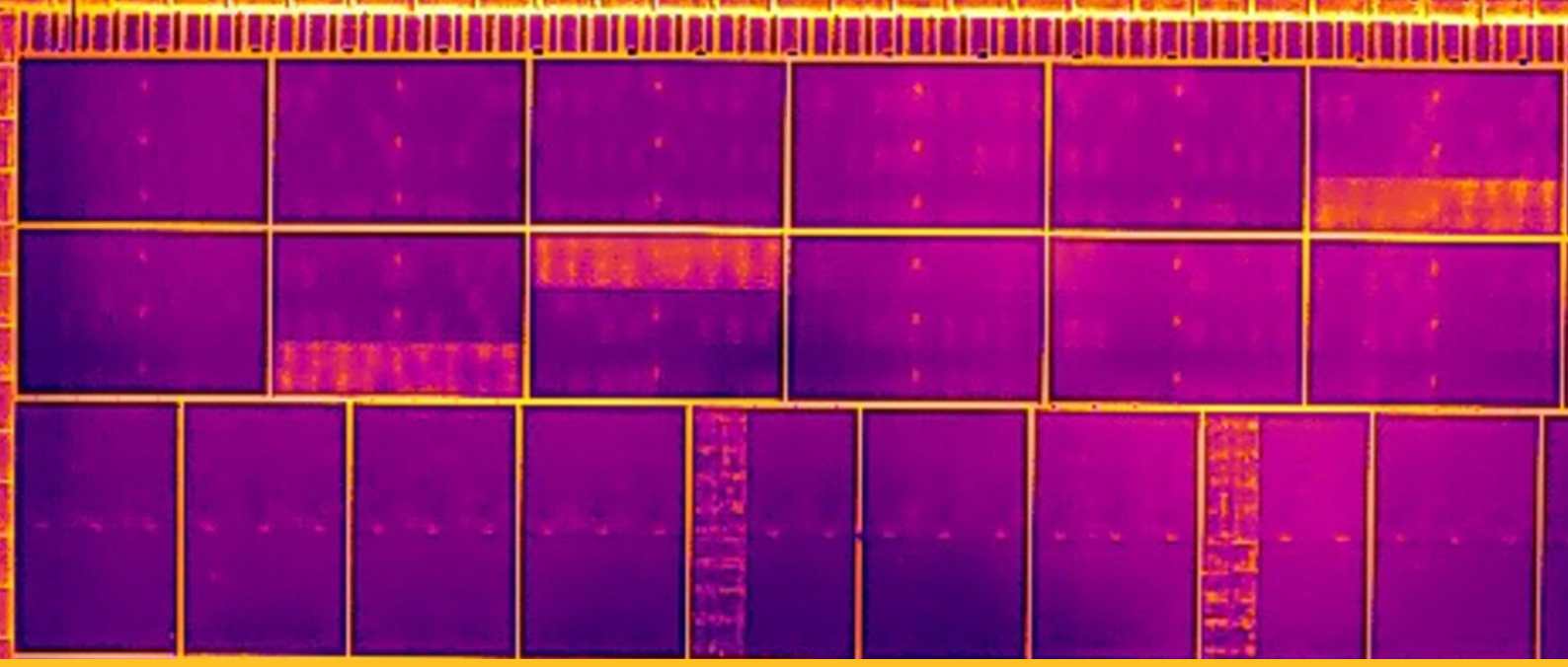


Anleitung zur Funktionsprüfung der Bypass-Dioden von PV-Modulen

Einfacher Durchgangstest mit einem DC-Netzteil im Dunkeln
für Module mit Schottky-Dioden

Janina Reichstein, Matthias Burri

Version 2.0, 17. November 2026

Berner Fachhochschule
Haute école spécialisée bernoise
Bern University of Applied Sciences

Departement Technik und Informatik
Labor für Photovoltaiksysteme

Inhaltsverzeichnis

1 Haftungsausschluss 1

2 Einleitung und Geltungsbereich 1

3 Sicherheitshinweise 2

4 Benötigtes Material 2

5 Voraussetzungen 3

6 Erwartungswert und Referenzmessung 3

7 Durchführung 3

8 Auswertung der Ergebnisse 5

9 Grenzen des Verfahrens 6

10 Zusammenfassung/Checkliste 7

1 Haftungsausschluss

Diese Anleitung beschreibt ein einfaches Prüfverfahren, mit dem sich ausgefallene Bypass-Dioden (nur unterbrochene nicht kurzgeschlossene) in PV-Modulen mit geringem Aufwand erkennen lassen. Es handelt sich um eine Plausibilitätsprüfung und nicht um eine normgerechte Prüfung (z. B. nach IEC 61215 oder IEC 62979).

Es besteht keine Garantie, dass defekte Bypass-Dioden mit diesem Verfahren gefunden werden. Insbesondere Dioden, die nicht klar ausgefallen sind, sondern nur schlecht kontaktiert sind (z. B. schlechte oder gealterte Lötstellen, korrodierte Anschlüsse, intermittierende oder nur bei erhöhter Temperatur bzw. höherem Strom auftretende Fehler), können mit dem Test unentdeckt bleiben. Ein bestandener Test ist somit kein Nachweis, dass die Bypass-Dioden im realen Betrieb (bei Nennstrom, Teilverschattung und hoher Temperatur) zuverlässig funktionieren.

Das Labor für Photovoltaiksysteme der Berner Fachhochschule übernimmt keine Verantwortung und keine Haftung für Schäden an Personen, Modulen, Messgeräten oder anderen Sachen sowie für Fehler, Fehlinterpretationen oder Folgeschäden, die aus der Anwendung dieser Anleitung entstehen. Die Anwendung erfolgt auf eigene Verantwortung und ausschliesslich durch fachkundige Personen.

2 Einleitung und Geltungsbereich

Bypass-Dioden sind ein wichtiges Bauteil in PV-Modulen: Werden einzelne Zellen verschattet oder sind sie beschädigt, leiten die Dioden im Betrieb den Strom an den betroffenen Zellen vorbei. Dadurch verhindern sie eine übermässige Erwärmung (Hotspots), die im ungünstigsten Fall zum Brand des Moduls führen kann, und begrenzen den Leistungsverlust. Die Dioden sind antiparallel zu den Zellsträngen (Substrings) so angebracht, dass ihre Durchlassrichtung der Stromrichtung des Moduls im Normalbetrieb entspricht.

Das hier beschriebene Verfahren nutzt genau diese Anordnung: Wird ein Modul im Dunkeln in seiner Betriebsrichtung mit einem kleinen Strom aus einem Netzteil gespeist, fliesst dieser Strom ausschliesslich durch die in Serie liegenden Bypass-Dioden. Die dabei gemessene Spannung entspricht der Summe der Durchlassspannungen aller Dioden und erlaubt eine Beurteilung ihrer Funktion.

Die Anleitung gilt für kristalline PV-Module (mono-/polykristallin, Voll- und Halbzellen) mit Schottky-Bypass-Dioden in der Anschlussdose, unabhängig von Hersteller, Zellanzahl und Anzahl der Dioden. Bei Modulen mit anderen Diodentypen, aktiven Bypass-Elementen (z. B. integrierte Elektronik, "smart junction box") oder ohne Bypass-Dioden ist das Verfahren nicht anwendbar oder liefert abweichende Werte. Diese Anleitung bezieht sich auf die Messung eines einzelnen Moduls. Das Messverfahren ist vom Prizip her auch auf mehrere in Serie geschaltete Module anwendbar. Diese Anwendung wird hier jeodch nicht weiter beschrieben.

3 Sicherheitshinweise

Warnung: PV-Module erzeugen bei Licht eine Spannung, auch bei schwachem Raumlicht. Bei Serienverschaltung mehrerer Module oder bei grossen Modulen können gefährliche Spannungen auftreten. Es dürfen ausschliesslich einzelne, nicht verschaltete Module geprüft werden. Blanke Kontakte (Modulstecker, Laborstecker) nicht berühren.

Warnung: Nur ein Netzteil mit einstellbarer Strom- *und* Spannungsbegrenzung verwenden. Batterien, Akkus, Ladegeräte oder Netzteile ohne Strombegrenzung sind ungeeignet und können Dioden, Zellen oder Kabel zerstören und Brände verursachen.

Warnung: Die Spannungsbegrenzung des Netzteils muss vor dem Anschliessen auf einen tiefen Wert (max. 10 V) eingestellt werden. Bei fehlender bzw. unterbrochener Bypass-Diode würde sonst die volle Netzteilespannung in Sperrrichtung an den Zellen anliegen, was zum Durchbruch und zur dauerhaften Schädigung der Zellen führen kann.

Warnung: Steckverbindungen (MC4 o. ä.) nie unter Last trennen oder verbinden. Der Output des Netzteils ist beim Verkabeln immer ausgeschaltet.

Warnung: Module mit sichtbaren Schäden (Glasbruch, beschädigte oder angeschmorte Kabel, offene oder feuchte Anschlussdose, Brandspuren) nicht prüfen bzw. nur mit besonderer Vorsicht durch Fachpersonal. Bei Glasbruch besteht zudem Schnittgefahr.

Hinweis: Die Prüfung soll nur kurz erfolgen (wenige Sekunden pro Modul). Bei 1 A entsteht in jeder Diode nur eine geringe Verlustleistung; längere Prüfungen oder höhere Ströme erwärmen die Anschlussdose jedoch unnötig.

Hinweis: Elektrische Arbeiten dürfen nur durch fachkundige bzw. elektrotechnisch unterwiesene Personen ausgeführt werden. Örtliche Vorschriften und Herstellerangaben sind zu beachten.

4 Benötigtes Material

DC-Netzteil	mit einstellbarer Strom- und Spannungsbegrenzung sowie Anzeige von Strom und Spannung; wenige Ampere und wenige Volt sind ausreichend
Adapterkabel	Modulstecker (meist MC4, passend zum Modul) auf Netzteil-kompatible Stecker (meist 4-mm-Laborstecker)
Referenzmodul	wenn möglich ein Modul des gleichen Typs, dessen Bypass-Dioden bekannt in Ordnung sind
Datenblatt	zum Ablesen der Anzahl Bypass-Dioden (alternativ Anschlussdose betrachten)

Bei den Adapterkabeln ist es sinnvoll, eine eindeutige Farbkodierung zu verwenden und diese *vor* dem Test mit einem Multimeter zu überprüfen, da die Zuordnung von Plus- und Minusstecker je nach Hersteller unterschiedlich sein kann.

5 Voraussetzungen

Der Test soll möglichst ohne Einstrahlung und bei möglichst konstanten Rest- bzw. Kunstlichtverhältnissen erfolgen. Das geprüfte Modul darf insbesondere nicht im direkten Licht eines Fensters stehen. Auch starkes künstliches Licht kann zu viel sein. Ein normal beleuchteter Raum ist in der Regel kein Problem; gegebenenfalls können die Module abgedeckt oder mit der Vorderseite gegen eine Wand gestellt werden.

> **Hinweis:** Nicht alle Netzteile zeigen einen von aussen eingespeisten Strom bei ausgeschaltetem Output an. Zeigt das Gerät 0 A, obwohl das Modul erkennbar beleuchtet ist, ist die Lichtprüfung mit diesem Gerät nicht aussagekräftig. In diesem Fall muss die Dunkelheit anders sichergestellt werden (Abdecken).

6 Erwartungswert und Referenzmessung

Die zu erwartende Spannung hängt von der Anzahl der in Serie liegenden Bypass-Dioden und von deren Durchlassspannung ab: $U_{\text{erwartet}} \approx n \cdot U_F$ mit n = Anzahl Bypass-Dioden des Moduls (typisch 1 bis 4, meist 3) und U_F = Durchlassspannung einer Schottky-Diode bei 1 A (typisch ca. 0,3 bis 0,5 V, abhängig von Diodentyp und Temperatur). Für ein übliches Modul mit drei Dioden ergeben sich somit ca. 1 bis 1,5 V. Die Anzahl der Dioden kann dem Datenblatt entnommen oder aus der Anzahl der Anschlüsse in der Anschlussdose abgeleitet werden.

Da U_F je nach Diodentyp und Hersteller unterschiedlich ist, wird dringend empfohlen, den **Referenzwert direkt zu messen**: Zuerst ein Modul des gleichen Typs prüfen, dessen Bypass-Dioden bekannt in Ordnung sind (z. B. ein Neumodul), oder mehrere Module derselben Charge messen und den häufigsten Wert als Referenz verwenden. Alle weiteren Module werden dann mit diesem Referenzwert verglichen. Referenz- und Prüfmodule müssen unter denselben Lichtverhältnissen, bei gleicher Stromeinstellung und mit denselben Kabeln gemessen werden.

> **Hinweis:** Restlicht senkt die gemessene Spannung, da ein Teil des eingespeisten Stroms durch die Zellen kompensiert wird. Temperatur senkt die Durchlassspannung ebenfalls (ca. -2 mV/K pro Diode). Ändern sich Licht oder Modultemperatur zwischen den Messungen, sind die Werte nur eingeschränkt vergleichbar.

7 Durchführung

Schritt 1: Netzteil einstellen (Output aus). Strombegrenzung auf 1 A, Spannungsbegrenzung auf ca. 5 bis maximal 10 V einstellen. Die tiefe Spannungsbegrenzung ist zwingend (siehe Abschnitt 3); für die Messung selbst sind nur ca. 1 bis 2 V nötig. Bei Netzteilen ohne separate Einstellmöglichkeit die Grenzwerte vorab an einem Kurzschluss bzw. im Leerlauf kontrollieren. Alternativ wird die Spannungsbegrenzung ganz auf 0 eingestellt und erst nach dem Einschalten des Outputs hochgedreht und dabei die Stromstärke beobachtet.

Schritt 2: Modul anschliessen. Der *Minuspol* des Moduls wird an den *Pluspol* des Netzteils angeschlossen und der *Pluspol* des Moduls an den *Minuspol* des Netzteils (siehe

Abbildung 1). Am Netzteil ist der Pluspol in der Regel rot und der Minuspol schwarz markiert; dies sowie die Farbkodierung der Adapterkabel ist zu überprüfen.

Schritt 3: Lichtverhältnisse prüfen. Netzteil einschalten, Output bleibt aus. Anzeige: 0 bis ca. 0,3 A und ca. 0 V. Es fliesst gegebenenfalls etwas Kurzschlussstrom des Moduls aufgrund des Restlichts, es liegt aber keine Spannung vom Netzteil am Modul an. Ist der Strom höher als ca. 0,3 A, Modul abdecken oder Standort wechseln. Bei erhöhtem Strom muss das Modul abgedeckt werden, bevor die Kabel ausgezogen werden können, sonst besteht die Gefahr eines Lichtbogens und der Beschädigung der Stecker.

Schritt 4: Output einschalten und ablesen. Output des Netzteils einschalten, Strom und Spannung nach 1 bis 2 Sekunden ablesen und notieren. Das Netzteil sollte in der Strombegrenzung arbeiten (1 A). Output danach wieder ausschalten.

Schritt 5: Modul abklemmen. Erst bei ausgeschaltetem Output die Steckverbindungen trennen und das nächste Modul anschliessen.

> **Hinweis:** Bei falscher Polarität (Pluspol des Moduls am Pluspol des Netzteils) liegen die Zellen in Durchlassrichtung. Da die Spannungsbegrenzung weit unter der Leerlaufspannung des Moduls liegt, fliesst dann kein Strom und das Netzteil zeigt die eingestellte Spannungsgrenze oder die Leerlaufspannung des Moduls bei ca. 0 A an. Dieses Bild ist von einer unterbrochenen Diode nicht zweifelsfrei zu unterscheiden: Bei einem solchen Ergebnis immer zuerst Polarität und Steckverbindungen kontrollieren.

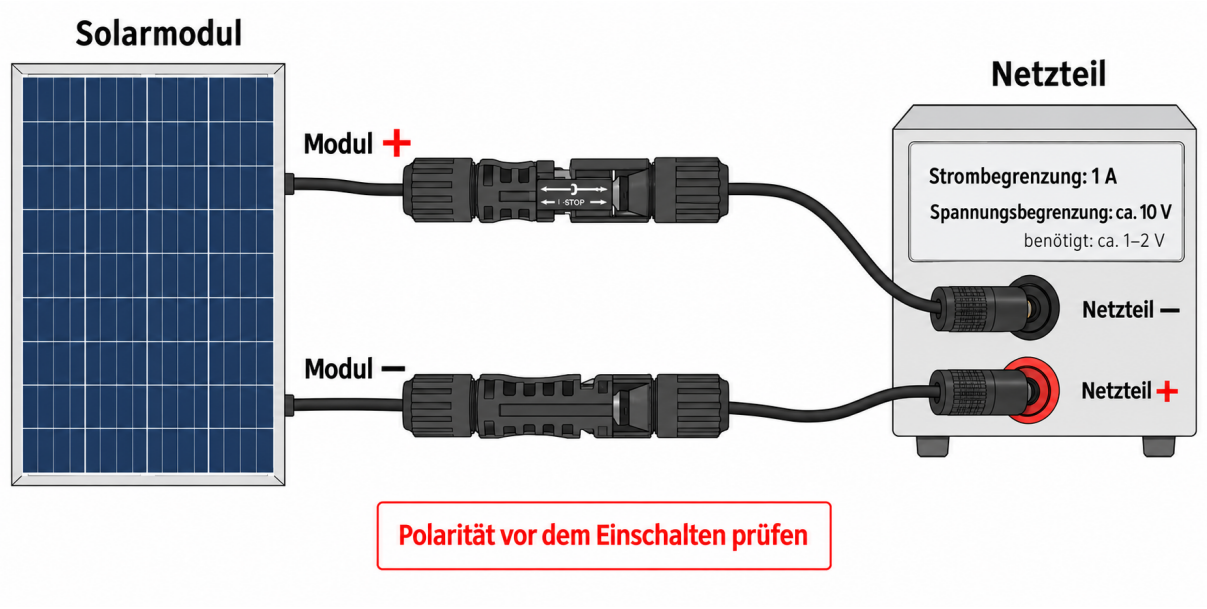


Abbildung 1: Verbindung der Adapterkabel. Plusstecker des Moduls auf Minusseite des Netzteils und des Minussteckers des Moduls auf Plusseite des Netzteils.

8 Auswertung der Ergebnisse

Die Beurteilung erfolgt durch Vergleich mit dem Referenzwert aus Abschnitt 6. Tabelle 1 fasst die möglichen Anzeigen zusammen.

Tabelle 1: Interpretation der Anzeige des Netzteils bei eingeschaltetem Output.

Strom	**Spannung**	**Interpretation**
1 A	≈ Referenzwert	Alle Bypass-Dioden leiten wie erwartet. **Modul in Ordnung** (im Rahmen der Aussagekraft dieses Tests).
≈ 0 A (jedenfalls < 1 A)	Spannungsgrenze, z. B. 10 V	Kein Durchgang: mindestens eine Bypass-Diode ist **unterbrochen** oder ein Anschluss (Kabel, Stecker, Lötstelle in der Anschlussdose) ist offen. Zuerst Polarität und Steckverbindungen kontrollieren, dann **Modul aussortieren**.
1 A	deutlich *tiefer* als Referenz	Eine oder mehrere Bypass-Dioden sind **kurzgeschlossen** (Spannung ca. eine Durchlassspannung U_F tiefer pro betroffene Diode). Häufige Ausfallart von Schottky-Dioden, z. B. nach Überspannung/Blitz; der betroffene Substring liefert im Betrieb keine Leistung. **Modul aussortieren.** Bei nur einer Diode im Modul zeigt sich dieser Fall als ca. 0 V bei 1 A.
1 A	deutlich *höher* als Referenz	Erhöhter Übergangswiderstand, z. B. schlechte Lötstelle, korrodierter Kontakt oder beschädigte Diode. Oder verpolter Anschluss und Stromfluss in Durchlassruchtung der Zellen, **Verpolung prüfen, wenn korrekt angeschlossen Modul aussortieren** bzw. genauer untersuchen.
1 A	≈ 0 V (bei mehreren Dioden)	Kurzschluss in der Verkabelung oder in der Anschlussdose. **Modul aussortieren**, Verkabelung kontrollieren.

Beurteilung erhöhter Spannungswerte

Bei der Beurteilung erhöhter Werte müssen schwankende Lichtverhältnisse und die Anzeigegenauigkeit des Netzteils berücksichtigt werden. Als einfache Faustregel wird vorgeschlagen, die Streuung der als gut beurteilten Module zu bestimmen und Module auszusortieren, deren Spannung mehr als etwa die doppelte Streubreite über dem oberen Ende des Normalbereichs liegt. Beispiel: Streuen die Werte der Module zwischen 1,0 V und 1,1 V, sollten Module ab ca. 1,2 V aussortiert werden. Streuen die Werte zwischen 1,0 V und 1,2 V, sollten Module ab ca. 1,4 V aussortiert werden.

Falls keine konstanten Lichtverhältnisse möglich sind, ist die Beurteilung schwierig. Ideal ist jeweils, wenn die Module sicher im Dunkeln gehalten werden können (zum Beispiel mit Abdecken durch ein schwarzes Tuch oder einen Karton). Grundsätzlich gilt: je mehr Licht, desto tiefer die Spannung. Lassen sich Schwankungen durch das Licht erklären (z. B. durch erneutes Messen desselben Moduls bei unterschiedlicher Helligkeit), ist kein Defekt nachgewiesen. Im Zweifel ist die Messung im abgedeckten Zustand zu wiederholen.

9 Grenzen des Verfahrens

- Der Test wird bei 1 A und Raumtemperatur durchgeführt. Im Betrieb müssen die Dioden den vollen Modulstrom (typisch 10 bis 20 A) bei hohen Temperaturen in der Anschlussdose führen. Fehler, die nur unter diesen Bedingungen auftreten (thermisch bedingte Kontaktprobleme, degradierte Dioden mit erhöhtem Sperrstrom), werden nicht erkannt.
- Schlecht kontaktierte, aber noch leitende Dioden können unauffällige Werte liefern (siehe Abschnitt 1).
- Der Test prüft nicht die Sperrfähigkeit der Dioden im Normalbetrieb. Eine Diode mit erhöhtem Leckstrom in Sperrrichtung wird nicht erkannt.
- Sind mehrere Dioden gleichzeitig defekt, können sich Effekte überlagern (z. B. eine unterbrochene und eine kurzgeschlossene Diode).
- Ohne Referenzmodul bzw. ohne Kenntnis der Diodenanzahl ist die Beurteilung tiefer oder erhöhter Werte nur eingeschränkt möglich.
- Bei Modulen mit aktiven Bypass-Elementen oder integrierter Elektronik ist das Verfahren nicht anwendbar.
- Allgemein ist es immer denkbar, dass sich verschiedene Fehler überlagern und deshalb nicht beschriebene Messergebnisse vorkommen. Die Interpretation der Messung ist immer mit Vorsicht und nur von Personen mit entsprechender Erfahrung vorzunehmen

10 Zusammenfassung/Checkliste

- Haftungsausschluss und Sicherheitshinweise gelesen (Abschnitt 1, Abschnitt 3)
- Nur einzelne, nicht verschaltete und unbeschädigte Module werden geprüft
- Netzteil mit Strom- und Spannungsbegrenzung, Adapterkabel mit geprüfter Farbkodierung bereit
- Anzahl Bypass-Dioden des Modultyps bekannt (Datenblatt/Anschlussdose)
- Ort mit möglichst wenig und vor allem konstantem Licht gewählt, ggf. Abdeckung bereit
- Einstellungen Netzteil (Output aus): Strombegrenzung 1 A, Spannungsbegrenzung max. 10 V
- Modul verpolt angeschlossen: Modul Minus an Netzteil Plus, Modul Plus an Netzteil Minus
- Netzteil einschalten, Output aus: Restlichtstrom prüfen ($<$ca. 0,3 A)
- Referenzwert an bekannt gutem Modul bzw. mehreren Modulen des gleichen Typs bestimmen
- Output einschalten, nach 1 bis 2 s ablesen, notieren, Output ausschalten
- Anzeige 1 A und $\approx$ Referenzwert $\rightarrow$ Modul in Ordnung
- Anzeige $\approx$ 0 A und Spannungsgrenze $\rightarrow$ Polarität/Stecker prüfen, sonst Diode unterbrochen $\rightarrow$ Modul defekt
- Anzeige 1 A und deutlich tiefere Spannung als Referenz $\rightarrow$ Diode kurzgeschlossen $\rightarrow$ Modul defekt
- Anzeige 1 A und deutlich höhere Spannung als Referenz $\rightarrow$ schlechter Kontakt $\rightarrow$ aussortieren bzw. genauer untersuchen
- Steckverbindungen nur bei ausgeschaltetem Output trennen