zellkorrosion, waren an 38 % der Module zu erkennen. 35 % der Module wiesen Fertigungsfehler, 10 % Kunststoffdegradation, 7 % Hot Spots und ein Modul Glasbruch auf.

Bei der Baureihe MQ 32 wurde vor allem eine Verfärbung der Kunststoffeinkapselung und der Glasabdeckung am unteren Modulrand sowie Zellkorrosion und kleinere Fertigungsfehler beobachtet. Kunststoffblasen und Kunststoffdegradation waren nur in geringem Maße zu erkennen. Glasbruch war nur bei einem Modul vorhanden. Obwohl sich der Glasbruch über das gesamte Modul erstreckte, war keine besondere Auswirkung auf die Kennlinie des Moduls zu erkennen.

Beim Vergleich der einzelnen Modulreihen untereinander ist deutlich zu erkennen, daß die älteren Baureihen MQ 32 und PQ 10/10 deutlich mehr Fehler aufweisen (Bild 1). Dies ist nur zu einem sehr geringen Teil auf das höhere Alter der Module zurückzuführen. Ein Hauptgrund hierfür liegt in den verwendeten Materialien für die Kunststoffeinkapselung. Die Materialien der neueren Baureihen haben sich als deutlich langzeitstabiler erwiesen. Somit sind durch

Fortschritte bei den Materialien bei heute erhältlichen Modulen keine Fehler in dem hier festgestellten Ausmaß zu erwarten.

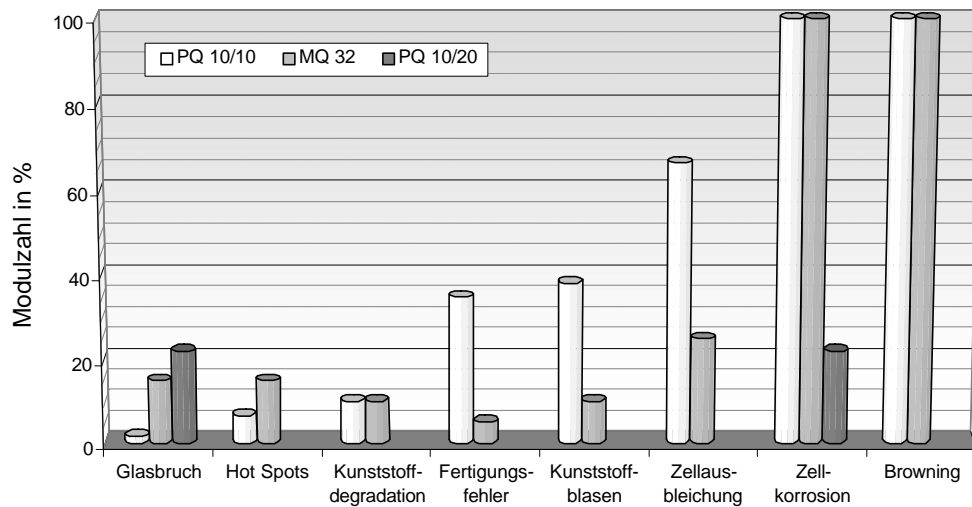


Bild 1: Sichtbare Alterungserscheinungen unterteilt nach Fehlerarten bei den verschiedenen Baureihen

3 Leistungsverluste der Module

Wie bereits zuvor erwähnt, wurden bei allen Modulen die U-I-Kennlinien im Freiland aufgenommen und daraus die Zellparameter wie Photostrom, Parallelwiderstand, Serienwiderstand und Sättigungsstrom bestimmt. Mit Hilfe einer Simulation wurde dann die Kennlinie auf Standardtestbedingungen (Bestrahlungsstärke $E = 1.000 \text{ W/m}^2$, Temperatur $J = 25^\circ\text{C}$) umgerechnet und aus der so gewonnenen Kennlinie der MPP (Punkt maximaler Leistung) ermittelt.

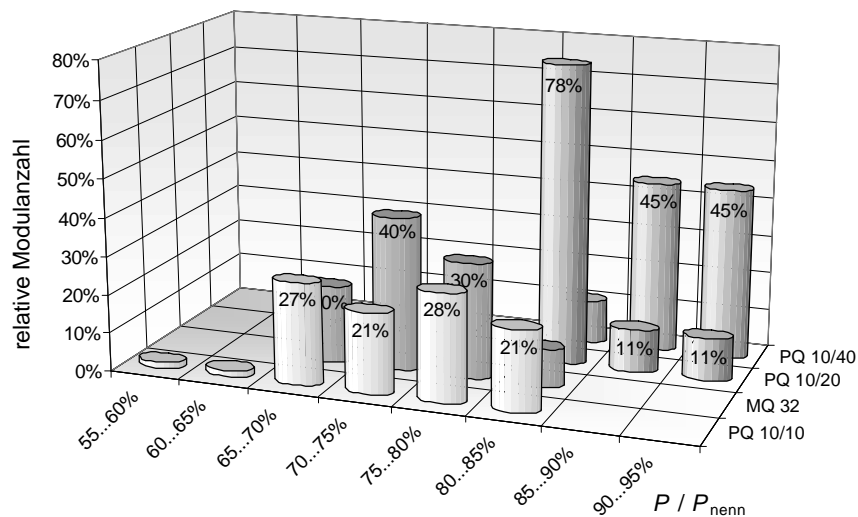


Bild 2: Relativer Anteil der Module der verschiedenen Baureihen mit der jeweiligen Leistungsabgabe bezogen auf die Nennleistung aus den Datenblättern

Die elektrischen Leistungsverluste der einzelnen Module betragen gegenüber den Angaben aus dem Datenblatt des Herstellers zwischen 7,2 % beim besten Modul aus der Baureihe PQ 10/40 und 43,6 % beim schlechtesten Modul der Baureihe PQ 10/10. Trotz der zum Teil gravierenden sichtbaren Beschädigungen war bei den Modulen kein einziger Totalausfall festzustellen. Tabelle 2 zeigt den Bereich der Leistungseinbußen der unterschiedlichen Baureihen. Eine genaue Klassifizierung in Leistungsklassen ist Bild 2 zu entnehmen. Bei den neueren Modulreihen können die jährlichen Leistungsverluste auf etwa 1 % beziffert werden.

Tabelle 2: Ermittelte Leistungseinbußen aller Module der jeweiligen Baureihen

	MQ 32	PQ 10/10	PQ 10/20	PQ 10/40
minimale Leistungseinbußen	17,3 %	16,4 %	9,1 %	7,2 %
maximale Leistungseinbußen	33,8 %	43,6 %	18,2 %	16,2 %
durchschnittliche Leistungseinbußen	26,3 %	25,8 %	14,9 %	10,5 %
durchschnittliche jährliche Leistungseinbußen	1,3 %/a	1,7 %/a	1,1 %/a	0,8 %/a

4 Einfluß der Alterungserscheinungen auf bestimmte Zellparameter

Die Höhe der Leistungseinbußen wird durch optische Fehler in besonders starkem Maße bestimmt. So werden durch das Browning der Kunststoffeinkapselung, Korrosion und Ausbleichung der Zellen sowie Kunststoffblasenbildung die stärksten Änderungen in den Kennlinien verursacht. Geringen Einfluß auf die Leistung der Module haben Glasbruch und leichte Fertigungsfehler sowie Hot Spots und Kunststoffdegradation. Da Glasbruch jedoch unweigerlich zu Zellkorrosion und Schädigung des Kunststoffes führt, kann auch dieser Fehler erhebliche Leistungsverluste nach sich ziehen. Die Veränderung der spezifischen Zellparameter nur aufgrund von Glasbruch konnte nicht festgestellt werden.

Eine deutliche **Verringerung des Kurzschlußstromes** ist auf Browning zurückzuführen. Die Verluste reichen von 3 % bei leichtem Browning aller Zellen, etwa 7 % bei mittlerem Browning bis zu 25 % bei starkem Browning. Bei allen Modulen der Baureihe MQ 32 wirkt sich eine starke Verschmutzung der unteren vier Zellen als Teilabschattung aus, welches die erheblichen Verluste erklärt. Ähnliche Einbußen des Kurzschlußstroms werden durch die Zellausbleichung an den betreffenden Modulen hervorgerufen. In Verbindung mit Browning können diese bis zu 27 % betragen. Da die Zellausbleichung an den untersuchten Modulen nur in Verbindung mit Browning auftritt, können keine Aussagen über die Höhe der Verluste, welche sich ausschließlich aus der Zellausbleichung ergeben, gemacht werden.

Die Ursache für die Veränderung des Sperr sättigungsstroms bzw. Kurzschlüsse in einzelnen Zellen und die damit verbundene **Verringerung der Leerlaufspannung** liegt vor allem bei der Zellkorrosion. Die Verluste liegen zwischen 5 % bei leichter, etwa 7 % bei mittlerer und bis zu 12 % bei schwerer Korrosion. Durch die Verkleinerung des Parallelwiderstands können außerdem Verluste der maximalen Leistung von 23 % auftreten, ohne daß die Verkleinerung des Kurzschlußstroms oder der Leerlaufspannung berücksichtigt ist.

Für die Bewertung des Alterungszustandes eines Solarmoduls ist die Höhe der Leistungsverluste entscheidend, welche bei einem bestimmten optischen Fehler unter Berücksichtigung der Schwere des Schadens zu erwarten ist. Aus der statistischen Auswertung der Module der Baureihe PQ 10/10 und MQ 32 können die folgenden Schlußfolgerungen getroffen werden:

Leichtes Browning führt zu 11 % an **Leistungseinbußen**, mittleres Browning in Verbindung mit Zellausbleichung zu etwa 22 % und schweres Browning in Verbindung mit Zellaus-

bleichung zu über 30 %. Die Leistungsverluste infolge von Zellkorrosion betragen 5 % für leichte, 8 % für mittlere und 12 % für schwere Schäden.

Leistungseinbußen aufgrund der anderen beschriebenen optischen Fehler können nicht explizit ermittelt werden, da diese nur in Verbindung mit anderen Defekten auftreten und oftmals in ihrer Wirkung die Zellparameter nur geringfügig beeinflussen. Insbesondere gilt dies für Hot Spots, bei denen meist nur ein einziger Punkt der Zellfläche zerstört ist, und für Fertigungsfehler. Diese können zum einen durch unsymmetrisches Auflöten der Leitungszüge zu geringfügig höheren Abschattungen führen, zum anderen geht durch Wegbrechen von Zellmaterial beim Sägen der Wafer ein Teil der Zellfläche verloren. Die Größe des fehlenden Zellmaterials im Verhältnis zur Gesamtfläche der Solarzelle ist kleiner als 1 %. Auf die Modulfläche bezogen kann dieser Fertigungsfehler vernachlässigt werden. Eine quantitative Auswertung der Verluste aufgrund von Kunststoffblasen kann ebenfalls nicht getroffen werden, da diese vor allem am Modulrand auftreten und nur eine geringe Zellfläche überdecken. Ähnliches gilt für die Auswirkungen durch Kunststoffdegradation. Die Leistungsverluste aufgrund der Kunststoffdegradation werden von den Verlusten, die sich aus starker Zellkorrosion und starkem Browning ergeben, überdeckt.

5 Zusammenfassung

Solarmodule werden zu recht als die zuverlässigste Komponente photovoltaischer Energiesysteme bezeichnet. Wie diese Untersuchungen gezeigt haben, sind an einigen Modulen zwar erhebliche Alterungserscheinungen, verbunden mit entsprechenden Leistungsverlusten, zu erkennen. Komplette Modulausfälle wurden jedoch nicht festgestellt. Selbst die 20 Jahre alten Module der Baureihe MQ 32 waren nicht davon betroffen. Ebenso war kein Modul von schweren Fertigungsfehlern wie Zellbruch, schlechter Kontaktierung oder Kontaktunterbrechung betroffen. Der Defekt mit den höchsten Leistungsverlusten ist die Verfärbung der Kunststoffeinkapselung (Browning), welche auch einige andere optische Fehler nach sich zieht. Die maximalen Leistungsverluste betragen 43,6 %.

Neuere Kunststoffverbindungen weisen auch nach längeren Betriebszeiten bei Modultemperaturen über 70 °C keine Degradation und nur eine leichte Verfärbung auf, so daß die Leistungsverluste aufgrund dieses Defekts bei heutigen Modulen wesentlich geringer sind. Bei Einsatz von Photovoltaikmodulen in tropischen Regionen werden jedoch aufgrund extremer klimatischer Bedingungen auch heute noch starke Fehler bereits nach wenigen Jahren beobachtet. Bei den neueren hier untersuchten Modulen ergaben sich unter mitteleuropäischen Klimabedingungen Leistungsverluste von unter 1 %/a. Somit ist zu erwarten, daß neu errichtete Anlagen hierzulande auch nach einer Betriebszeit von über 20 Jahren einen zufriedenstellenden Ertrag liefern werden.

Literatur

- /1/ Berman, D.; Biryukov, S.; Faiman, D.: EVA laminate browning after 5 years in grid-connected mirror-assisted, photovoltaic systems desert: effect on module efficiency. In: Solar Energy Materials and Solar Cells 36 1994, pp. 421-432.
- /2/ Pern, F.J.: Factors that effect the EVA encapsulant discoloration rate upon accelerated exposure. In: Solar Energy Materials and Solar Cells 41/42 1996, pp. 587-615.
- /3/ Quaschnig, V.: Simulation der Abschattungsverluste bei solarelektrischen System. Verlag Dr. Köster Berlin 1996.
- /4/ Quaschnig, V.: Regenerative Energiesysteme. Carl Hanser Verlag München 1998.