

SCHATTEN IN DER PV – MODULSTRESS



Rosmarie Neukomm, Renersolv Neukomm, Yverdon-les-Bains

Erfa Swissolar 10.Okt.2019

Schatten PV
1

SCHATTENWURF VON OBJEKTEN

- Dauer und Schattenverlauf Tages- und jahreszeitlich variierend
- Nachbargebäude, Bäume, Modulreihen, Dunstrohre, etc.
- Belastung periodisch während ganzer Lebensdauer

BESCHATTUNG: ABDECKUNG DER ZELLEN

- Direkt aufliegend, opak, oft temporär: Verschmutzung, Staub, Ablagerungen in den Modulrahmen , Vogelkot z.T. selbstreinigend

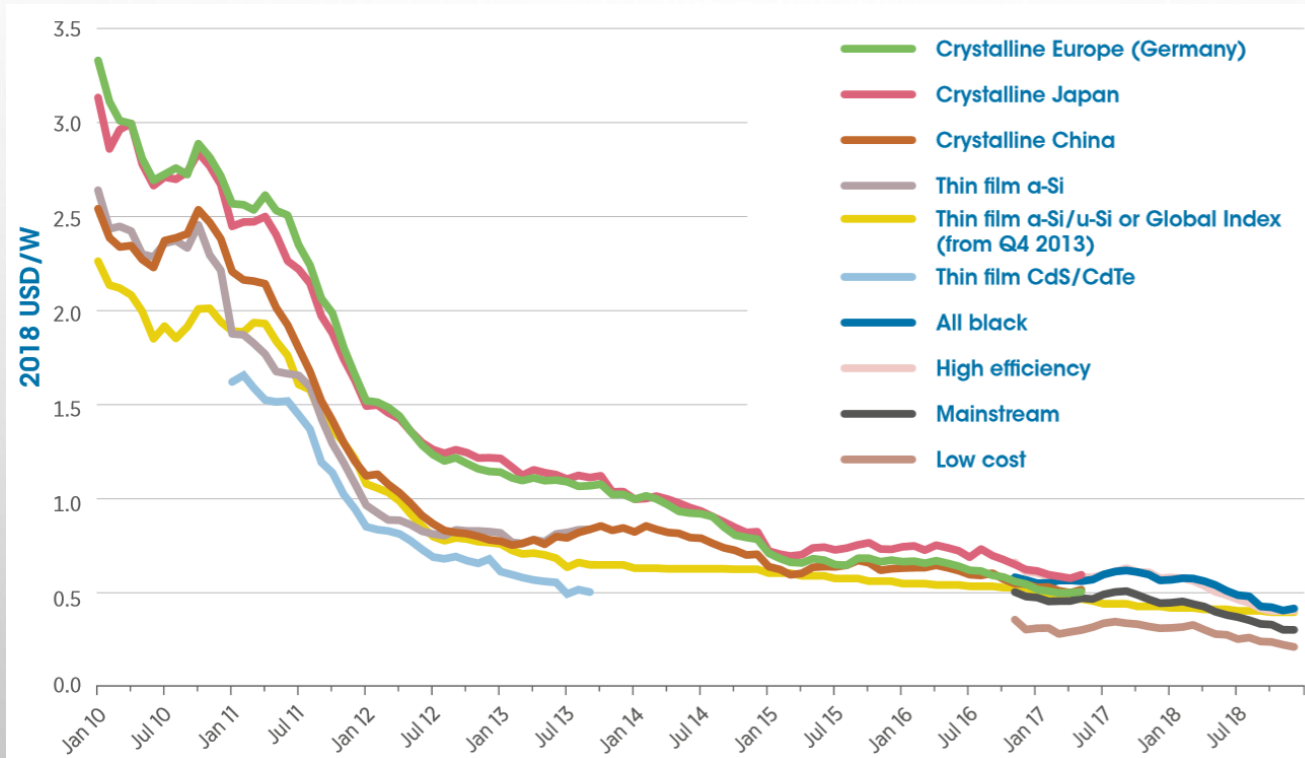
→ **Reinigung**



Schnee, Laub

MODULE GÜNSTIGER → PV STROM GÜNSTIGER

Preisentwicklung PV-Module 2010–2018: Preise um ca. 90% gefallen seit Ende 2009



IRENA (2019), *Renewable Power Generation Costs in 2018*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

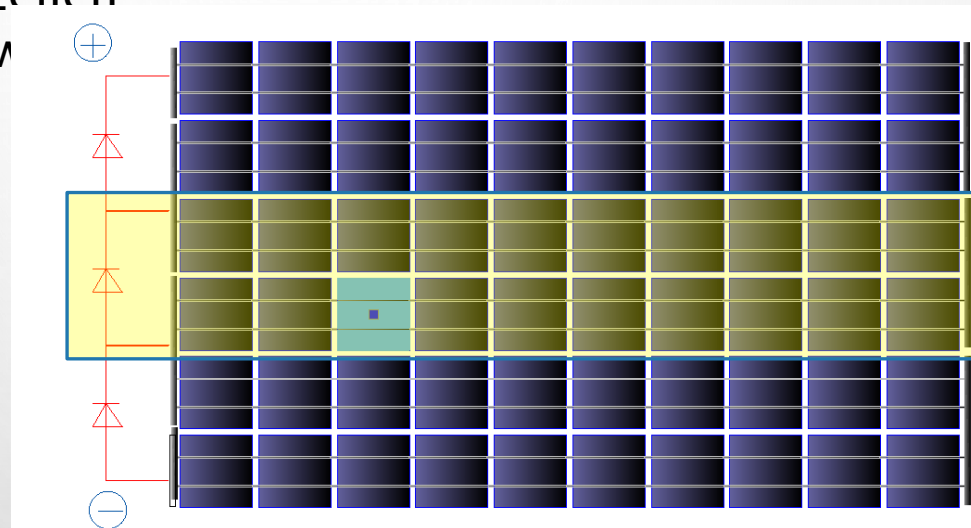
→ Werden Module vermehrt in den Schatten gebaut ?

BESCHATTUNG: ÜBERPROPORTIONALER ERTRAGSAUSFALL UND MODULSTRESS

- Konventionelles c-Si Modul, Serieschaltung 60 od. 72 Zellen
- Falls Zellen beschattet, und $I_{mpp} \text{ Modul} > I_{sc}$ beschattete Zellen

-- > Zellen v

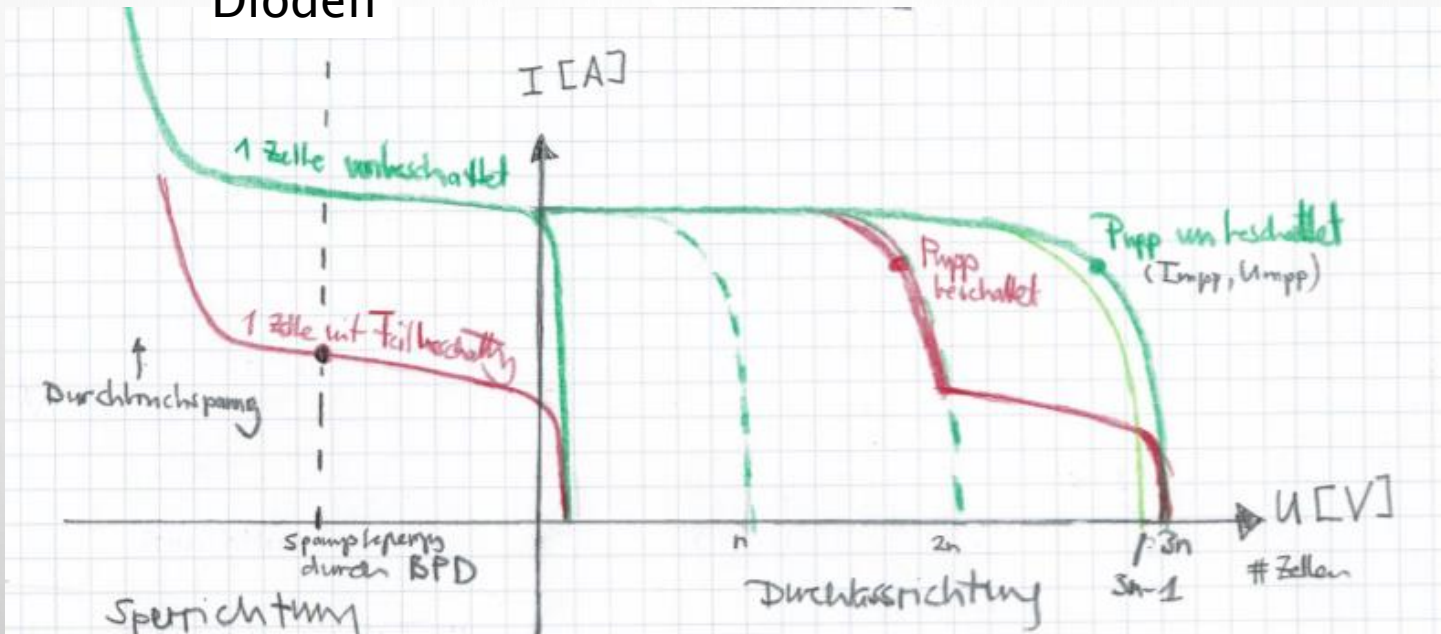
Modul mit Last
Bypass Dioden
1 Zelle beschattet



- Maximal fällt die Summe der Spannungen der unbeschatteten Zellen des Diodenabschnitts ab → Bypass-Diode (BPD) wird leitend:
1 BPD pro ca. 20 Zellen
→ Stress begrenzt


IV KENNLINIE MODUL (3 BPD, N ZELLEN PRO BPD)

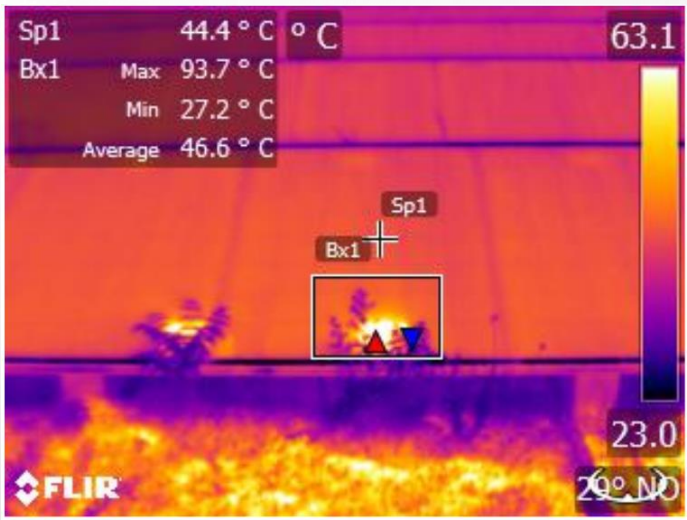
1 Zelle teilbeschattet in Modul mit 3 Bypass Dioden



In vielen Beschattungssituationen verteilt sich die Rückwärtsbelastung auf mehrere beschattete Zellen → Stress begrenzt und meist verteilt


STRESS-SCHATTENWURF IN DER PRAXIS





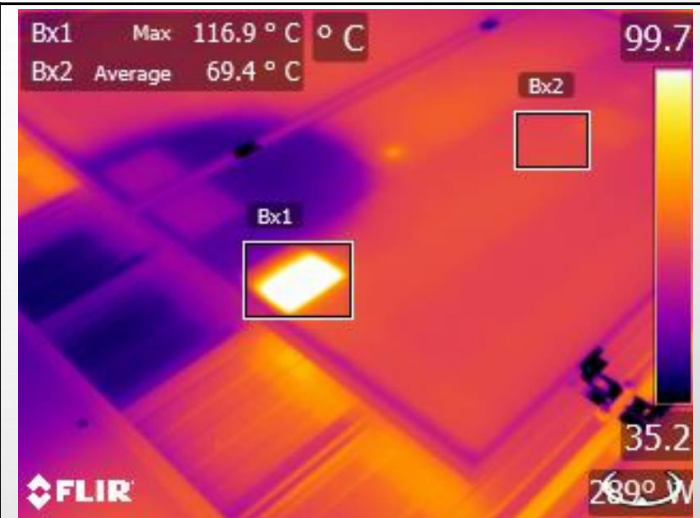
Schatten durch Pflanzen
→ Teilbereich einer Zelle kann sich stark e

Quelle, L. Schwä



Beschattete Zelle: Temperatur ca. 50°C höher als Modultemperatur

STRESS-SCHATTENWURF LÜFTUNG



Schatten durch Lüftungsrohr

→ Zelle kann sich stark erhitzen

Simmler

Quelle, H

Energie
Netzwerk

Der unbeschattete Teil einer teilbeschatteten Zelle kann sehr heiss werden (warm...hot...)

BESCHATTUNG: MODULSTRESS C-SI MODULE

THERMISCHER IMPAKT BESCHATTUNG

- Beschattete Zellen: Sperrbetrieb \rightarrow ca. 100 W thermisch in ungünstige
- Dose: Schottky-Diode Spannungsabfall ca. 0.5V \rightarrow ca 5 W/ BPD, oft 3
- Modul – Teilbereich mit erhöhter Temperatur, Temperaturdifferenz im potentiell schnellere Alterung (mehr und höhere Temperaturzyklen)

BYPASS DIODEN (BPD)

- wichtig für sicheren Betrieb von c-Si PV-Modulen
- BPD defekt und Schatten \rightarrow kann Hot Spots mit hohen Temperaturen e insbesondere bei vorhandenem Zell-IV-Mismatch, Zelldefekten (Bruch
- BPD-Ausfall
 - Überspannungseignisse (Blitz direkt oder nahe)
 - Lebensdauer BPD hängt von Diodendimensionierung, Dosen-Dioden Operations- und Integrationsbedingungen der Module ab (\leftrightarrow therm Worst case: thermisches Wegdriften «Thermal Runaway» der BPD)

INSTALLATIONS- UND GARANTIEBEDINGUNGEN

| | |
|---|--------------------------------|
| <p>en.longigroup.com</p> <p>LONGI</p> <p>Installationsanleitung für LONGI PV Solarmodule</p> | |
| <p>Module sollen das ganze Jahr über an schattenfreien Orten installiert werden. Stellen Sie sicher, dass sich an den Installationsorten keine lichtblockierenden Hindernisse befinden.</p> <p>Stellen Sie sicher, dass die Klemme keinen Schatteneffekt erzeugt.</p> <p>Während des Betriebs der Module darf es keine Umweltfaktoren geben, die Schatten projizieren und teilweise oder das gesamte Modul abdecken. Zu diesen Umweltfaktoren zählen andere Module, Modulsystemhalter, Vögel, Staub, Boden oder Pflanzen. Diese können die Ausgangsleistung erheblich reduzieren.</p> | |
| <p>Garantiebedingungen für MegaSlate II-Module der</p> | <p>3S Solar Plus AG</p> |
| <p>E. Ausschlüsse der Garantieansprüche</p> <ul style="list-style-type: none"> - dauerhafte Verschattung eines Teilbereiches oder des gesamten Modules, - Beeinträchtigung durch äußere Einflüsse (Schmutz, Rauch, Salz, Chemikalien, Gase und andere Verschmutzungen), | |
| <p>Ertext Solartechnik (AU), Spezialmodulhersteller</p> | |
| <p>Die Beschattungsfreiheit der Module muß Bauseits sichergestellt sein.</p> | |

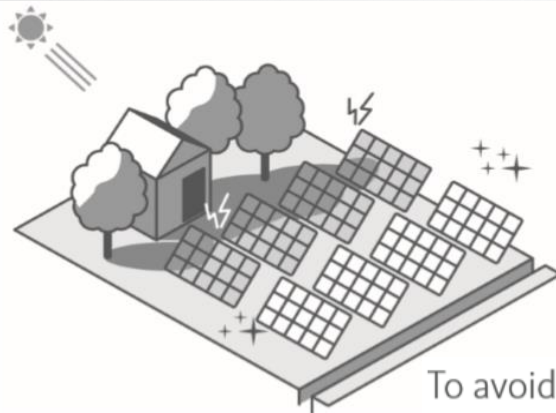
INSTALLATIONSANLEITUNG MODULHERSTELLER

Sharp: General Safety

10. Avoid uneven shade on the PV module surface. Shaded cells may become hot ("hot spot" phenomenon) which may result in permanent damage to the module (e.g., solder joints may peel off).

Ungleichmässige
n
Schatten
vermeiden:
Hot Spots und
dauerhafte
Schädigung
möglich

S-energy: Installation guide, S.3 (2017)



ENVIRONMENTAL CONSIDERATIONS

- 1) The shading of the front surface is the main cause of hot spot or performance reduction of power generation.
- 2) The ground should have well drained soil.

To avoid shade by the vegetation environment, regular weeding is needed.

The shading of the front surface of the module can cause the module degradation by fire or reduce its lifecycle.

Mögliche Moduldegradation,
Brandgefahr, und Auswirkungen auf
Lebensdauer Module

Überproportionaler Ertragsausfall und Modulstress lassen sich teilweise reduzieren



GEEIGNETE ANLAGENKONZEPTE, SMARTE MODULE

Zentral/Strang Wechselrichter

Modul WR

Modul Optimierer DC/DC add-on mit Spezial-WR

Konventioneller WR nur Teilausstattung mit Modul Optimierern

Moduldosen mit Optimierern „smart“



(4BB)





Jinko Solar
Building Your Trust in Solar

Eagle MX (JK07B) 260-280 Watt

POLYCRYSTALLINE MODULE

Smart-Modul



Eliminierung von Hot Spots für eine geringere Degradation der Module.

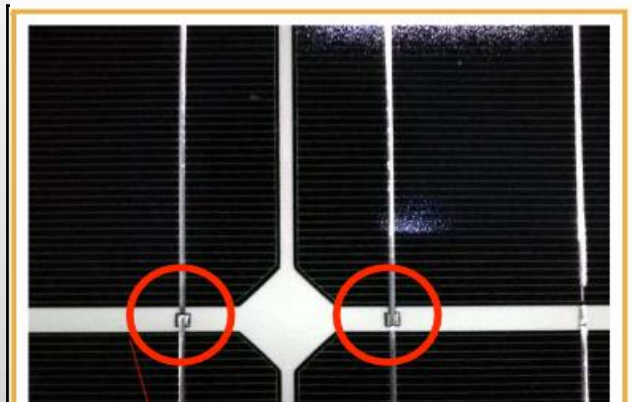


Ein integrierter intelligenter Schaltkreis zur Zelloptimierung verhindert Beeinträchtigungen durch beliebige Diskrepanzen innerhalb eines Moduls (z. B. durch Schatten, Verschmutzung, Alterung, ungünstige Gebäudeausrichtung) und sorgt für maximale Ausgangsleistung.

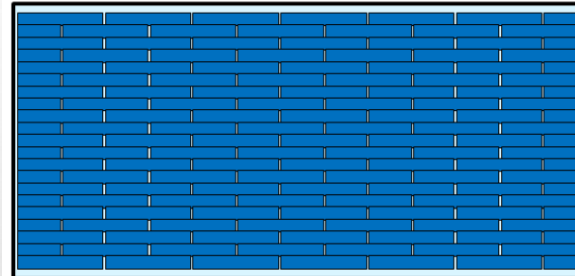
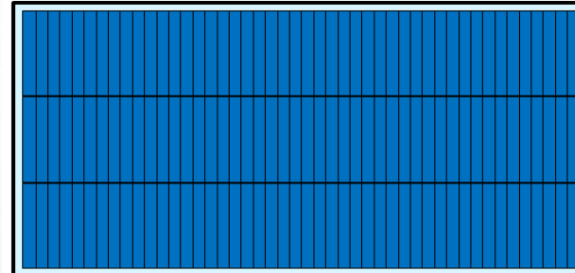
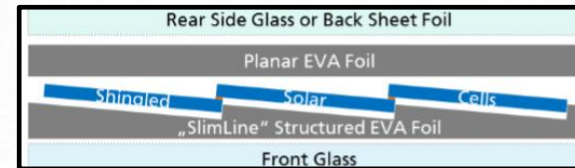
SCHATTENTOLERANTERE MODULKONZEPTE

Spezielle Modulverschaltung

- Halbzellen
- Parallele Zellstränge im Modul
- Parallel-Schindeln + Matrix
- 1 Zelle /BPD



1 Zelle/BPD



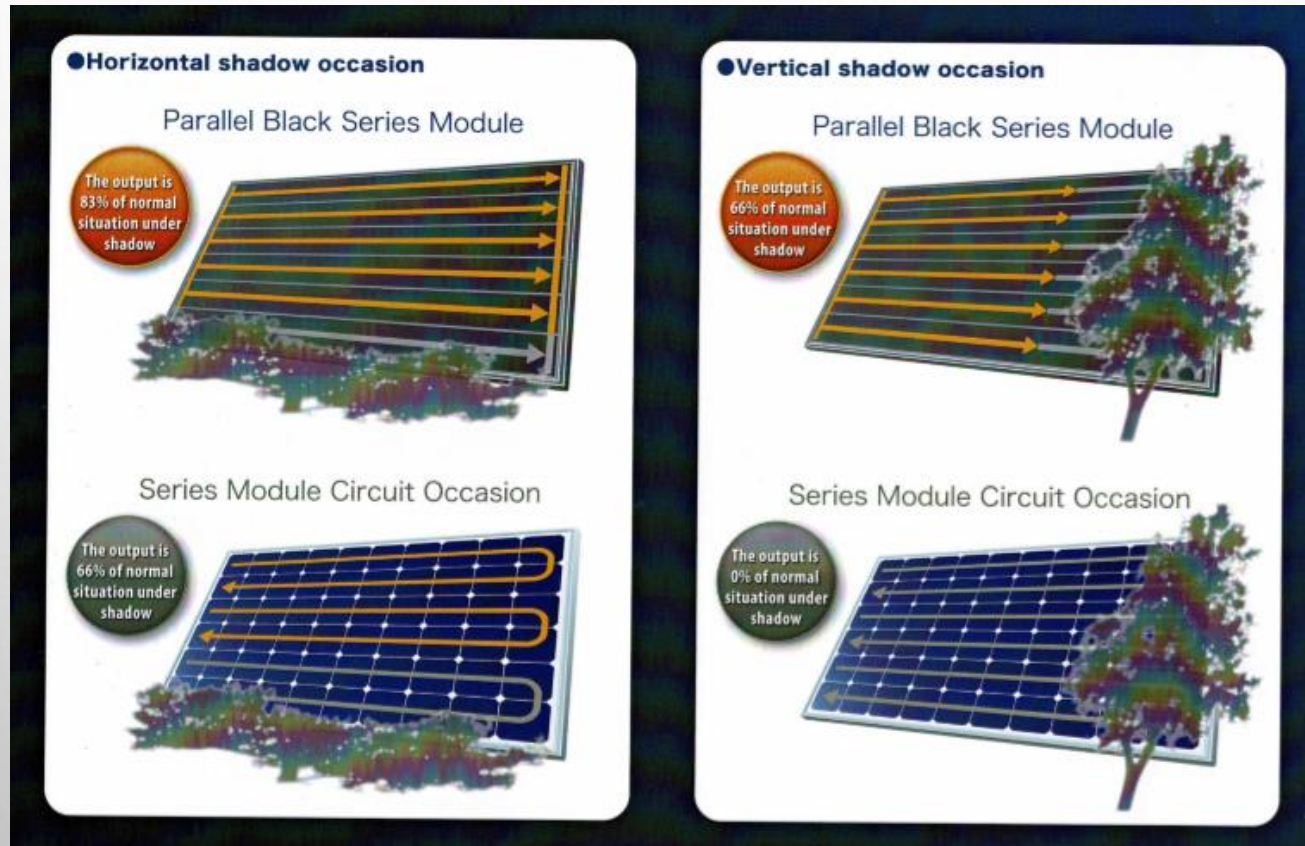
Parallele Schindel- und Matrix Module

COMPARISON OF LAYOUTS FOR SHINGLED BIFACIAL PV MODULES IN TERMS OF POWER OUTPUT, CELL-TO-MODULE RATIO AND BIFACIALITY

Andrew Mondon, Nils Klasen, Esther Fokuhl, Max Mittag, Martin Heinrich, Harry Wirth
Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (ISE), Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg, Germany
andrew.mondon@ise.fraunhofer.de

EFFEKT BEI BESCHATTUNG (3BPD)

Prinzip parallele Stränge versus serielle Stränge Modul Design



Parallel
Design
Mit 3 BPD

Zusammen
mit
Optimizer
oder Modul
WR...

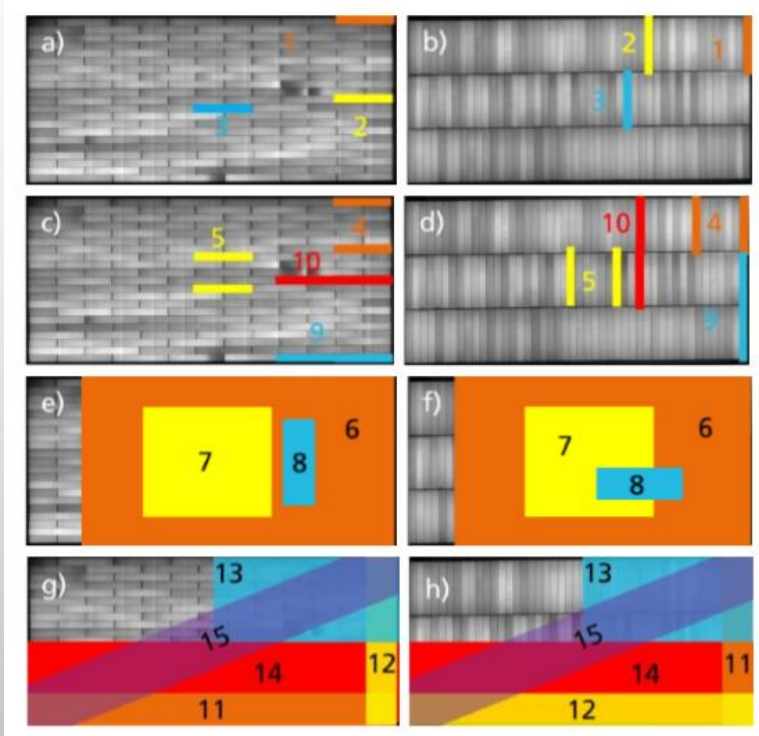
Aus: Prospekt Greenway Solar-Tech (2



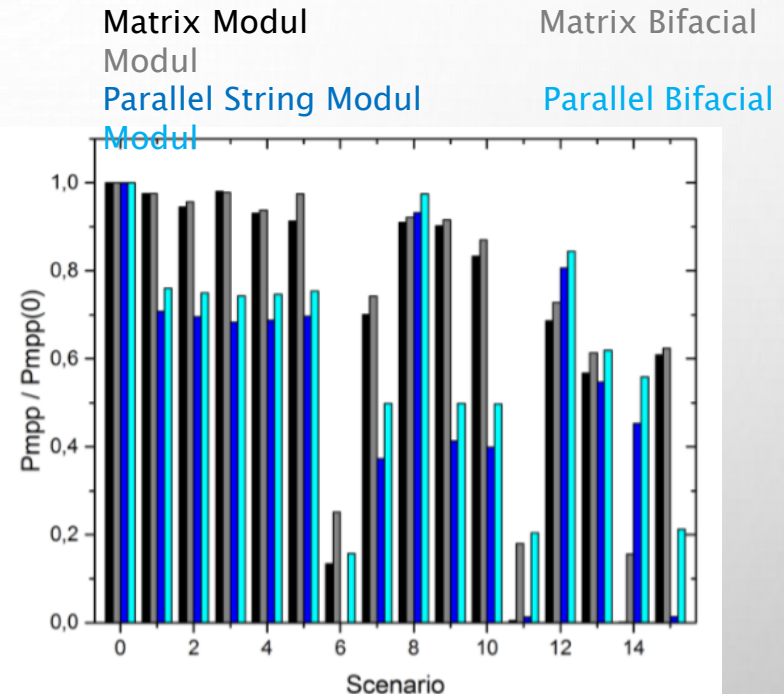
Vgl parallel String und Matrix Schindel Module

(Quelle: Modon, ISE, s. Folie 12)

BESCHATTUNGSFÄLLE



RELATIVE LEISTUNG (@STC)



→ Matrix Design meist besser im mono-facialen und bi-facialen Fall

SCHLUSSFOLGERUNG

Schatten in der PV ist nicht unproblematisch

- Idealerweise kein Schatten auf Modulen
- Montage – und Garantiebedingungen der Hersteller beachten

Auswirkungen von Schatten kann teilweise abgefangen werden

- Intelligente Konzepte, Anlagen und Module
jedoch: Mehrkosten, zusätzliche Komponenten und Komplexität,

Langzeiterfahrung fehlt, aber wird kommen

- Konventionelle Anlagen mit Schatten häufiger kontrollieren auf Hot Spots und defekte Bypass-Dioden: Thermographie ist sehr effizient
- In allen Fällen: Anlagenüberwachung,

Reinigung und evtl. jäten (auch vor IR=

Thermographie

oder IV Messung)

Lock-in Thermography for analyzing solar cells and failure analysis in other electronic components

by O. Breitenstein* and S. Sturm**

* Max Planck Institute of Microstructure Physics, Weinberg 2, D-06120 Halle, Germany, breiten@mpi-halle.mpg.de

**InfraTec GmbH, Gostritzer Str. 61-63, D-01217 Dresden, Germany, s.sturm@infatec.de

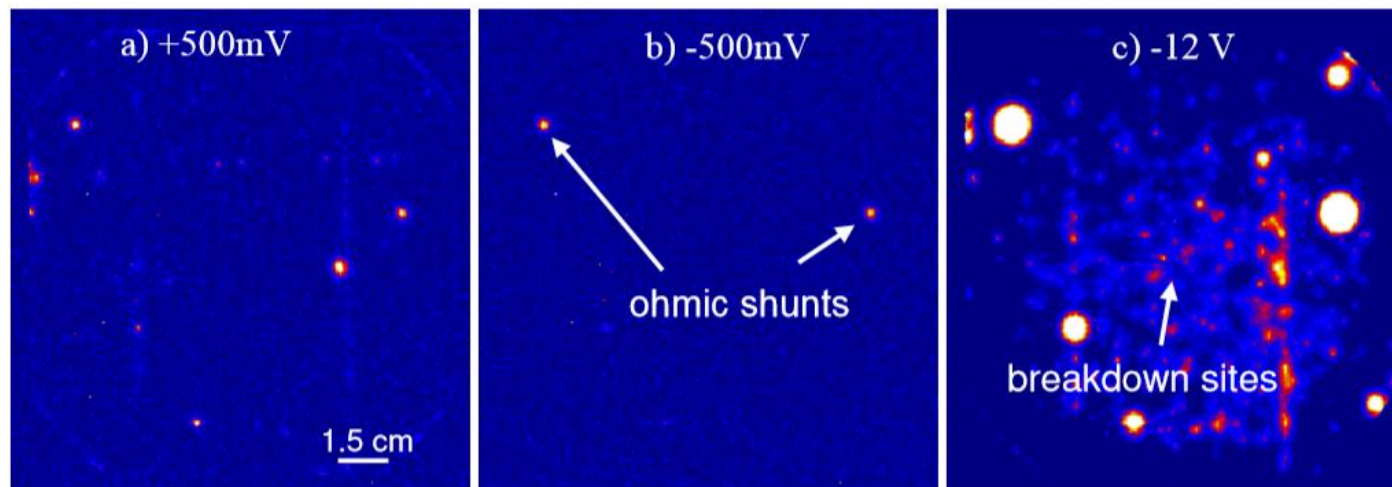


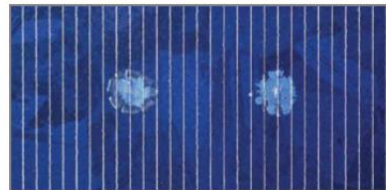
Fig. 4. (a) Forward bias and (b) low reverse bias LIT amplitude image showing shunts with linear and non-linear characteristic, (c) high reverse bias amplitude image showing in addition breakdown sites.

Mitigating Strategies for Hot Spots in Crystalline Silicon Solar Panels

Impact of Hot Spots on the Electrical Protection of the Panel

The consequences of hot spots can range from dramatic fires to accelerated aging of the materials and, in most cases, we will see the more diffuse temperature increase leading to an accelerated aging of the backsheet/ encapsulation material set.

A hot spot resulting from, or leading to, a short circuit between the front and the back of the cell will result in very localized high intensity heating. This type of hot spot can result in melting of the backsheet and can lead to fires.



Hot spots lead to bubbling



Bubbling leads to cracking



High intensity hot spots in PVDF-based backsheets



Hersteller «Tedlar» PVF (Polyvinylfluorid) Rückwandfolie

Studie über Schäden an Rückwandfolien wegen 'Hot Spots'

Extremszenario, mehrere Faktoren:
Wüste, hohe Operationstemperatur
grosse Temperaturdifferenzen
Sand und Schmutz / Beschattung

PVDF (Polyvinylidenfluorid)

CHARACTERIZATION AND SIMULATION OF THE SHADING INDUCED HOT SPOT RELIABILITY PROBLEM IN SILICON PHOTOVOLTAIC SOLAR MODULES

by

PAUL MARK LUNDQUIST

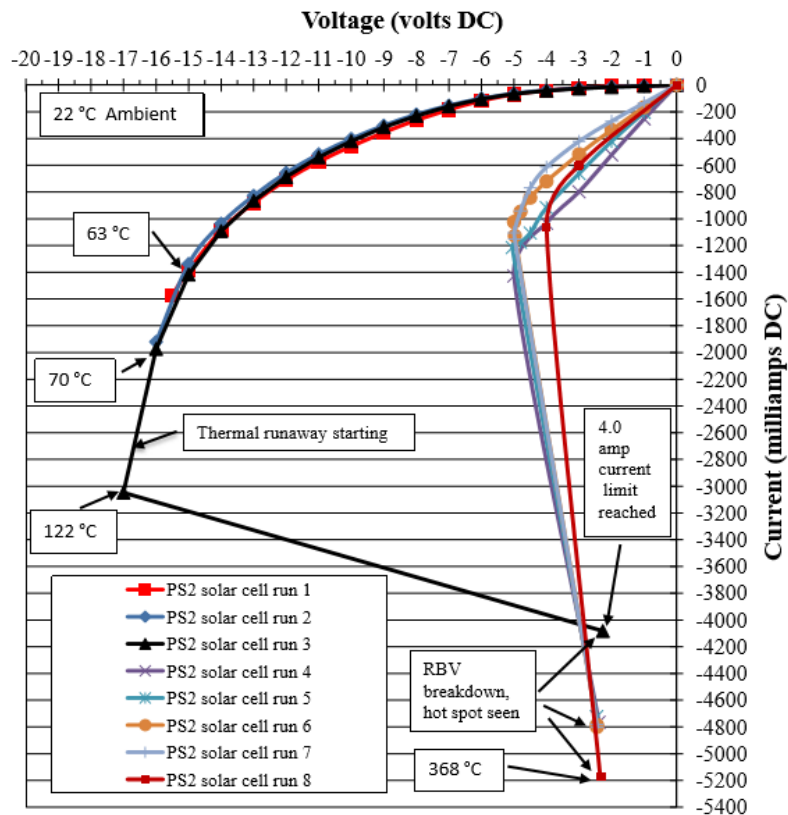


Figure 54: Leakage current due to reverse bias voltage on the poly c-Si 125 mm solar cell, with IR thermal image. The voltage stress caused a breakdown and hot spot.

5-inch Zelle (Impp 4.8A)
Ohne Licht
Sperrspannung 0-18 V
→ Dioden Durchbruch

CHARACTERIZATION AND SIMULATION OF THE SHADING INDUCED HOT SPOT RELIABILITY PROBLEM IN SILICON PHOTOVOLTAIC SOLAR MODULES

by

PAUL MARK LUNDQUIST

5-inch Zelle (ImpP 4.8A)
Verschieden Beschattung
→ Grösster Strom (thermischer Stress)
bei 25% Beschattung

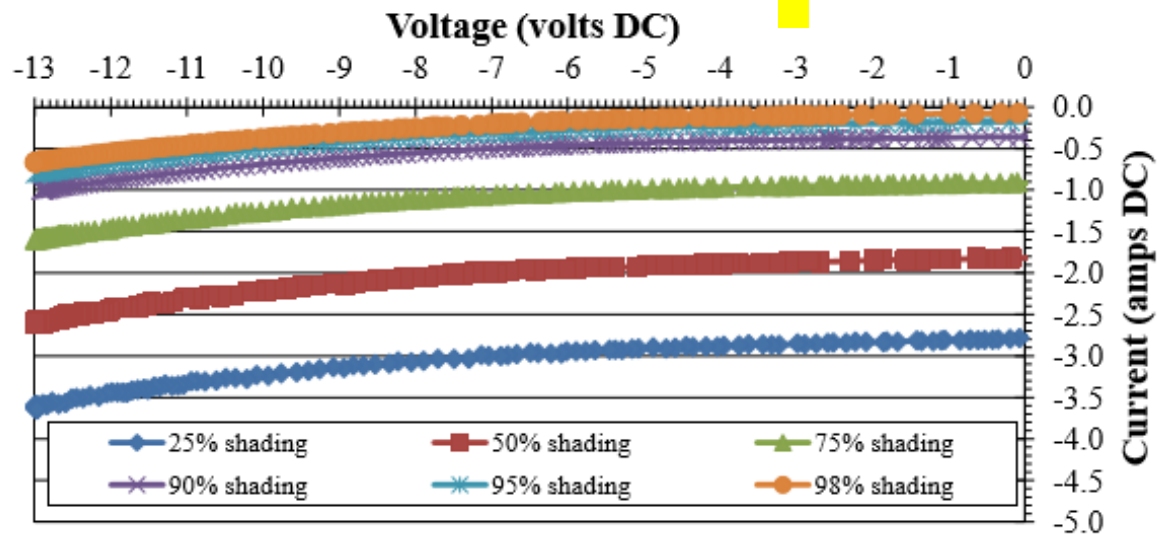


Figure 59: Reverse bias voltage with partial shade on poly c-Si. Thermal image and picture had 25% shade, and generated 47 W of heat. SP1 to SP3 were illuminated.

HOT SPOT RISK ANALYSIS ON SILICON CELL MODULES

Stefan Wendlandt^{1,3}, Alexander Drobisch¹, Torfinn Buseth², Stefan Krauter^{1,3,4} and Paul Grunow¹

¹ Photovoltaik Institut Berlin AG, Wrangelstr. 100, D-10977 Berlin, Germany

Phone: +49 (30) 814 52 64 0, Fax: +49 (30) 814 52 64 101, e-mail: wendlandt@pi-berlin.com

² Elkem Solar AS, P.O. Box 8040 Vaagsbygd, NO 4675 Kristiansand, Norway

Phone: +47 3801 7399, e-mail: torfinn.buseth@elkem.no

³ Technical University of Berlin, Department of Energy and Automation Technology, Einsteinufer 11, D-10587 Berlin, Germany, e-mail: krauter@iee.tu-berlin.de

⁴ University of Paderborn, Faculty of Electrical Engineering, Informatics and Mathematics, Institute for Sustainable Energy Concepts, Pohlweg 55, D-33098 Paderborn, Germany, e-mail: krauter@nek.upb.de

Fig. 2.

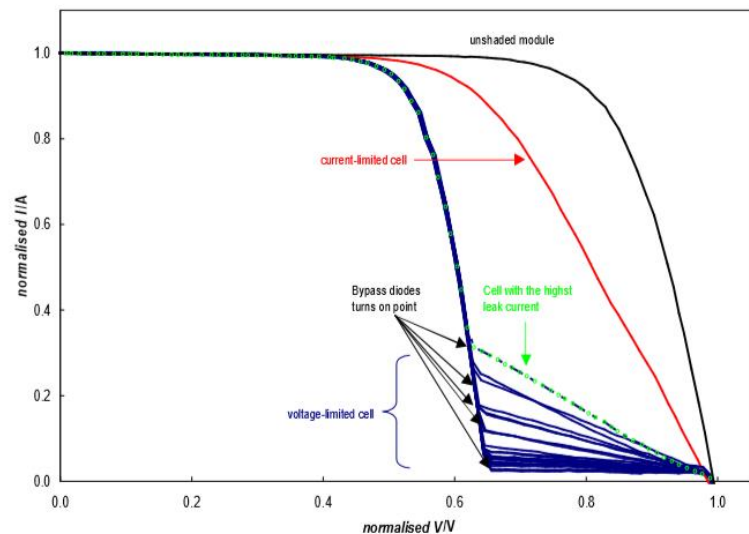
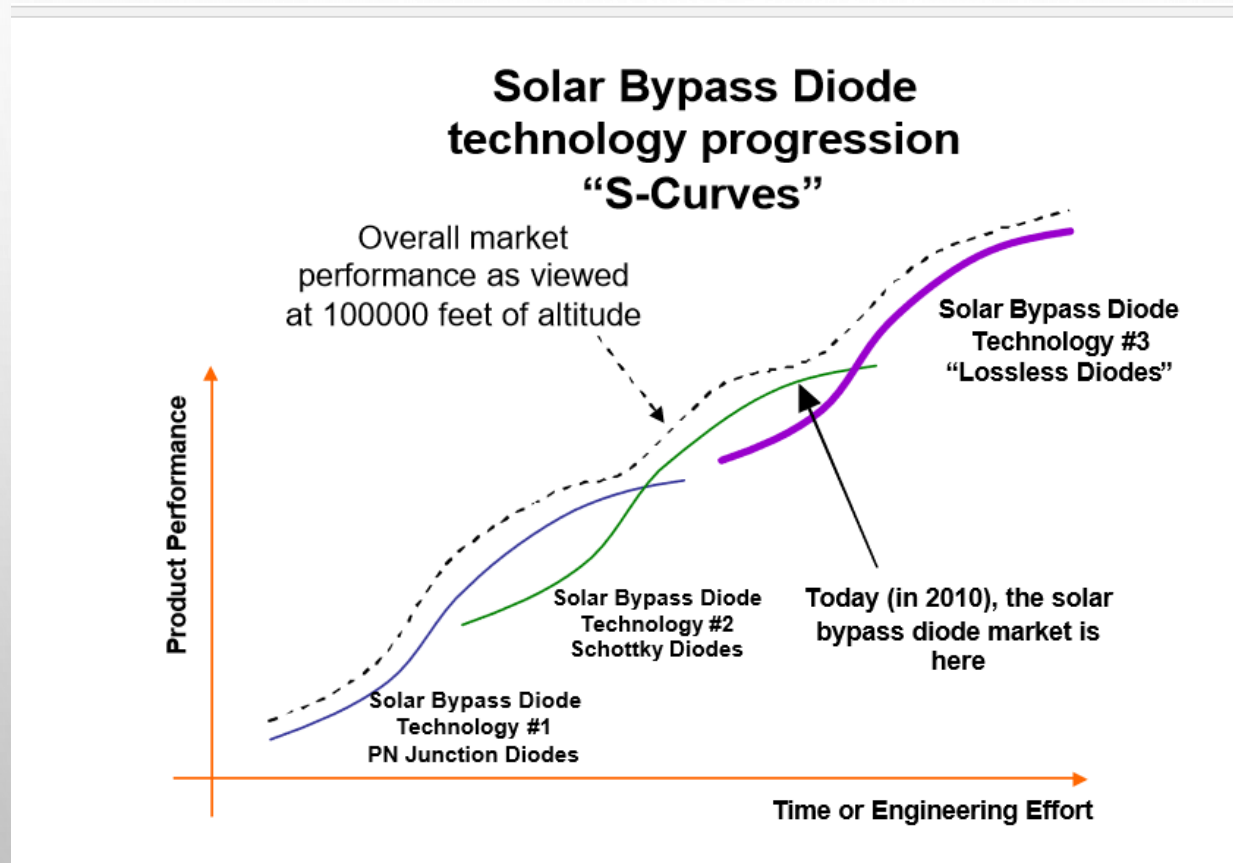


Table I: Critical temperature of the front glass overview

| temperature | effect | module consequences |
|-------------|--|--|
| < 150 °C | no visual effects | normal module performance |
| > 150 °C | melting of encapsulation | delamination and less heat conduction material |
| > 170 °C | discolouration of the back sheet foil | attenuated of the electrical module isolation |
| > 200 °C | irreversible destruction of the cell <i>pn</i> -junction | performance loss at the module under unshaded conditions |

Solar Bypass Diodes: Then and Now

Shawn A. Fahrenbruch
Principal Engineer
Microsemi Analog Mixed Signal Group



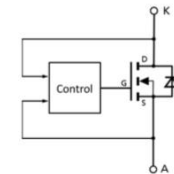


Problem: Potentieller Thermal Runaway bei Schottky Dioden

Typen von BPD



Welche Optionen für Bypass-Dioden gibt es?

| | p-n-Diode | Schottky | Aktive Dioden |
|---|---|---|---|
| Grundprinzip |  |  |  |
| Sperrspannung | 200 – 1000 V | 40 – 70 V | 30 – 40 V |
| Durchlass-Spannung @ $T_J = 125^\circ\text{C}$, $I_D = 10\text{ A}$ | 0,5 - > 1 V | 0,3 - 0,5 V | 0,05 - 0,1 V |
| Sperrstrom @ $T_J = 125^\circ\text{C}$, $U_R = 15\text{ V}$ | μA | mA - A | nA - μA |
| Stoßstrom- und ESD-Widerstandsfähigkeit | uni-direkt. | uni-direkt. | bi-direktional |
| Preis / Stück | 0,2 - 0,5 € | 0,2 - 0,5 € | 1,0 - 1,5 € |

8

© Fraunhofer ISE


Fraunhofer

**BYPASS-DIODEN:
ZUVERLÄSSIGKEIT**

Heribert Schmidt

Fraunhofer-Institut für Solare
Energiesysteme ISE

Photovoltaics in the shade: one bypass diode per solar cell revisited

Boudewijn B. Pannebakker, Arjen C. de Waal, Wilfried G.J.H.M. van Sark 

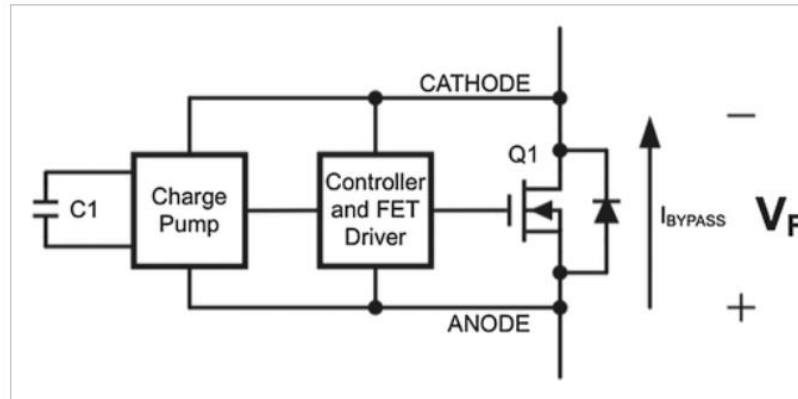


Figure 1

[Open in figure viewer](#) | [Pow](#)

increase mismatch tolerance and module performance under partial shading. Several companies (e.g., Texas Instruments, Microsemi, and STMicroelectronics) have recently developed these substitutes to the conventional Schottky BPD called lossless, smart, active, or cool BPDs. They are in fact switching circuits using transistors to mimic diode-like behavior, resulting in a 10-fold lower forward voltage (V_F) (~30 mV) compared with a Schottky diode. As an example, a simplified schematic of the Texas Instruments SM74611 IC [15](#) is shown in Figure 1. Besides a body diode, an MOSFET, a controller, and FET driver, a charge pump and a capacitor are included. Once a solar cell is shaded, current will flow through the body diode, which creates a potential difference across the anode and cathode. The potential difference charges the capacitor, which in turn powers the IC and turns on the MOSFET. The key to a low V_F is minimizing the charging time (FET off) and keeping a high duty cycle (typical value for duty cycle is between 96% and 99% with FET on for ~240 ms).

PV module failures observed in the field

- solder bond and bypass diode failures -

Kazuhiko Kato

PV System and Application Team,
Research Center for Photovoltaic Technologies (RCPVT),
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST),
Japan

IEA INTERNATIONAL ENERGY AGENCY
PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS PROGRAMME



How to find solder bond and bypass diode failure in the field

Infrared Camera is available to find solder bond failures
mainly on **sunny** condition.



“**Signal Transmitter Device**” is cheap (<100K JPY) and more helpful to find
both solder bond failure and bypass diode failure even on **cloudy** condition.



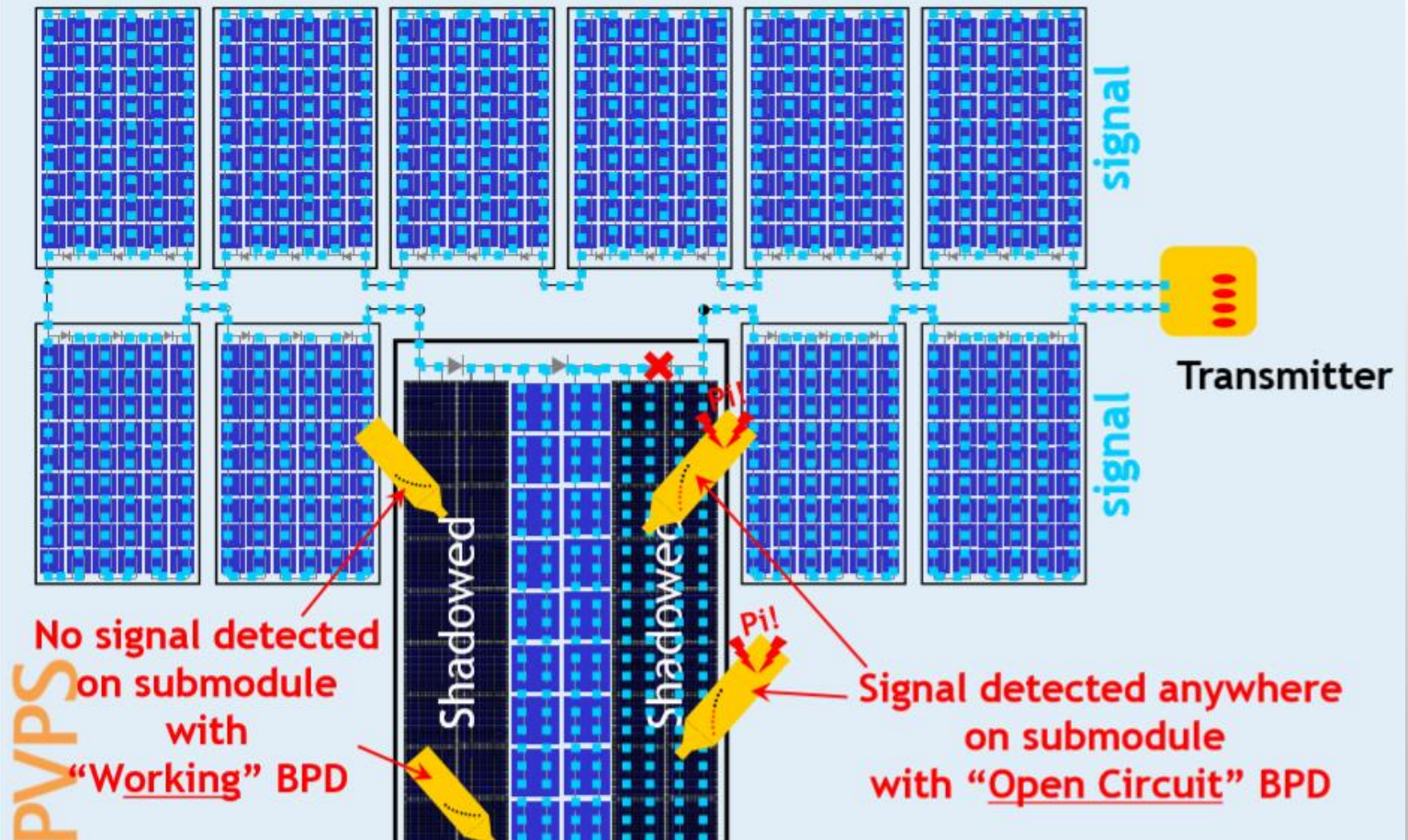
PVPS

Transmitter



Receiver

How to find bypass diode failure (open circuit) in the field



HOME > Products & Service > Solar panel, Photovoltaic (PV) system maintenance > BYPASS DIODE TESTER FT4310

BYPASS DIODE TESTER FT4310

Inspect Solar Panel Bypass Diodes for Opens and Shorts in Broad Daylight Without Covering Panels



Bypass Diode Checker

BDC15310 Bypass Diode Checker



Inspector for the integrity of bypass diodes in solar battery module. (open/short).

FEATURES

- Considering safety, the measurement is done during night and the work in high places is not required, as the measurement can be made at the output terminal like as connection box, etc.
- Easy operation and speedy measurement for the time of 1 sec.

DIODENKENNLINIE

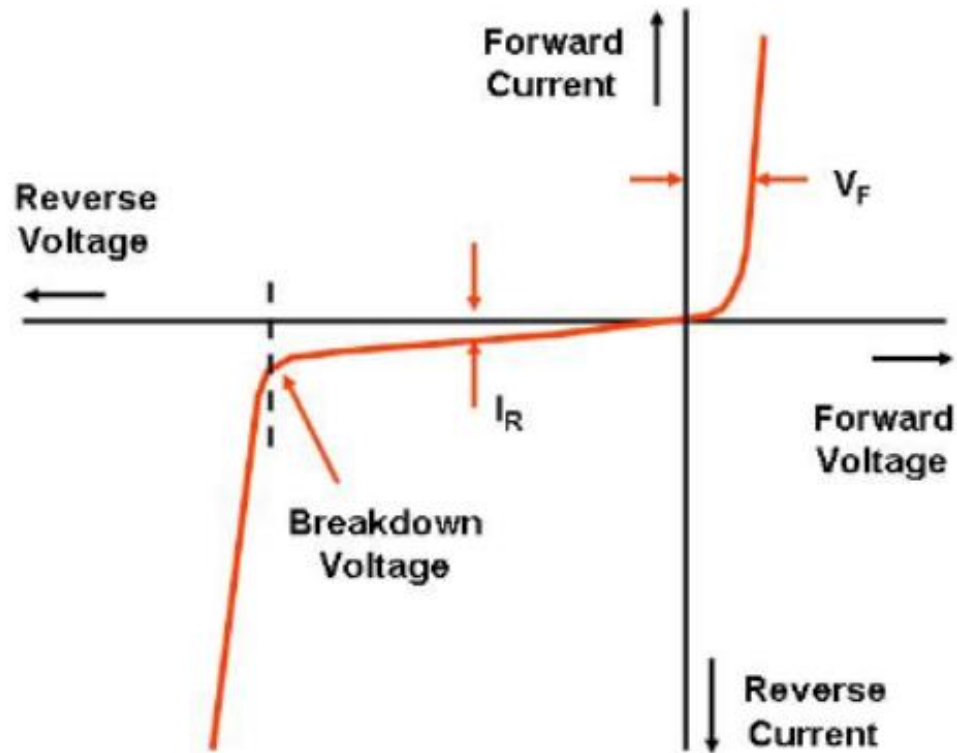
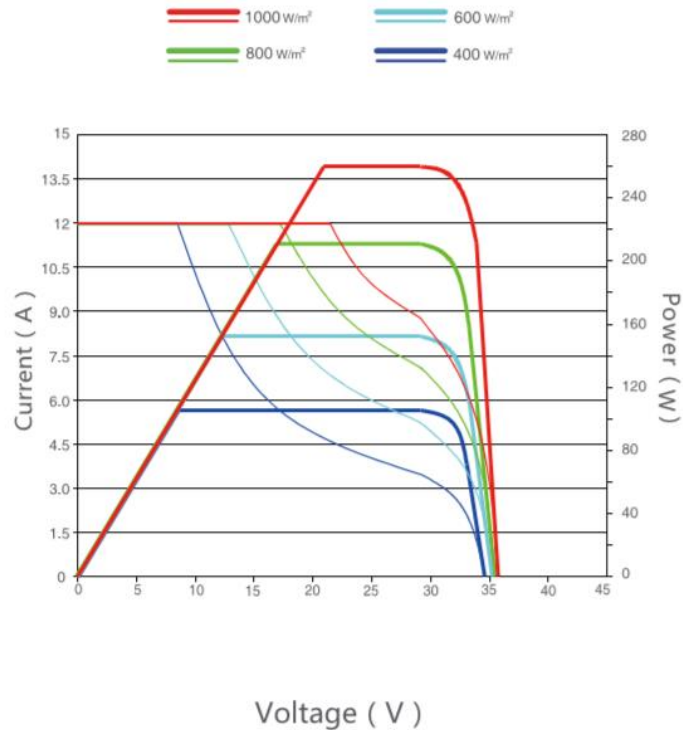
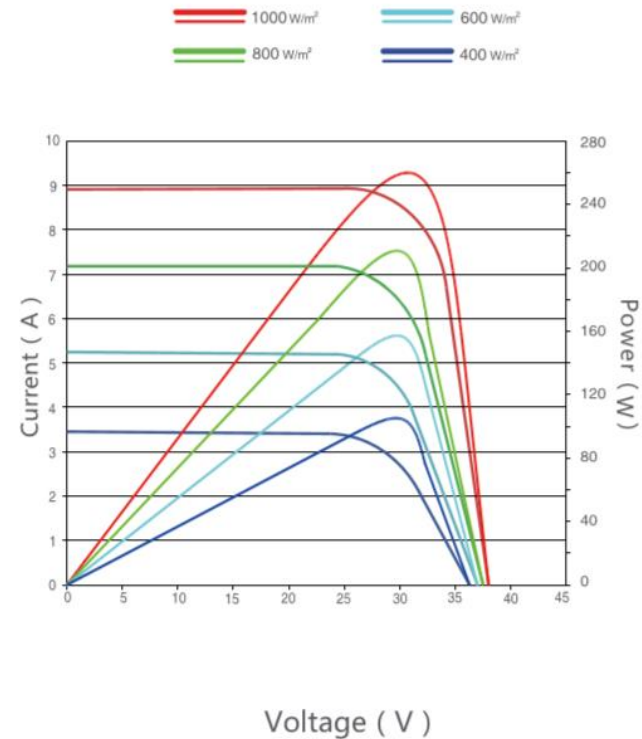


Abb: Kennlinien Diode oder unbelichtete Solarzelle

MPPT Mode Simulated Real Behavior (260W)



Flash Test Mode Tested by Source Simulator (260W)



Review of IEC 61215:2016 (type approval)

MQT 18 – Bypass diode testing

- Major changes
- Purpose: To assess the thermal design and long-term reliability of the used bypass diodes and to verify that they are still functional afterwards

MQT 18.1 – Bypass diode thermal test

New test procedure:

1) Determination of characteristic

- VD (diode forward voltage) vs. T_J (junction temperature)
- Module heated to $T_{J1-4} = 30/50/70/90^\circ\text{C}$, pulsed I_{sc} (1ms) applied, V_{D1-4} measured
- Plot: V_D vs. T_J characteristic

2) Test performance: determination of T_J at $T_{amb}=75^\circ\text{C}$

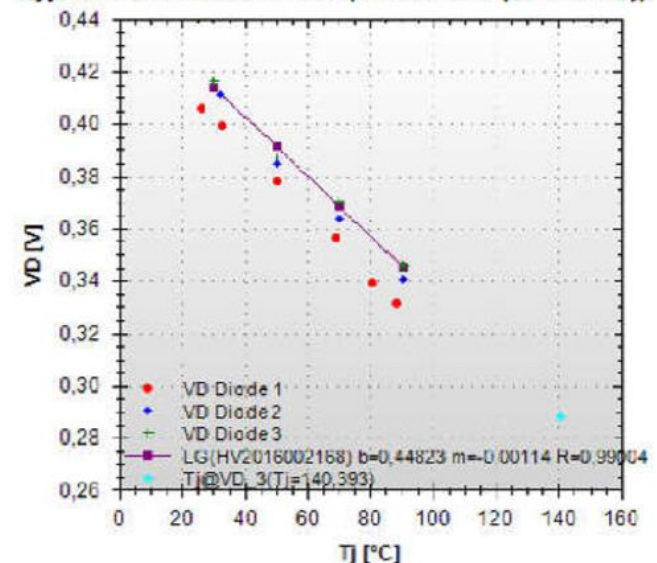
- Module heated to $75^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$, current $I_{sc}(\text{STC})$ applied for 1 hour
- After 1 hour: V_D of each diode measured
- T_J obtained from extrapolation of V_D vs. T_J characteristic

3) Test performance: higher current

- Applied current increased to $1.25 * I_{sc}$ for 1 h at $75^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$

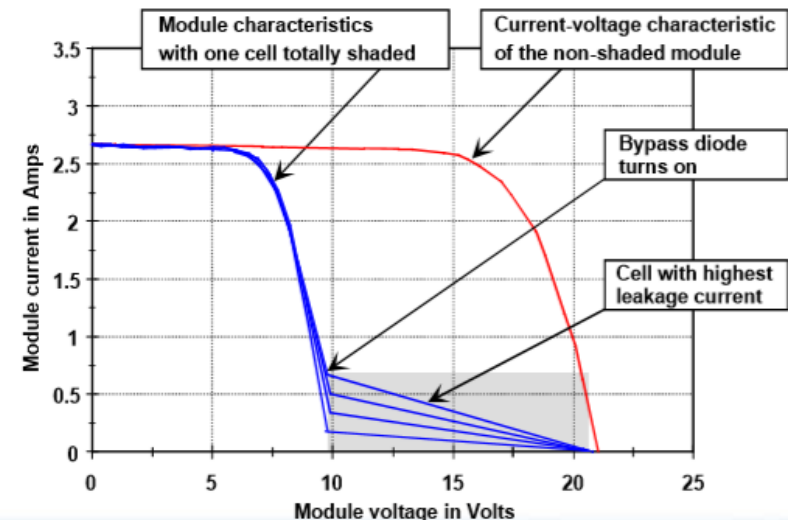
Control measurements: MQT 01 (Visual inspection), MQT 15 (Wet leakage current test), MQT 18.2

Bypass Diode Thermal Test (IEC 61215-2 (Ed.1. 2016))



MQT 09 – Hot-spot endurance test (wafer-based technologies)

- Minor changes
- Purpose: To determine module ability to withstand hot-spot heating effects
- Classification of cell interconnection: case S (serial), case PS (parallel-serial), case SP (serial-parallel)
- Selection of four test cells (lowest shunt resistance cell at module edge, (in addition) two lowest shunt resistance cells, highest shunt resistance cell)
- Determination of worst-case shading
- Maintenance of worst-case shading condition for 1h for each selected cell. If temperature of shadowed cell is still increasing after 1h: total exposure time 5h.
- Control measurements:
 - MQT 01 (Visual inspection)
 - MQT 02 (Max. power det.) (functional control)
 - MQT 03 (Insulation test)
 - MQT 15 (Wet leakage current test)



SUBSTRING-MPPT FOR 4-TERMINAL 3-SUBSTRING MODULES

R. Brace¹⁾, A. Neumann²⁾, T. Czarnecki¹⁾, R. Merz²⁾

1) BRC Solar GmbH, Robert-Bosch-Str. 49, 69190 Walldorf, Germany

2) University of Applied Science Karlsruhe, Moltkestraße 30, 76133 Karlsruhe, Germany

*corresponding author: richard.brace@brc-solar.de

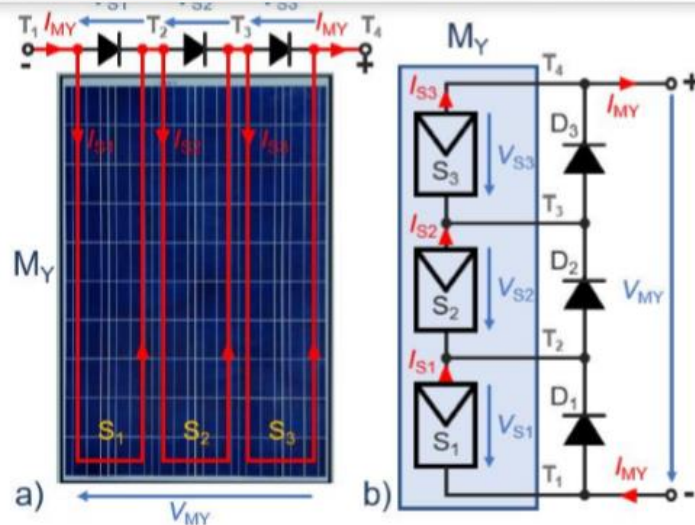


Figure 1: a) Serial connection of substrings S_x in a standard 4-terminal PV-module b) M_Y with protection diodes D_x result in a module voltage $V_{MY} = V_{S1} + V_{S2} + V_{S3}$ and a common module current $I_{MY} = I_{S1} + I_{S2} + I_{S3}$ for homogeneous irradiance.

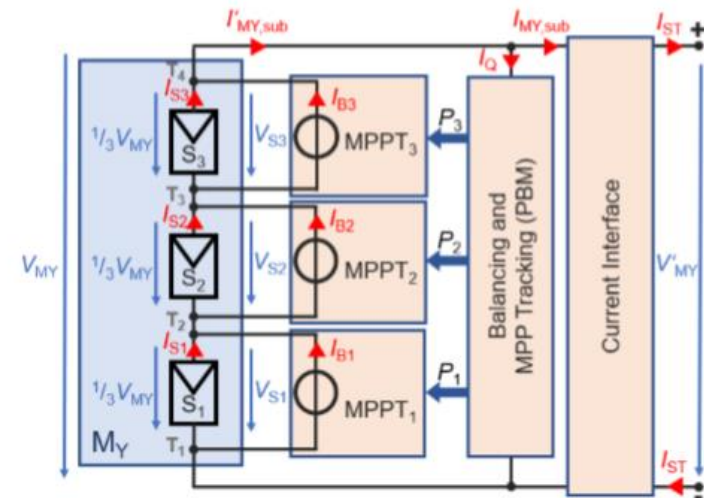


Figure 3: Substring-MPPT for independent I_{Sx} and V_{Sx} of serial substrings S_x . Power balancing sets $V_{Sx} = 1/3 V_{MY} \approx V_{Sx,MPP}$ and current interface fits I_{MY} to I_{ST} and V_{MY} to V_{MY}' .

Hamed Hanifi^{1,2*}, Jens Schneider¹, Joerg Bagdahn^{1,2}

¹Fraunhofer-Center for Silicon Photovoltaics CSP, Otto-Eissfeldt-Str. 12, 06120 Halle (Saale), Germany

²Anhalt University of Applied Sciences, Faculty EMW, Bernburger Str. 55, D-06366, Koethen, Germany

*Corresponding author: +49 345 5589 5515, hamed.hanifi@csp.fraunhofer.de

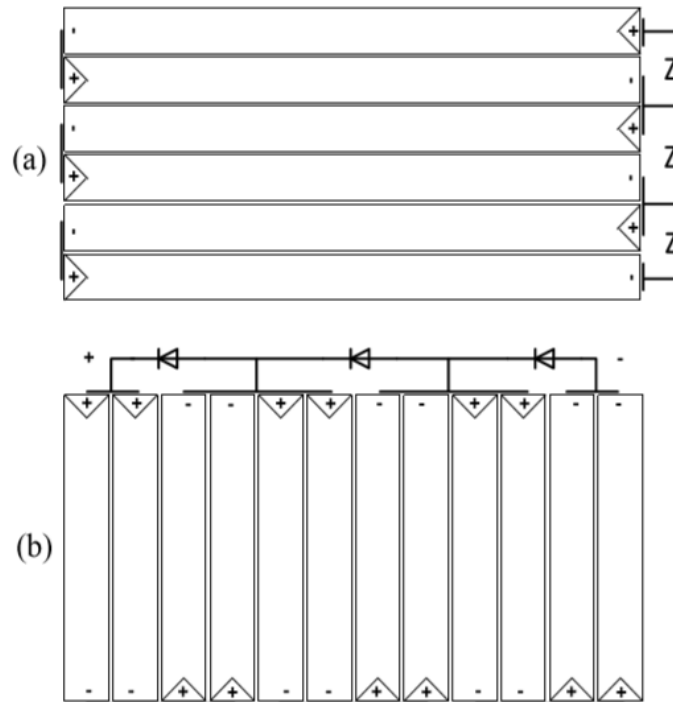


Figure 3: Schematic module designs:

(a) The standard 72 full-cell module with 6 strings and 3 bypass diodes. Each block represents a string with 12 full size cells in series and their cell connectors.

(b) The half-cell module with 144 halved cells and 12 substrings. Each block represents a substring of 12 halved cells connected in series and their cell connectors. Two series connected paralleled substrings form a string [7].