

Untersuchung von Alterungseffekten bei monokristallinen PV-Modulen mit mehr als 15 Betriebsjahren durch Elektrolumineszenz- und Leistungsmessungen

Katharina Schulze*, Manfred Groh*, Monika Nieß*, Christian Vodermayr*,
Gerald Wotruba* und Gerd Becker**

*BEC-Engineering GmbH

An der Leiten 39, 85662 Ottersberg, Deutschland

Tel.: +49 8121 884567-0, Fax: +49 8121 884567-88

E-Mail: info@bec-engineering.de Internet: <http://www.bec-engineering.de>

**Solarenergieförderverein Bayern e. V.

Elisabethstraße 34, 80796 München, Deutschland

Tel.: +49 89 27813428, Fax: +49 89 27312891

E-Mail: becker@ee.hm.edu Internet: <http://www.sev-bayern.de>

1. Einleitung

Degradationseffekte durch Umgebungsbedingungen und das Langzeitverhalten von PV-Modulen sind über die letzten Jahre immer wieder Gegenstand von Untersuchungen gewesen ([1], [2]). Optische Inspektion, Elektrolumineszenz- und Leistungsmessungen stellen dabei etablierte Hilfsmittel zur Untersuchung sowie zur Qualitätssicherung dar. Ziel dieser Veröffentlichung ist es, den Zustand von monokristallinen Modulen nach 15 und mehr Jahren Betrieb darzustellen.

2. Historie der untersuchten Module

Im Zeitraum 1994 bis 1998 erhielten über 900 Schulen in Deutschland Photovoltaikanlagen mit einer Nennleistung von jeweils ca. 1 kWp. Koordiniert und wissenschaftlich begleitet wurde dies durch den Solarenergieförderverein Bayern e.V.. Die PV-Module wurden an verschiedensten Orten montiert, auf Flachdächern, auf Schrägdächern und auf dem Boden. Eingesetzt wurden monokristalline Module mit einer Nennleistung von 53, 55 und 110 Wp. Da viele Schulen, besonders im ländlichen Raum, in den letzten Jahren geschlossen wurden, hat man die dort montierten Module zurückgenommen, teilweise an andere Schulen und Nutzer weitergegeben oder bis zur weiteren Verwendung eingelagert. Eine repräsentative Stichprobe von 254 Modulen aus diesen Anlagen wurde im Rahmen dieser Veröffentlichung mittels Elektrolumineszenz und einem Sonnenlichtsimulator [5] auf Alterungserscheinungen hin untersucht.

3. Zustand der untersuchten Module

Die Anzahl der untersuchten Modultypen mit elektrischen Kenndaten sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Elektrische Kenndaten der untersuchten Stichprobe monokristalliner Module laut Datenblatt (STC)

Modultyp	A	B	C
Nennleistung P_{\max} [W]	53	55	110
Anzahl der Zellen pro Modul	36	36	72
Leerlaufspannung V_{oc} [V]	21,7	21,7	43,5
Kurzschlussstrom I_{sc} [A]	3,35	3,40	3,45
Spannung, max V_{mpp} [V]	17,4	17,4	35
Stromstärke, max, I_{mpp} [A]	3,05	3,15	3,15
Wirkungsgrad η [%]	12,46	12,93	12,67
Anzahl der untersuchten Module	140	91	23

Um eine Beeinflussung der Messergebnisse aufgrund von Verunreinigung der Module auszuschließen, wurden die Module auf der Vorderseite gereinigt und von Verschmutzungen, Staub und Moosablagerungen befreit. Bei wenigen Modulen wurde eine Trübung der Glasoberfläche vor allem am Modulrand festgestellt. Zwei Module der Stichprobe mit gebrochenem Frontglas wurden nicht weiter untersucht. Im Übrigen zeigten die Module bei visueller Inspektion keine Auffälligkeiten, die einen weiteren Betrieb der Module ausschließen.

3.1 Sichtbare Alterungserscheinungen

Beim Großteil der untersuchten Stichprobe ist eine silbrige Verfärbung, vermutlich Delamination, vor allem im Bereich um die Busbars zu erkennen (siehe Abbildung 1 links und Mitte). Bei etwa 15 Prozent (38 Module) ist die Delamination sehr stark ausgeprägt (siehe Abbildung 1 rechts und Abbildung 9). Man erkennt die milchig erscheinende Ablösung des EVA-Materials von der Zelle. Trotz der Delamination bleibt die Leistungsdegradation im vom Hersteller vorgegebenen Bereich.

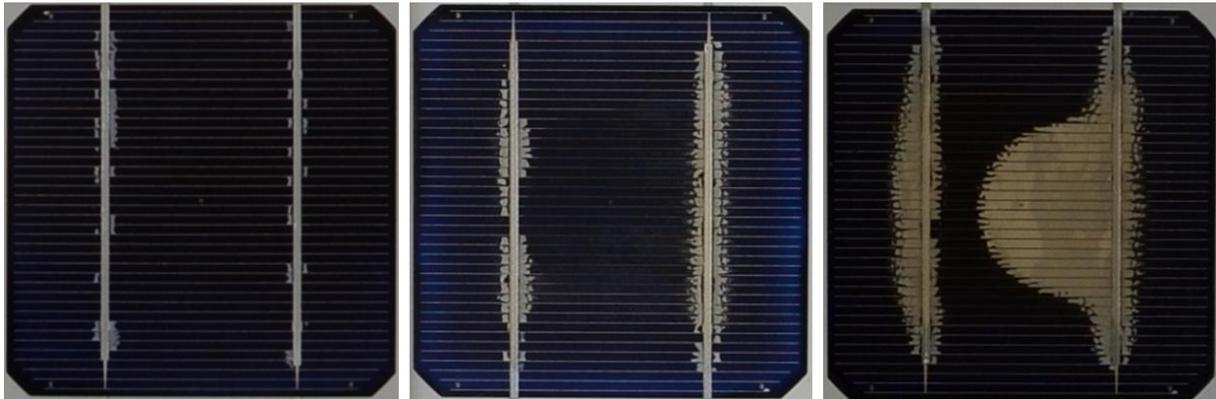


Abbildung 1: Unterschiedlich stark ausgeprägte Delamination

Links: Stufe 1, kleine isolierte Bereiche

Mitte: Stufe 2, kleine zusammenhängende Bereiche

Rechts: Stufe 3, große zusammenhängende Bereiche

Ein weiterer Alterungseffekt, eine Braunverfärbung der EVA-Folie [2] (siehe Abbildung 2) tritt bei 32 Modulen der Stichprobe auf. Es handelt sich ausschließlich um Module mit einer Nennleistung von 53 Watt, von denen 23 Prozent betroffen sind. Die Verfärbung ist vor allem in der Zellmitte sichtbar und am Zellrand weniger stark ausgeprägt.



**Abbildung 2: Braunverfärbung
der EVA-Folie**

Bei vielen Modulen sind vereinzelt Zellen vorhanden, die entweder ganz oder teilweise, am Rand oder aber auch mittig, heller und verblichener erscheinen als normale Zellen. Dies kann auf eine während der Herstellung unterschiedlich dick aufgebrauchte Antireflexionsschicht zurückzuführen sein.

Tabelle 2 zeigt die statistische Verteilung einiger beobachteter Effekte auf Zellebene, den Anteil von Modulen mit braun verfärbten Zellen sowie den Anteil von Modulen, die Delamination aufweisen. Die zur Klassifizierung der Delamination verwendeten Stufen sind in Abbildung 1 links (Stufe 1, kleine isolierte Bereiche), Abbildung 1 Mitte (Stufe 2, kleine zusammenhängende Bereiche) und Abbildung 1 rechts (Stufe 3, große zusammenhängende Bereiche) zu sehen.

Tabelle 2: Beobachtete Effekte auf Modulebene (VIS-Untersuchung)

Nennleistung	Gesamte Anzahl der Module	Anteil der Module mit Braunverfärbung	Anteil der Module mit Delamination			
			ohne	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3
53 Wp	138	23% (32)	14% (19)	4,3% (6)	57% (78)	25% (35)
55 Wp	91	0	17% (17)	12% (11)	66% (60)	3,3% (3)
110 Wp	23	0	0	0	100% (23)	0
Alle	252	--	14% (36)	6,7% (17)	64% (161)	15% (38)

3.2 Auffälligkeiten in den Elektrolumineszenz-Aufnahmen

Von allen untersuchten Modulen wurden Elektrolumineszenz-Aufnahmen angefertigt. Der Elektrolumineszenz-Effekt im sensitiven Wellenlängenbereich der Kamera war schwach ausgeprägt, es waren hohe Ströme und Spannungen sowie lange Belichtungszeiten erforderlich, um eine verwertbare, wenn auch noch immer leicht unscharfe Aufnahme zu erhalten. So gut wie alle Module weisen Gridfingerfehler auf.

Eine weitere Auffälligkeit bilden kreisförmige dunkle Flecken, exemplarisch in Abbildung 3 dargestellt, die unterschiedlich häufig an den Modulen auftreten, aber nur auf zwei Modulen nicht zu finden waren. Die geometrische Anordnung der Flecken legt die Vermutung nahe, dass es sich um Spuren von Handling-Apparaten in der Fertigung handelt.

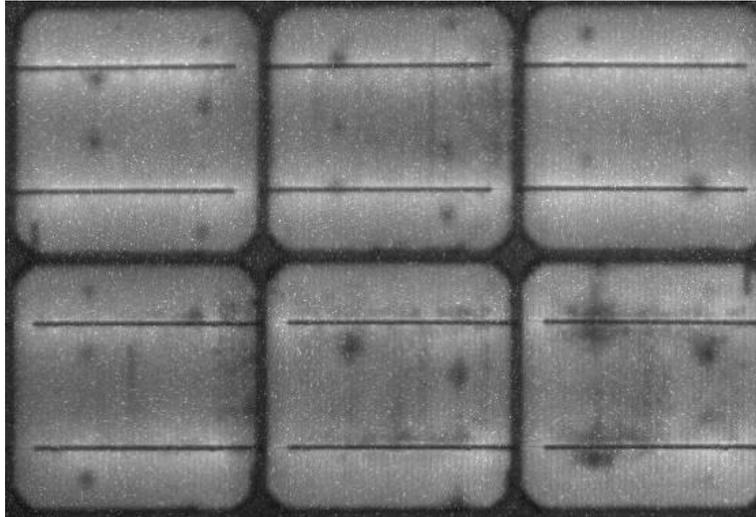


Abbildung 3: Runde dunkle Flecken

Etwa 40 Prozent der Module wiesen eine oder mehrere Zellen mit Haarrissen oder Brüchen auf. Unter gebrochenen Zellen werden hier solche mit elektrisch abgetrennten und inaktiven Zellbereichen verstanden (siehe Abbildung 4 Mitte und rechts). Zellen mit Haarrissen und abgetrennten Zellbereichen kommen gehäuft in Modulen mit 53 Wp Nennleistung vor. Im Vergleich zu aktuellen Modulen ist die Zahl an Brüchen für schon einmal installierte Module jedoch eher gering. In den 1990er Jahren wurden um ein mehrfaches dickere Zellen (geschätzt auf 300-400 μm) als gegenwärtig ($\sim 150\text{-}200 \mu\text{m}$) produziert, die anscheinend etwas weniger anfällig für Zellbrüche sind.



**Abbildung 4: Elektrolumineszenz-Aufnahmen von verschiedenen Zellbrüchen der Stichprobe:
Links Haarriss, Mitte und rechts Bruch mit abgetrennten Zellbereichen**

Zu Bemerkem ist, dass bei einem Modul eine Zelle mit einem in der Elektrolumineszenz-Aufnahme sichtbaren Kreuzbruch, eine visuell erkennbare sogenannte Schneckenspur [3] aufweist (siehe Abbildung 5).

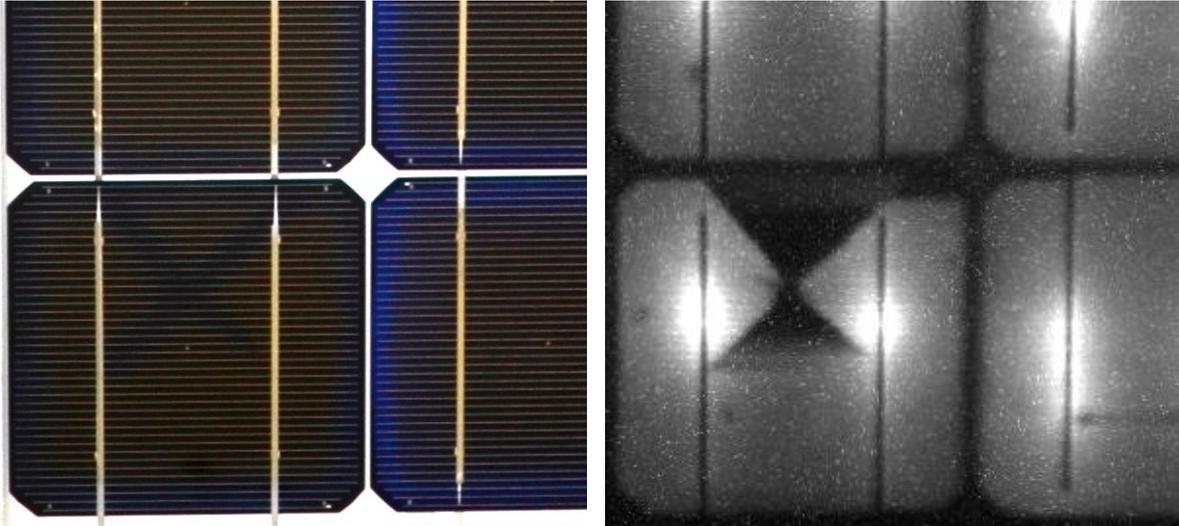


Abbildung 5: Visuelle Fotoaufnahme zeigt eine sog. Schneckenspur und Braunverfärbung und die zugehörige Elektrolumineszenz-Aufnahme zeigt den Kreuzbruch mit elektrisch abgetrennten, inaktiven Gridfingern

Ein Modul hatte eine auffällige Zelle mit Czochralsky-Ringen [4], welche im Herstellungsprozess des Siliziumwafers entstehen können.

Bei 20 der untersuchten Module, alle mit 55 Wp Nennleistung, sind sämtliche Zellen an den Zellrändern besonders an der Zellseite dunkler, an der die beiden Busbars bis zum Zellrand geführt sind (siehe Abbildung 6). Die genaue Ursache für diesen Effekt wird derzeit noch untersucht, mangelhafte Kantenisolierung verursacht ähnliche Verdunklungen.

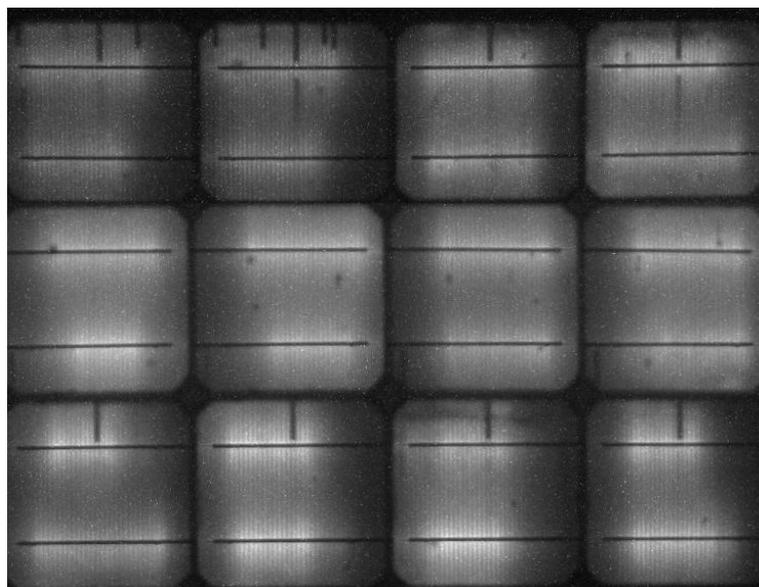


Abbildung 6: Dunkle Zellränder

Auffallend ist bei den meisten Modulen, dass die Zellbereiche unmittelbar neben den Busbars sehr hell erscheinen (siehe Abbildung 7), was auf eine lokal erhöhte Stromdichte hinweist.

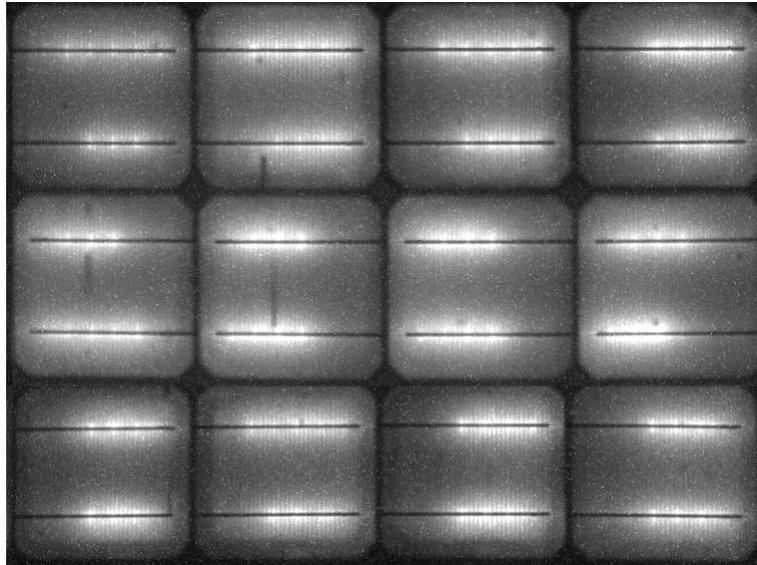


Abbildung 7: Elektrolumineszenz-Aufnahme mit sehr hellen Zellbereichen an den Busbars

Desweiteren sind dunklere wolkige Bereiche in manchen Zellen in der Elektrolumineszenz-Aufnahme vorhanden (Abbildung 8), die teilweise sehr gut mit den delaminierten Bereichen in der visuellen Fotoaufnahme (Abbildung 9) korrelieren.

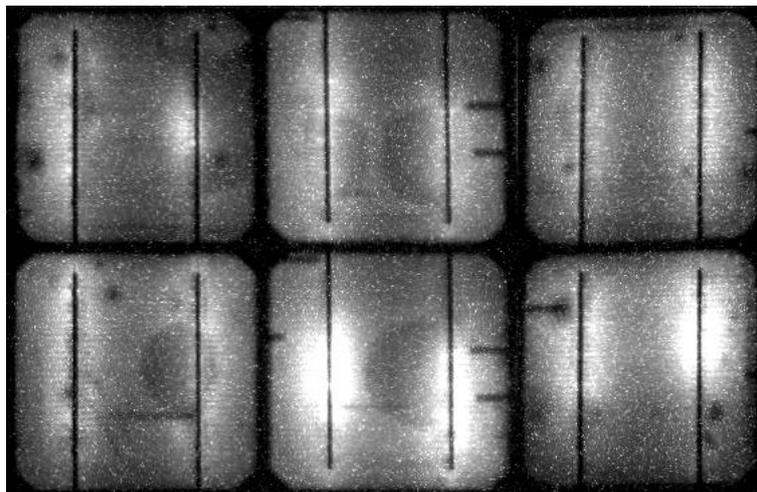


Abbildung 8: Elektrolumineszenz-Aufnahme Delamination, zu erkennen an den kreisförmig dunklen Bereichen

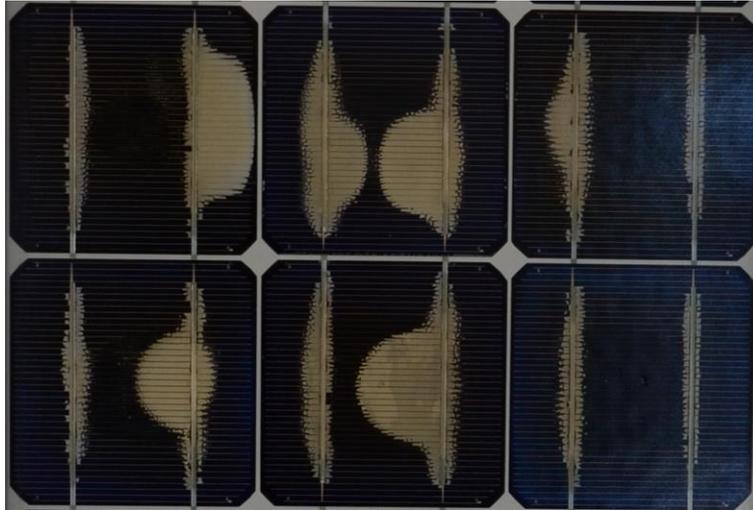


Abbildung 9: Visuelle Fotoaufnahme, starke Delamination (milchig erscheinende Flächen) erkennbar

Tabelle 3 zeigt die statistische Verteilung einiger beobachteter Effekte auf Zellebene: Zellen mit Haarrissen (Microcracks), die (noch) nicht zur elektrischen Abtrennung eines Zellbereiches führen (Abbildung 4 links), Zellen mit Abtrennung von Zellbereichen (Abbildung 4 Mitte und rechts) sowie Zellen mit verdunkeltem Zellrand (Abbildung 5). Im Vergleich zum letzten Abschnitt über sichtbare Alterserscheinungen fehlen hier zwei Module, die sich nicht bestromen ließen und an denen mithin auch keine EL-Untersuchung vorgenommen werden konnte.

Tabelle 3: Beobachtete Effekte auf Zellebene (EL-Untersuchung)

Nennleistung	Gesamtanzahl der Zellen pro Typ	Anteil der Zellen mit Haarrissen	Anteil der Zellen mit abgetrennten Zellbereichen	Anteil der Zellen mit dunklem Zellrand
53 Wp	4896	0,7% (34)	1,2% (60)	0,3% (16)
55 Wp	3276	0,4% (14)	0,6% (21)	22% (725)
110 Wp	1656	0,5% (9)	1,6% (26)	0,8% (13)

Tabelle 4 zeigt die statistische Verteilung einiger Effekte auf Modulebene.

Tabelle 4: Beobachtete Effekte auf Modulebene (EL-Untersuchung)

Nennleistung	Gesamtanzahl der Module	Anteil der Module ohne Haarrisse und abgetrennte Zellbereiche	Anteil der Module mit Haarrissen ohne abgetrennte Zellbereiche	Anteil der Module mit abgetrennten Zellbereichen	Anteil der Module mit dunklem Zellrand
53 Wp	136	56% (76)	12% (16)	32% (44)	4,4% (6)
55 Wp	91	70% (64)	8,8% (8)	21% (19)	25% (23)
110 Wp	23	39% (9)	8,7% (2)	52% (12)	26% (6)
alle	250	60% (149)	10% (26)	30% (75)	14% (35)

4. Leistungsverteilung

Zwei Module zeigten keine elektrische Aktivität mehr, zwei weitere wiesen einen bzw. zwei inaktive Teilstränge auf.

Die restlichen Module liegen in ihrer Leistung um durchschnittlich -9,5 Prozent unter der Nennleistung (siehe Abbildung 10), damit liegt der Wirkungsgrad um mehr als 1 Prozent unter dem Nennwirkungsgrad. Das entspricht bei 15 bis 18 Jahren Betriebsdauer im Mittel 0,52 bis 0,63 Prozent Degradation pro Jahr bezogen auf die Nennleistung. Eine angenommene, heutzutage durchaus übliche, Herstellergarantie von 80 Prozent der Nennleistung nach 25 Jahren wird im Mittel erfüllt, nur fünf Module kommen als Garantiefälle in Frage. Die Garantie bezieht sich lediglich auf die Leistung, Zellbrüche und Delamination werden darin nicht berücksichtigt.

Alle Betrachtungen zur Leistungsdegradation stehen unter dem Vorbehalt, dass die Kalibrierung der verwendeten Messgeräte zur Zeit der Produktion und heute erheblich differieren kann.

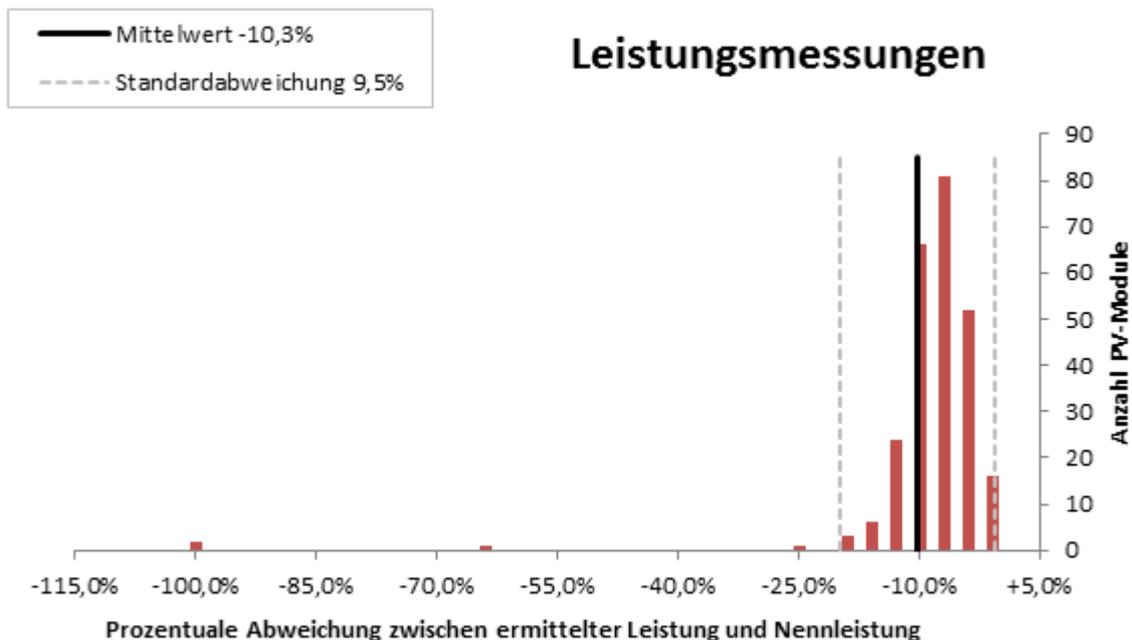


Abbildung 10: Ergebnisse der Leistungsmessung der 252 untersuchten PV-Module

Tabelle 5: Mittlere Abweichung und Standardabweichung der gemessenen Module (250 Module, Modulausfälle sind ausgenommen)

Nennleistung @ STC [Wp]	53	55	110	alle
Anzahl der Module	136	91	23	250
Mittelwert der Abweichung [%]	-8,2	-12,3	-7,1	-9,6
Standardabweichung [%]	5,9	2,9	1,0	5,1

5. Zusammenfassung der Ergebnisse

Die PV-Module zeigen, mit wenigen Ausnahmen, auch nach langjähriger Betriebszeit immer noch eine gute elektrische Leistung unter Annahme einer mittleren Degradation von -10,3 Prozent (unter dem Vorbehalt der damaligen und heutigen Messgenauigkeit) und bei einer geringen Streuung der PV-Module untereinander (Abbildung 10 und Tabelle 5). Vereinzelt treten leistungsmindernde Degradationseffekte bis hin zu Modulausfällen auf, welche auch in den Elektrolumineszenz-Aufnahmen sichtbar sind. Bei vielen PV-Modulen ist Delamination und bei einigen eine Braunverfärbung der EVA-Folie erkennbar.

Weitergehende Untersuchungen und Auswertungen sind in Vorbereitung.

6. Referenzen

- [1] Mohring H. et al., Auch nach 20 Jahren ist noch lange nicht Schluss – Langzeiterfahrungen auf dem ZSW-PV-Testfeld, 26. Symposium Photovoltaische Solarenergie Bad Staffelstein, 2011
- [2] Reiner M. et al., 20 Jahre 1000 Dächer Programm – Langzeiterfahrungen aus Sachsen, 27. Symposium Photovoltaische Solarenergie Bad Staffelstein, 2012
- [3] Köntges M. et al., Schneckenspuren, Snail Tracks, Worm Marks und Mikrorisse, 8. Modul-Workshop TÜV Rheinland, 2011
- [4] Bernhard Weinreich und isfh, Was kommt ans Licht was bleibt im Dunkeln, Sonne Wind & Wärme, 10/2010
- [5] Die Vor-Ort-Labor-Vermessungsdienstleistung der BEC-Engineering GmbH erfolgt mit einem Mobilen PV-Testcenter der MBJ Services GmbH 