

PV-Watchdog: Effektives Monitoring von PV-Modulen

H. Oldenkamp¹, B. Litzenburger², L. Podlowski²

¹OKE-Services, Keizerstraat 121, NL-2584 BD Den Haag

²SOLON AG, Ederstr. 16, D-12059 Berlin
Tel.: +49 30 81879-0, Fax: +49 30 81879-110
E-mail: bernd.litzenburger@solonag.com
Internet: www.solonag.com

1. Einleitung

PV-Systeme sollen möglichst effizient und zuverlässig arbeiten. Insbesondere die Modelle zur Einspeisevergütung bei netzgekoppelten Anlagen erfordern hohe Verfügbarkeit und Systemwirkungsgrade bei der Nutzung von Solarenergie. Nicht zuletzt deshalb ist das Ertragsverhältnis *Performance Ratio* (PR) einer der wichtigsten Parameter für die Charakterisierung von PV-Systemen. Neben der Verwendung qualitativ hochwertiger Komponenten sind daher einwandfrei installierte und verlässlich arbeitende Systeme eine notwendige Voraussetzung für das Erreichen guter PR-Werte.

Für den *Aufbau* einer PV-Anlage bedeutet dies sowohl eine sorgfältig abgestimmte Planung, als auch eine korrekte Installation aller Systemkomponenten. Für den *Betrieb* der Anlage bedeutet dies vor allem auch die perfekte Arbeitsweise der elektrischen Kopplung zwischen Modulen und Wechselrichter zur Nutzung des maximalen Umwandlungswirkungsgrades (MPP-Tracking) unter allen Betriebsbedingungen.

Zur Sicherstellung der einwandfreien Funktion sowohl nach der Installation, als auch im späteren Betrieb der Anlage sind oft umfangreiche und aufwendige Messungen notwendig, und durchaus auch üblich.

Um diese Überwachung zu vereinfachen wurde ein effektives und zuverlässiges Monitoring-System entwickelt, das es auf der Basis eines einfachen, in jedes Modul integrierten Sensors („*PV-Watchdog*“) gestattet, jederzeit ohne großen Aufwand den Betriebsstatus der Anlage zu kontrollieren. Spezielle Meßtechniken mit zusätzlichen Geräten sind daher nicht erforderlich.

Im folgenden werden Entwicklung, Funktionsweise und Anwendung des Sensorsystems *PV-Watchdog* beschrieben, sowie die Vorteile für den Anwender aufgezeigt.

2. Funktionsprinzip

Die meisten PV-Module auf kristalliner Siliziumbasis enthalten mehrere, in der Regel in Serie geschaltete, gleichartige Solarzellen. Um dem Modul die maximale elektrische Leistung zu entnehmen, muß es bei der passenden Spannung, der *Maximum Power Point* Spannung V_{mpp} betrieben werden. Für ein gleichmäßig beleuchtetes Modul mit mehr oder weniger identischen Zellen hängt V_{mpp} hauptsächlich von zwei Faktoren ab: der Einstrahlung E und der Zelltemperatur T . Sind diese beiden Einflußgrößen bekannt, läßt sich prinzipiell unter Einbeziehung der grundsätzlichen Moduldaten die MPP-Spannung V_{mpp} berechnen. Wenn also die beiden Meteorologie-Betriebsparameter E und T gemessen werden, kann die zugehörige MPP-Spannung V_{mpp} eindeutig vorhergesagt werden.

Das Prinzip der Überwachung besteht nun darin zu überprüfen, ob die momentane Betriebsspannung V des Moduls in einem festzulegenden Maß im dazu passenden Spannungsbereich des MPP-Trackings liegt. Hierzu ist das Modul mit einem sehr kleinen, im Laminat integrierten Sensorsystem ausgestattet (Abbildung 1), welches ständig die Betriebsparameter Einstrahlung, Temperatur und Modulspannung mißt. Aus den Daten für Einstrahlung und Temperatur wird mittels eines kleinen Mikroprozessors die zugehörige, d.h. die zu erwartende MPP-Spannung V_{mpp} für

das Modul bestimmt und mit der aktuell gemessenen Modulspannung V verglichen (Abbildung 2). Hierzu berechnet der PV-watchdog für die aktuelle Betriebsspannung den relativen Leistungsverlust und vergleicht diesen Wert mit dem vorher einprogrammierten Schwellwert (z.B. 10%). Wenn das Modul angemessen im MPP arbeitet, d.h. wenn der Verlust diese Schwelle nicht übersteigt, zeigen zwei LED's (orange und infrarot) auf der Vorderseite des Moduls den korrekten Betriebsstatus an.

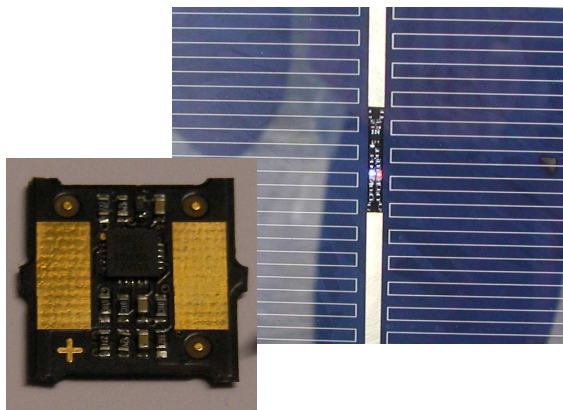


Abb. 1: PV-Watchdog Sensorsystem, integriert zwischen zwei Zellen

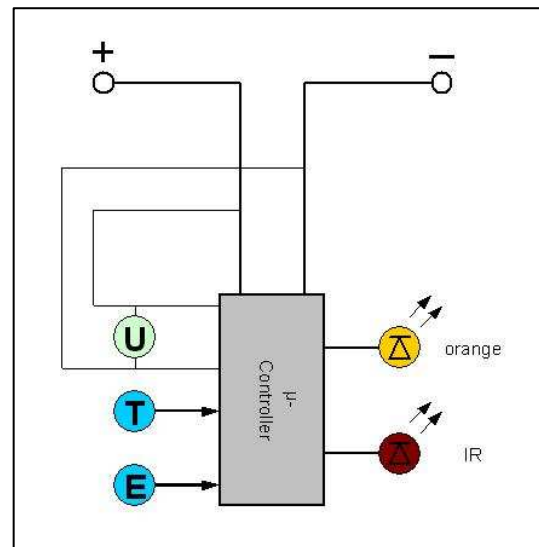


Abb. 2: Funktionsprinzip des PV-Watchdog

Abbildung 3 und 4 zeigen exemplarisch die Wirkungsweise des PV-Watchdog Arbeitsprozesses anhand typischer Kennlinien: für eine gegebene Einstrahlung und Temperatur (E , T) ergibt sich die in Abb. 3 dargestellte Strom-Spannungs- (IV-) Kennlinie, sowie die daraus abgeleitete Leistungs-Spannungs- (PV-) Kennlinie (Abb. 4). Das PV-Diagramm zeigt die Spannung V_{mpp} , bei der das Modul für maximale Leistungsabgabe (100%) betrieben werden sollte. Innerhalb des markierten Spannungs-Bereichs um den MPP erreicht die Leistung noch mindestens 90% der Maximalleistung. Im Betrieb außerhalb dieses Spannungsbereiches ist die Modulleistung geringer als 90% der erreichbaren Leistung.

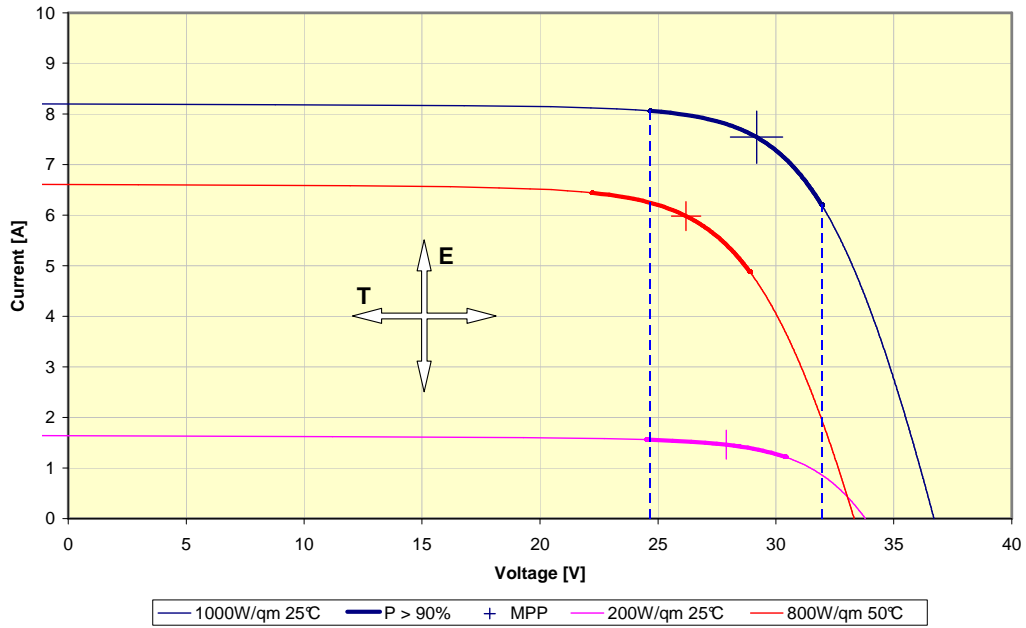


Abb. 3: IV-Kennlinien für drei Einsatzbedingungen (E , T). Die Abschnitte mit $P > 90\%$ sind hervorgehoben („PV-Watchdog Akzeptanzbereich“).

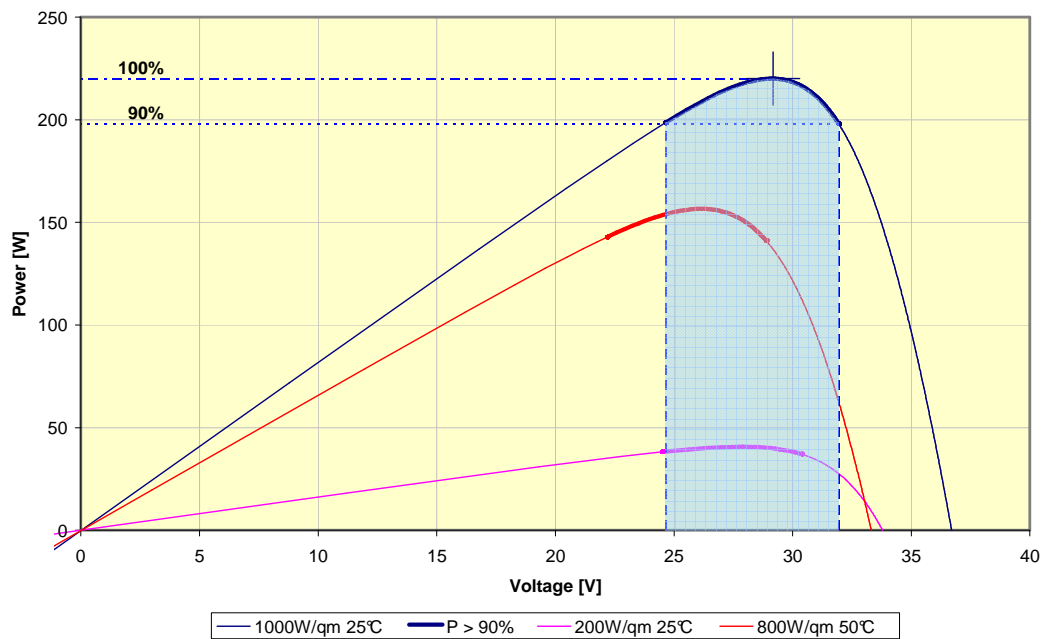


Abb. 4: PV-Kennlinien für die Einsatzbedingungen (E , T) wie in Abb. 3. Der markierte Abschnitt kennzeichnet für $E = 1000 \text{ W/m}^2$, $T = 25^\circ\text{C}$ den Spannungsbereich, in dem die Modulleistung $P > 90\%$ ist.

Aus der Festlegung einer relativen, durch den Hersteller frei wählbaren Mindestleistungsgrenze (hier 90%) kann also ein Spannungsbereich abgeleitet werden, bei dessen Einhaltung diese Modulmindestleistung auch erreicht wird. Dies gilt jeweils für die zugehörige Betriebssituation (E, T), ist also von der momentanen Einstrahlung und Temperatur abhängig. In Abb. 3 ist die grundlegende Beeinflussung des MPP und damit auch des Überwachungs-Spannungsbereiches durch diese beiden Parameter angedeutet.

Der Mikroprozessor benötigt neben den aktuellen Meßwerten Modulspannung V , Einstrahlung E und Temperatur T lediglich einige Basisdaten des zugehörigen Moduls, um die jeweilige IV- bzw. PV-Kennlinie berechnen zu können. Diese Basisdaten werden bei der Herstellung des Moduls individuell einprogrammiert (vgl. Abschnitt 6).

Die Meßsensoren für Einstrahlung und Temperatur basieren auf Si-Technologie, da hierbei die spektrale Empfindlichkeit bzw. die Temperatur-Koeffizienten gut an die verwendeten Solarzellen angepaßt werden können. Da für den Betrieb nur wenige mA notwendig sind, kann die Versorgungsspannung des Sensorsystems der Meßspannung entnommen werden, womit das System schon bei Einstrahlungen über 50W/m^2 zuverlässig arbeitet. Die räumliche Nähe des Sensors zu den Zellen garantiert dabei aussagekräftige Temperaturmeßwerte.

3. Anwendungen

Das PV-Watchdog System überwacht kontinuierlich den MPP-Betrieb jedes einzelnen Moduls und gestattet damit jederzeit eine Funktionskontrolle der PV-Anlage. Für den Anwender hat dies folgenden Nutzen:

Unmittelbar nach der Installation kann ein einfacher visueller System-Check durchgeführt werden, bei dem keine Strom- und Spannungsmessungen erforderlich sind. Modul- oder Anschlußfehler können leicht und schnell ermittelt werden.

Obwohl jeder PV-watchdog nur Daten für „sein“ Modul erfaßt, können damit auch Informationen über das gesamte System ermittelt werden: so sind mismatch-

Verluste sowohl innerhalb von Modulsträngen, als auch bei parallelen Strängen detektierbar. Desweiteren können Module mit kurzgeschlossenen Bypass-Dioden direkt erkannt werden. Wenn der Wechselrichter nicht im MPP arbeitet, zeigen dies alle PV-watchdogs an.

Für die Funktionskontrolle ist kein „Expertenwissen“ notwendig, es genügt ein „einfacher Blick“ auf die Anlage. Ebenso ist eine regelmäßige Überprüfung durch den Betreiber möglich. Die infrarot-LED des PV-watchdog gestattet dabei eine schnelle und übersichtliche Auswertung von Modulfeldern mittels z.B. einer Digitalkamera. Ein IR-Filter vor der Kamera hilft, die sichtbare Strahlung durch direktes Sonnenlicht abzublocken und nur das Signallight der IR-LED zu detektieren (Abbildung 5).

Das Monitor-System zeichnet sich, bedingt durch den einfachen Aufbau, durch geringe Kosten (wenige € pro Modul) und eine hohe Zuverlässigkeit aus. So wirken sich z.B. natürliche Alterungserscheinungen in der Transparenz der Zelleinbettung in gleicher Weise auf den Einstrahlungssensor des PV-Watchdog aus und können somit nicht zu langzeitbedingten Fehlbeurteilungen führen.

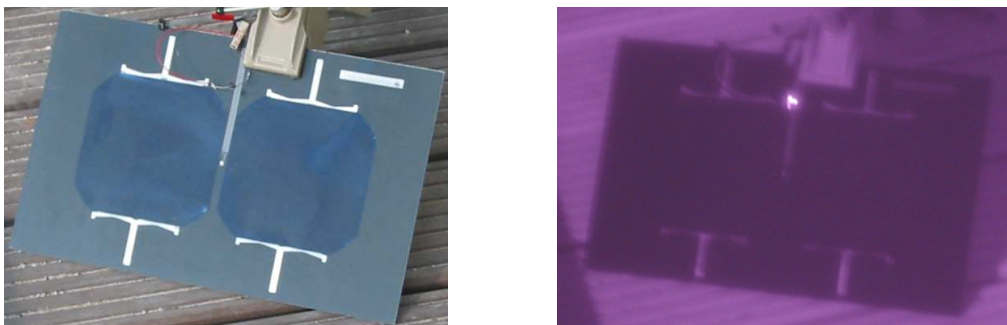


Abb. 5: *PV-Watchdog in direktem Sonnenlicht (links), bzw. durch ein IR-Filter betrachtet (rechts).*

4. Betriebsszenario: ein Anwendungsbeispiel

Die Funktionsweise des PV-Watchdog soll an einem Anwendungsbeispiel näher erläutert werden. Dabei wird folgendes Betriebsszenario angenommen: eine PV-Anlage, bestehend aus 6 seriell verschalteten 220W-Modulen (Moduldaten: 60 Zellen, $P_{max} \approx 220Wp$, $U_{oc} \approx 36V$, $U_{mpp} \approx 30V$, $I_{sc} \approx 8A$, $I_{mpp} \approx 7,5A$) wird an einem

netzgekoppelten Wechselrichter betrieben, wobei *eine* Zelle *eines* Moduls zu 25% verschattet ist, also eine gewissermaßen relativ geringfügige „Störung“ vorliegt.

Abbildung 6 und 7 zeigen die IV- bzw. PV-Kennlinien des verschatteten Moduls für diesen, sowie für den unverschatteten Betrieb.

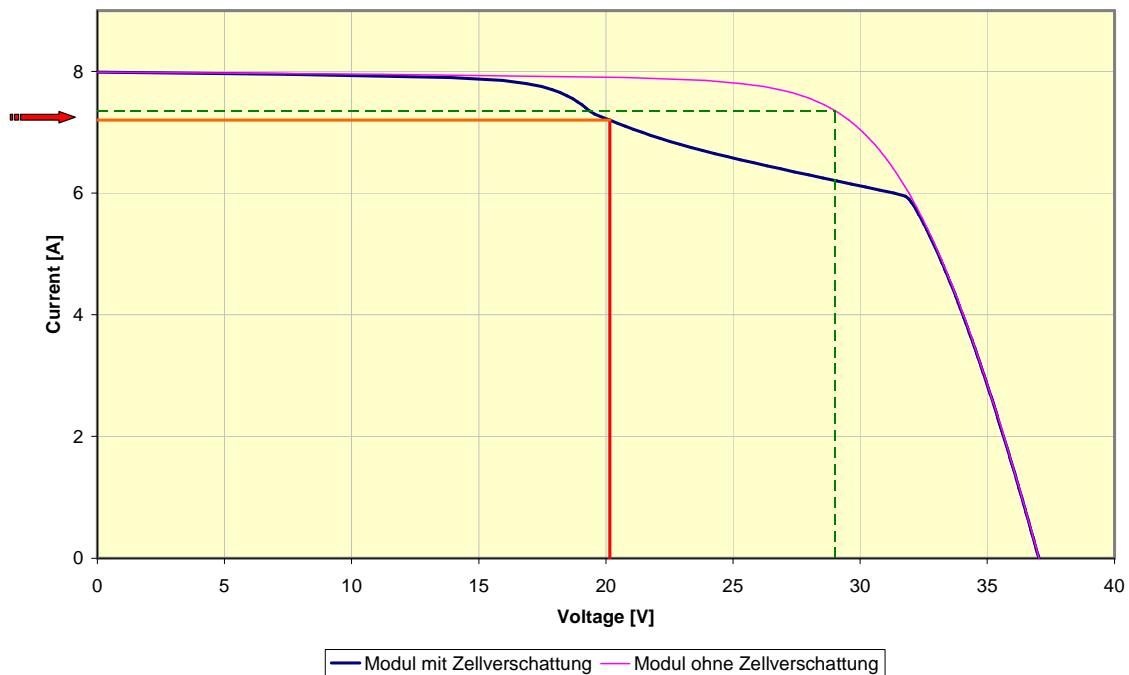


Abb. 6: IV-Kennlinie für ein Modul mit einer 25% verschatteten Zelle. Der MPP-Arbeitsstrom der **Gesamtanlage** (Pfeil) führt zum Betrieb **dieses** Moduls deutlich außerhalb seines MPP.

Im Fall der Verschattung weisen die Kennlinien den typischen Verlauf mit charakteristischen Abweichungen von der „Normalform“ auf. In Abb. 7 ist zu erkennen, daß der MPP bzw. V_{mpp} des verschatteten Moduls *für sich alleine betrachtet* gerade noch im 90%-Akzeptanzbereich der Modulleistung liegen würde. Der Wechselrichter wird im Fall der „Störung“ aber einen Arbeitspunkt einregeln, der für die *gesamte* Anlage gilt. Daher ergibt sich für alle Module ein Arbeitsstrom, der maßgeblich durch die 5 unverschatteten Module geprägt wird und somit vom I_{mpp} des Idealfalls nur wenig abweicht (vgl. Abb. 6). Für das verschattete Modul bedeutet dies jedoch, daß sich bei diesem weitgehend „von außen“ bestimmten Arbeitsstrom

aufgrund der durch die Verschattung veränderten IV-Kennlinie ein Arbeitspunkt einstellt, der deutlich vom MPP für dieses Modul abweicht (Abb. 7). Als Folge davon liegt dieser Arbeitspunkt auch nicht mehr im 90%-Akzeptanzbereich der Modulleistung, was somit vom PV-Watchdog unmittelbar angezeigt wird.

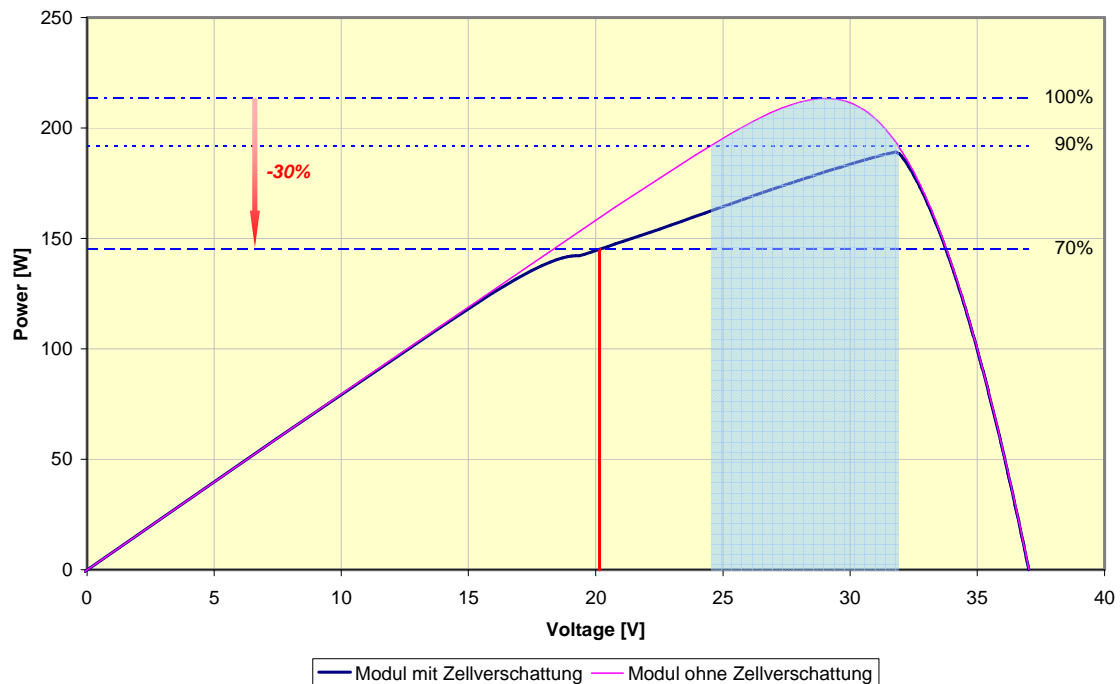


Abb. 7: PV-Kennlinie für das Modul aus Abb. 6. Die resultierende Betriebsspannung dieses Moduls bewirkt einen Leistungsverlust des Moduls von ca. 30%! Der PV-Watchdog zeigt dies an, da die Modulspannung außerhalb des „Akzeptanzbereiches“ liegt.

Es sei an dieser Stelle angemerkt, daß das Beispielszenario nicht die schwerwiegendste Betriebssituation darstellt, in denen der PV-Watchdog dies anzeigt: WR-Fehlfunktionen, bei denen der PV-Generator im Leerlauf ist, ebenso wie z.B. Module mit Kurzschluß-defekten Bypaßdioden stellen sicher Zustände dar, bei denen es umsomehr um sichere Erkennung von Fehlern geht. Das Beispiel soll lediglich die Empfindlichkeit des PV-watchdog Systems dokumentieren.

5. Berechnungsmodell

Um eine genaue Vorhersage des Leistungsvermögens eines PV-Moduls als Funktion der Einstrahlung und Temperatur durchführen zu können, wird der PV-Watchdog für jedes Modul individuell eingestellt. Die Prognose der Modulleistung erfolgt mittels der Berechnung der IV-Kennlinie nach dem 1-Dioden-Modell, ergänzt um die Verluste durch Serienwiderstand R_s und Shunt R_{sh} (Gleichung 1 und 2).

$$I = I_{ph}(E) - I_0(T) \left[\exp\left(\frac{V + IR_s}{n kT/e}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

$$I_0(T) = B T^m \exp\left(-\frac{E_{gap}}{n kT}\right) \quad (2)$$

Zur Berechnung der resultierenden Modulkennlinie ist neben den Zellen-Modellparametern nur noch die Anzahl der Zellen, sowie ihre Verschaltung (seriell / parallel) erforderlich (vgl. Abschnitt 6). Die Verwendung dieses parametrisierten Modells ermöglicht die Berechnung der IV- bzw. der PV-Kennlinie unter allen (E, T)-Bedingungen (Abb. 8), die im Betrieb des Moduls auftreten, mit ausreichender Genauigkeit.

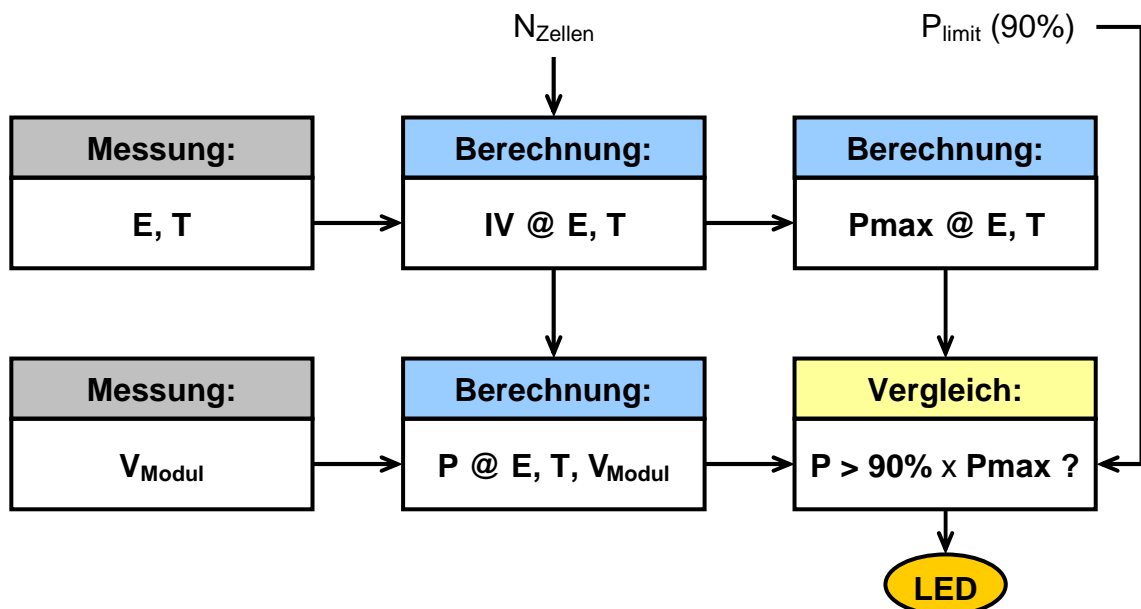


Abb. 8: Berechnungsschema des PV-Watchdog

Zur Ermittlung der Modellparameter (I_{Ph} , $I_0(B, m)$, R_s , R_{sh} , n) wird die gemessene IV-Kennlinie durch die Modellfunktion numerisch angepaßt (vgl. Gleichung 1). Da sich aus der Anpassung *einer* Kurve (bei STC, d.h. $E = 1000\text{W/m}^2$, $T = 25^\circ\text{C}$) nicht alle Parameter zuverlässig bestimmen lassen, wurden einige plausible Vereinfachungen eingeführt: so kann für viele Zelltypen $R_{sh} = \text{fix}$, ebenso wie $n = \text{fix}$ gesetzt werden. Damit läßt sich aus der Leerlaufspannung U_{oc} ein Wert für I_0 ableiten, und es bleiben als Fitparameter noch I_{Ph} und R_s , wobei sich I_{Ph} grundsätzlich aus dem Kurzschlußstrom I_{sc} bestimmen läßt.

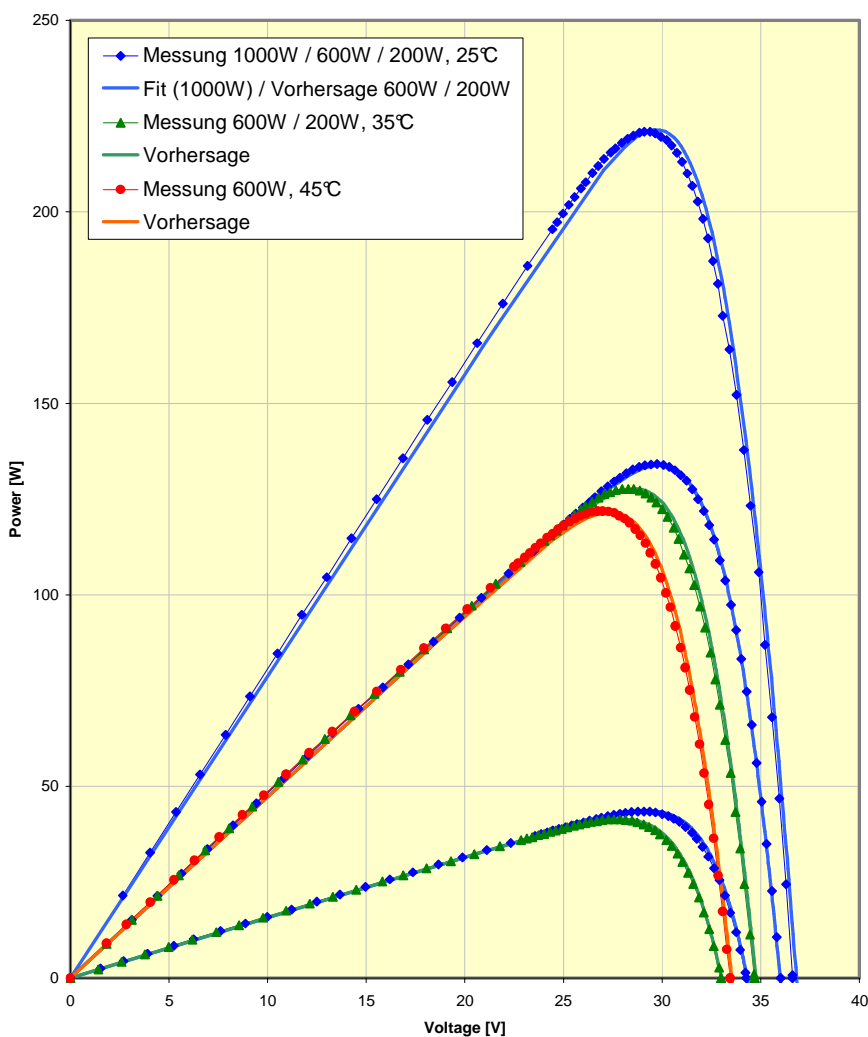


Abb. 9: PV-Kennlinien-Schar für verschiedene Einstrahlungs- und Temperaturkombinationen (E , T). Die Messung bei 1000W/m^2 , 25°C wurde zur Kurvenanpassung verwendet. Mit den daraus abgeleiteten Parametern wurden die übrigen Kurven für die Bedingungen ($600 / 200 \text{W/m}^2$, $35 / 45^\circ\text{C}$) berechnet und mit den Messungen verglichen.

Da I_0 stark temperaturabhängig ist (Gl. 2), müssen B und m bestimmt werden. Daher – und zur Überprüfung des Modells über einen weiten (E , T)-Einsatzbereich –

wurden an einem Modul temperatur- (und einstrahlungs-) abhängige Messungen mit hoher Genauigkeit beim TÜV-Rheinland durchgeführt. Damit konnte $m = \text{fix}$ festgelegt, und B als Fitparameter angepaßt werden. Abbildung 9 zeigt exemplarisch die Ergebnisse der Anpassungsrechnungen.

6. Herstellung und Kalibrierung

Die Integration des PV-Watchdog in das PV-Laminat erfolgt im selben Prozeßschritt wie die Einbettung der Zellen: unmittelbar vor dem Laminationsvorgang wird der vorkonfektionierte Sensor wie die Zellen im Laminataufbau untergebracht. Zu diesem Zeitpunkt ist der Sensor damit noch nicht spezifisch an das Modul angepaßt.

Unmittelbar nach der Leistungs-Vermessung (Flash-Test) des fertigen Moduls wird der PV-Watchdog für jedes Modul individuell kalibriert (Abb. 10): die Vermessung liefert neben der Maximalleistung P_{max} auch die komplette IV-Kennlinie des Moduls unter Standard-Test-Bedingungen (STC). Diese Kennlinie wird nun verwendet um mit einer Anpassungsrechnung nach oben genanntem Modell den Parametersatz zur theoretischen Beschreibung der IV-Kennlinie zu ermitteln. Das angewandte Berechnungsmodell erlaubt jetzt die für dieses Modul individuell angepaßte Bestimmung der IV-Kennlinie unter verschiedenen Einstrahlungs- und Temperaturbedingungen, sowie die Bestimmung des relativen Leistungsverlustes in Abhängigkeit von der Betriebsspannung (vgl. Abschnitt 5).

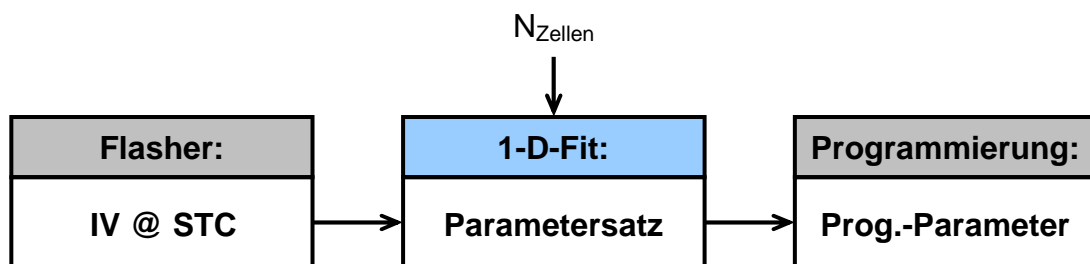


Abb. 10: Kalibrierschema des PV-Watchdog

Die Modellparameter werden auf den PV-Watchdog mittels IR-Schnittstelle übertragen, wobei der Einstrahlungssensor (Photodiode) als IR-Empfänger für die Daten dient. Ebenso werden bei der Datenübertragung Programmbasisparameter festgelegt, wie u.a. die Schwellwerte für den tolerierten relativen Leistungsverlust, sowie für die Mindesteinstrahlung, bei der der PV-Watchdog zu arbeiten beginnt. Damit ist der PV-Watchdog an das individuelle Modul angepaßt und betriebsbereit.

7. Zusammenfassung

Zur Überwachung der korrekten Funktionsweise einer PV-Anlage wurde ein einfaches, effektives Sensorsystem entwickelt, das es dem Anwender gestattet, jederzeit ohne großen Aufwand den Betriebsstatus der Module zu kontrollieren. Neben den einzelnen Modulen kann auch das gesamte System genau geprüft und überwacht werden.

Das Sensor-System mißt dabei ständig die Betriebsparameter Einstrahlung, Temperatur und Modulspannung, bestimmt daraus den momentanen relativen Leistungsverlust und zeigt diesen durch LED's an. Hierzu wird jeder Sensor an die Leistungsdaten des Moduls angepaßt und beim Herstellungsprozeß entsprechend individuell programmiert.

Derzeit werden Funktionsdetails und Zuverlässigkeit des PV-Watchdog Systems sowohl in realen Anwendungen als auch mit beschleunigten Alterungstests überprüft.