

Intelligente U-I Kennliniendiagnose

Technisches White Paper

Gemeinsame Publikation des China General Certification Center
und Huawei Technologies Co., Ltd.

August 2020



Vorwort

Die intelligente U-I Kennliniendiagnose (später als Diagnose bezeichnet) von Huawei Technologies Co., Ltd. (nachfolgend Huawei genannt) ist in die Phase der großtechnischen Anwendung eingetreten. Bis heute wurde diese Funktion in PV-Anlagen mit einer Gesamtleistung von mehr als 7 GW, mit unterschiedlichen Standortbedingungen, Systemen und Gerätetypen eingesetzt.

Um die Leistung der Scan-Technologie und der intelligenten Datendiagnose zu belegen, beauftragte Huawei das China General Certification Center (CGC) mit der Durchführung einer technischen und funktionellen Verifikation der Technologie. Die Ergebnisse bestätigen, dass die von Huawei entwickelte intelligente U-I Kennliniendiagnose in der Lage ist, höchste Anwendungsanforderungen zu erfüllen.

Gemäß CGC/GF 180:2020 "Technical Specifications for PV String I-V Scanning and Smart Diagnosis Evaluation" und IEC 62446-1: 2016 "Photovoltaik (PV)-Systeme - Teil 1: Netzgekoppelte Systeme - Dokumentation, Inbetriebnahmeprüfung und Prüfanforderungen" wird Level 4 (auch L4 genannt) erreicht.

CGC und Huawei haben dieses White Paper veröffentlicht, um branchenweit das Verständnis vom Online-Scannen der U-I Kennlinien und der intelligenten Diagnose der Kennlinien zu steigern. Das White Paper erläutert den Entwicklungshintergrund, die technischen Merkmale und die Leistung der bestehenden Technologien für das Scannen und die Diagnose und dient folgenden Zielen:

- (1) Empfehlung für PV-Anlagenbetreiber, - errichter und Investoren zum genauen Verständnis der Anwendung der intelligenten U-I Kennliniendiagnose.
- (2) Bereitstellung einer Arbeitsgrundlage für Unternehmen, welche die Technologie entwickeln oder anwenden, um ihre Lösung auf der Basis aktueller Trends zu verbessern.





01

Entwicklungshintergrund der Technologie

Eine PV-Anlage verfügt über Tausende PV Module verteilt auf eine große Grundfläche. So nimmt beispielsweise eine PV-Anlage mit 50 MW, je nach Modulleistung und Art der Systeminstallation mit bis zu 120 000 PV-Modulen geplant, eine Fläche von bis zu 100 Hektar ein.

Ein PV-Modul kann als eine kleine Stromerzeugungsvorrichtung angesehen werden, und in jedem PV-Modul oder jeder elektrische Verbindung können Defekte auftreten. Abbildung 1-1 zeigt den typischen elektrischen Aufbau und die möglichen Fehlerarten einer PV-Anlage mit Stringwechselrichter.

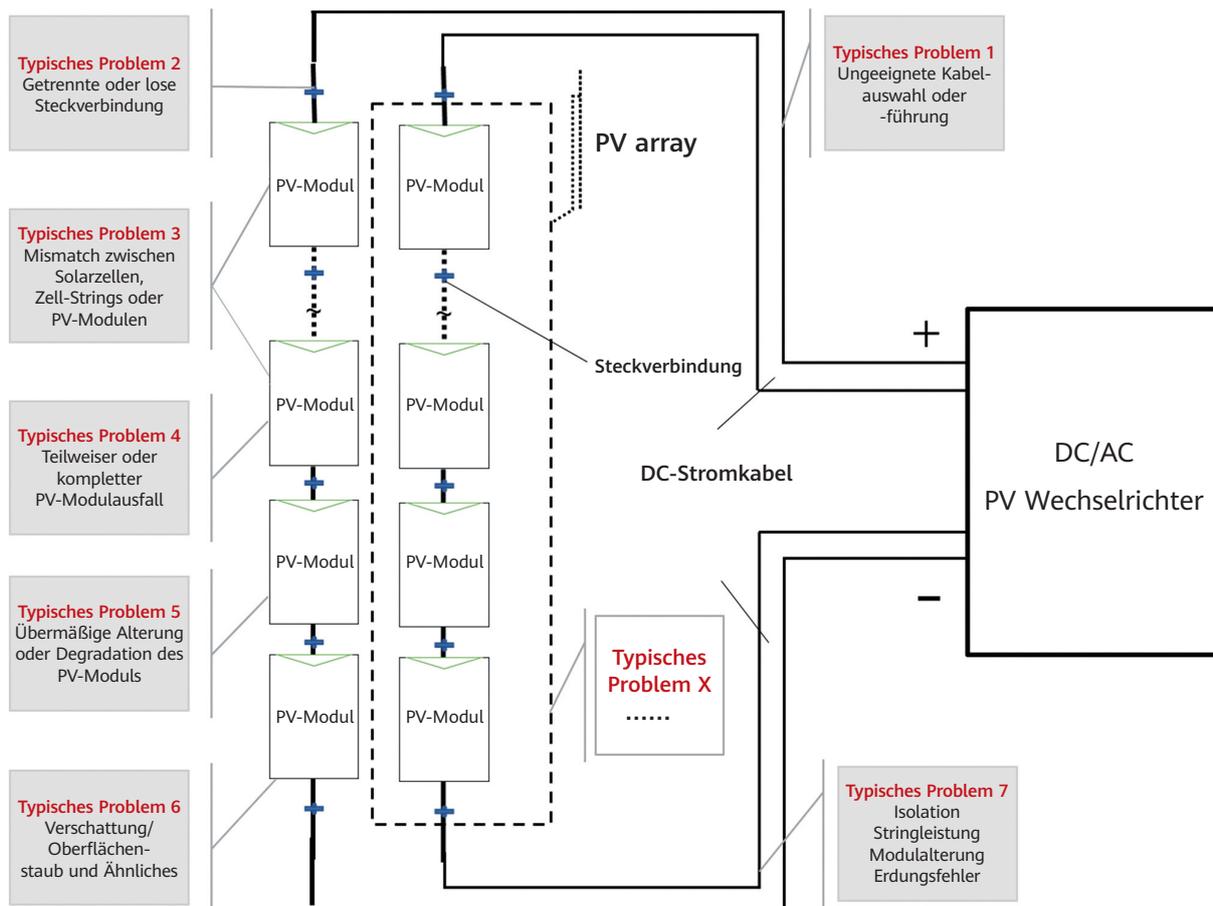


Abbildung 1-1. Elektrischer Aufbau und potentielle Fehlerarten einer PV-Anlage mit Stringwechselrichter.

In einem PV System können verschiedene Fehlerarten an den unterschiedlichsten Positionen auftreten. Eine der größten Herausforderungen bei Betrieb und Wartung ist die effiziente, rasche und genaue Erkennung und Behebung dieser Fehler im laufenden Anlagenbetrieb. Abbildung 1-2

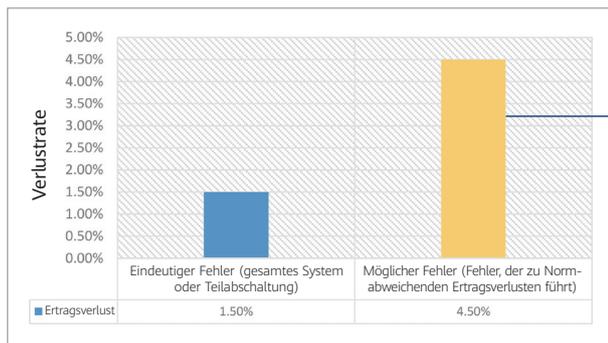


Abbildung 1-2 Ertragsverlust aufgrund von Betriebsstörungen

und Abbildung 1-3 zeigen den geschätzten Ertragsverlust im Test-Zeitraum bei 150 Muster-PV-Anlagen des CGC. Obwohl die in den Abbildungen dargestellten Werte nicht allgemein repräsentativ sind, zeigen sie doch, dass die rasche Erkennung und Behebung der verschiedenen Fehler oberste Priorität hat.

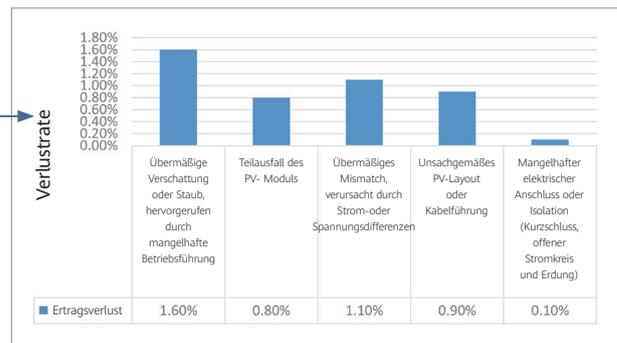


Abbildung 1-3 Ertragsverlust aufgrund von möglichen Fehlern

Gegenwärtig wird die Fehlererkennung bei einem PV System und den zugehörigen Geräten entweder online oder offline durchgeführt: Die Prüfung und Analyse der Daten im Managementsystem wird online durchgeführt, wohingegen die manuelle Inspektion vor Ort abschnittsweise durchgeführt wird. Die bestehenden Monitoringlösungen können nur begrenzte Fehlerdaten liefern. Onsite-Inspektionen können aufgrund der

Eigenheiten großer PV-Anlagen nur partiell durchgeführt werden. Folglich bedarf es modernster Technologien, um die Effizienz und Genauigkeit der Fehlererkennung von PV-Anlagen zu verbessern und die Fehlerbehebung zu automatisieren.

Zur optimalen Performance der PV-Anlage ist es erforderlich, dass PV-Module und PV-Strings mit idealen

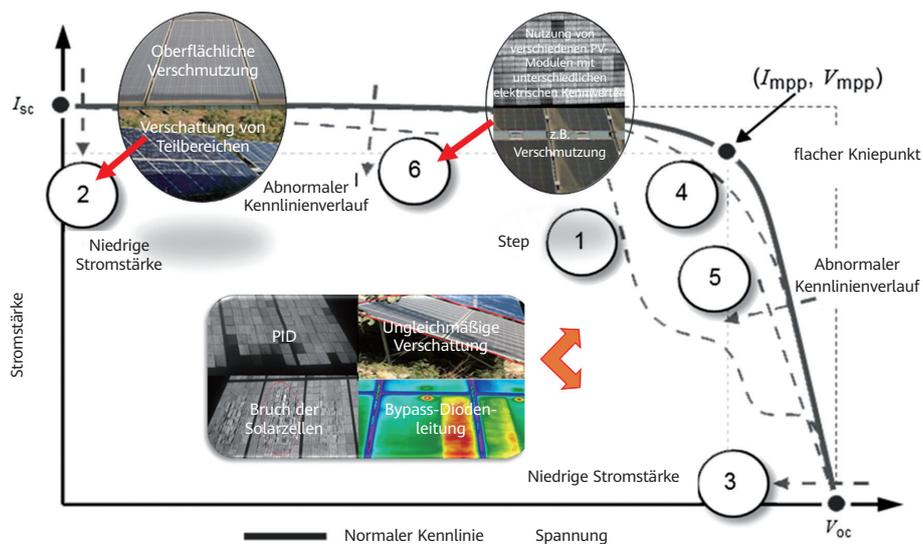


Abbildung 1-4 zeigt U-I Kennlinienabweichungen und mögliche Ursachen

Strom- und Spannungswerten betrieben werden.

Wenn z.B. die Betriebsumgebung variiert oder die elektrischen Kennwerte vom Normalzustand abweichen, verschlechtert sich die Leistung.

Abbildung 1-4 zeigt zeigt U-I Kennlinienabweichungen und mögliche Ursachen.

Von der Norm abweichende Betriebsbedingungen und Systemfehler führen zu einer Änderung der U-I Kennlinienverlaufs. Mit einer Analyse des Kennlinienverlaufs lässt sich während des Anlagenbetriebs das Problem identifizieren.

Das MPP-Tracking (MPPT = Maximum Power Point

Tracking) des Wechselrichters wird umgesetzt durch die kontinuierliche Messung des Ausgangsstroms und der Ausgangsspannung des PV-Arrays innerhalb des voreingestellten Spannungsbereichs. Anschließend erfolgt die Bestimmung des Maximum Power Point durch Berechnung und Vergleich. Zum Scannen der U-I Kennlinie kann dies so erweitert werden, dass es fast den gesamten Bereich des Kennlinienverlaufs (PV-Array oder String-Ebene) abdeckt.

Zahlreiche Analysen haben ergeben, dass ein großer Bedarf an U-I Kennlinienmessung zur Fehlerdiagnose für PV-Strings besteht. Durch Technologie-Upgrades und Funktionserweiterungen ist dies auf der Grundlage der bestehenden MPPT-Technologie des Wechselrichters online möglich.. Das ist sowohl technisch machbar als auch wirtschaftlich sinnvoll.





02

Technische Beschreibung

2.1 Funktionen und Grundsätze der intelligenten U-I Kennlinien-Diagnose von Huawei

Die U-I Kennliniendiagnose von Huawei identifiziert die Fehlertypen im PV-String basierend auf den durch die Stringwechselrichter, durch Big Data Mining und von einem KI-gestützten Identifizierungsalgorithmus gesammelten Strom- und Spannungsdaten. Die Funktion der intelligenten U-I Kennliniendiagnose kann im Ein-Klick-Modus gestartet werden, anschließend sendet der Huawei SmartLogger (Datenlogger) den Befehl zum Scannen der Strom- und Spannungswerte an den Wechselrichter. Sobald die vollständigen U-I Kennliniendaten des PV-

Strings erfasst wurden, lädt der Wechselrichter die Daten in das Managementsystem hoch, das mit seinem integrierten Fehlerdiagnose- und Identifizierungsalgorithmus automatisch einen Fehlerdiagnosebericht erstellt.

In den Anwendungsszenarien von PV-Anlagen ähnelt die U-I Kennlinie eines PV-Strings derjenigen eines herkömmlichen Ein-Dioden-Modells. Die Beziehung zwischen Strom und Spannung lässt sich durch die folgende Formel darstellen:

$$I = I_L - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V + IR_s)}{nkT} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}$$

Die wichtigsten elektrischen Leistungsparameter in der vorhergehenden Formel werden wie nachfolgend beschrieben:

- » I: Betriebsstrom des PV-Strings
- » I_L : Lichtgenerierter Strom des PV-Strings
- » I_0 : Rückwärtssättigungsstrom der Dioden
- » n: Idealitätsfaktor der Dioden
- » V: Betriebsspannung der PV-Strings
- » R_s : Reihenwiderstand des PV-Strings
- » R_{sh} : Parallelwiderstand des PV-Strings
- » q: Ladungsgröße eines Elektrons
- » k: Boltzmann-Konstante
- » T: thermodynamische Temperatur

Die Funktion der intelligenten U-I Kennliniendiagnose von Huawei basiert auf der Iteration des klassischen Diodenmodells und entwickelt sich fortlaufend mit neuen PV-String-Daten weiter. Die Funktion nutzt Deep Learning, um mögliche String-Fehler in Anwendungsszenarien von PV-Anlagen zu bestimmen, und erstellt Fehleridentifikations- und Diagnosemodelle für jeden String-Fehler, die kontinuierlich aktualisiert und weiter iteriert werden.

Der Wechselrichter meldet die U-I Kennlinie-Daten an das Managementsystem. Der U-I Fehleridentifizierungsalgorithmus bestimmt anhand des aktuellen Fehleridentifikationsmodells, ob der PV-String fehlerhaft ist.

Um die Genauigkeit der Kennliniendaten des U-I Kennlinienscans zu gewährleisten und den Einfluss von Umweltfaktoren während des Scans zu reduzieren, bettet die intelligente U-I Kennlinien-Diagnosefunktion von Huawei zudem einen stabilen Algorithmus

in die Kennlinienerfassung, Fehlererkennung und Fehlerbestimmung ein, um die Zuverlässigkeit des U-I Algorithmus zu verbessern.

Basierend auf der Analyse typischer U-I Kenngrößen der PV-Strings kann diese Funktion verschiedene Fehlerinformationen identifizieren, um festzustellen, ob PV-Strings fehlerhaft sind. Beispielsweise ändert sich die U-I Kennlinie des PV-Strings, wenn eine Strom-Fehlanpassung auftritt, wie in Abbildung 2-1 dargestellt.

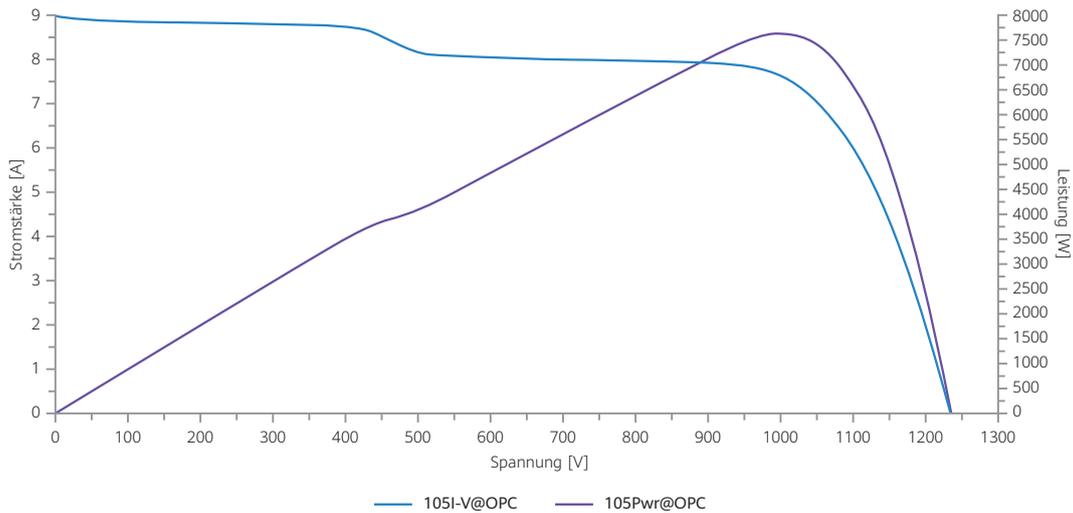
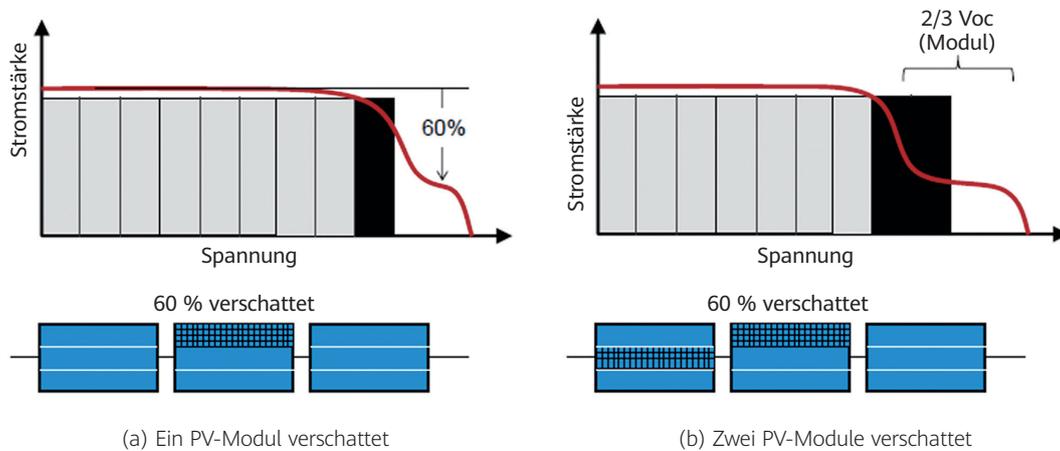


Abbildung 2-1 Fehlanpassung des PV-Modulstroms in einem PV-String



Jede Art von PV-Modulfehler in einem PV-String hinterlässt ein charakteristisches Signal auf der U-I Kennlinie. Verschiedene Arten von PV-Modulfehlern hinterlassen unterschiedliche Signale auf der U-I Kennlinie. Diese charakteristischen Signale können durch Nutzung von Big Data zur genauen Bestimmung von Fehlern in den PV-Strings genutzt werden.

Auf Grundlage der vorhergehender Betrachtungen nutzt die smarte U-I Kennliniendiagnose von Huawei Big-Data-Mining- und KI-Identifikationsalgorithmen, um typische Fehler von PV-Modulen zu identifizieren und Alarmer in Anwendungsszenarien von PV-Anlagen zu generieren. Typische Fehlerarten sind beispielsweise:

1. Strom-Fehlanpassung in einem PV-String (aufgrund von Verschattung, Staub oder Inkonsistenz des PV-Modulstroms)

2. Abweichender Ausgangsstrom von PV Modulen (aufgrund von Verschattung, Glasbruch oder Hotspots)
3. Abweichende Spannung von PV-Strings (aufgrund von Dioden-Kurzschluss oder Ausfall eines PV Moduls)
4. Zu niedriger PV-String-Parallelwiderstand (aufgrund von PID = potenzialinduzierter Degradation oder Staub)
5. Unterbrochener Stromkreis im PV-String
6. Übermäßig hoher Reihenwiderstand der PV-Strings (aufgrund hoher Kabelimpedanz oder abweichendem Innenwiderstand des PV-Moduls)
7. Niedriger Kurzschlussstrom des PV-Strings (aufgrund abweichender Ausrichtung, Staub oder PV-Moduldegradation)

Nachdem ein Anlagenscan abgeschlossen ist, generiert die intelligente U-I Kennliniendiagnose von Huawei automatisch einen U-I Diagnosebericht zur Weitergabe an die Betriebsführung. In dem Bericht sind verschiedene Vorschläge zur Wartung bzw. Fehlerbehebung enthalten.

2.2 Technische Probleme

Bei einer großen PV-Anlage, in der PV-Strings sehr großflächig stark verteilt sind, können die elektrischen Leistungsdaten leicht durch variierende Umgebungsbedingungen wie Sonneneinstrahlung, Temperatur und Feuchtigkeit sowie durch Geräte- und Systemtypen beeinflusst werden. Eine große Herausforderung bei der Diagnose von U-I Kennlinien besteht darin, die elektrischen Leistungsdaten von PV-Strings schnell und präzise zu ermitteln, um die Fehler in PV-Strings genau identifizieren zu können.

Um den Einfluss von Umweltfaktoren auf die Erfassung der U-I Daten der Strings zu reduzieren und die Vergleichbarkeit der erfassten Daten zu gewährleisten, kann der Wechselrichter die Daten gleichzeitig mit einer

Genauigkeit von 0,5 % für Strom- und Spannungswerte scannen. Darüber hinaus verfügt der Wechselrichter über einen integrierten Algorithmus zur Kennlinienerfassung, um den Einfluss von Umweltfaktoren während des Scans zu vermindern.

Bei den Algorithmen zur Fehlererkennung verwendet Huawei den intelligenten U-I Kennliniendiagnose-Algorithmus zur Verbesserung der Genauigkeit und Wiederholbarkeit der Fehlererkennung. Dieser basiert auf einem fundierten Fachwissen über Fehler und Ausfallmechanismen von PV-Modulen in Anlagen mit insgesamt 5-GW-Gesamtleistung, die mittels Technologien wie Big-Data-Mining und KI-Identifizierungsalgorithmen ausgewertet wurden.

2.3 Die Lösung von Huawei und ihre technische Merkmale

Die smarte U-I Kennliniendiagnose von Huawei umfasst wichtige Elemente wie den Wechselrichter, den SmartLogger und das intelligente PV Managementsystem. Der Wechselrichter erfasst die vollständigen U-I Daten aller PV-Strings, und der SmartLogger lädt diese Daten in das intelligente PV-Managementsystem hoch. Das

Managementsystem verwendet dann seinen integrierten PV-String-Diagnose- und Fehleridentifikations-Algorithmus, um alle PV-Strings in einer PV-Anlage zu erkennen und eventuell vorhandene Fehler zu identifizieren und damit Orientierungshilfen für den Anlagenbetrieb zu geben. Die folgende Abbildung zeigt die Gesamtlösung.

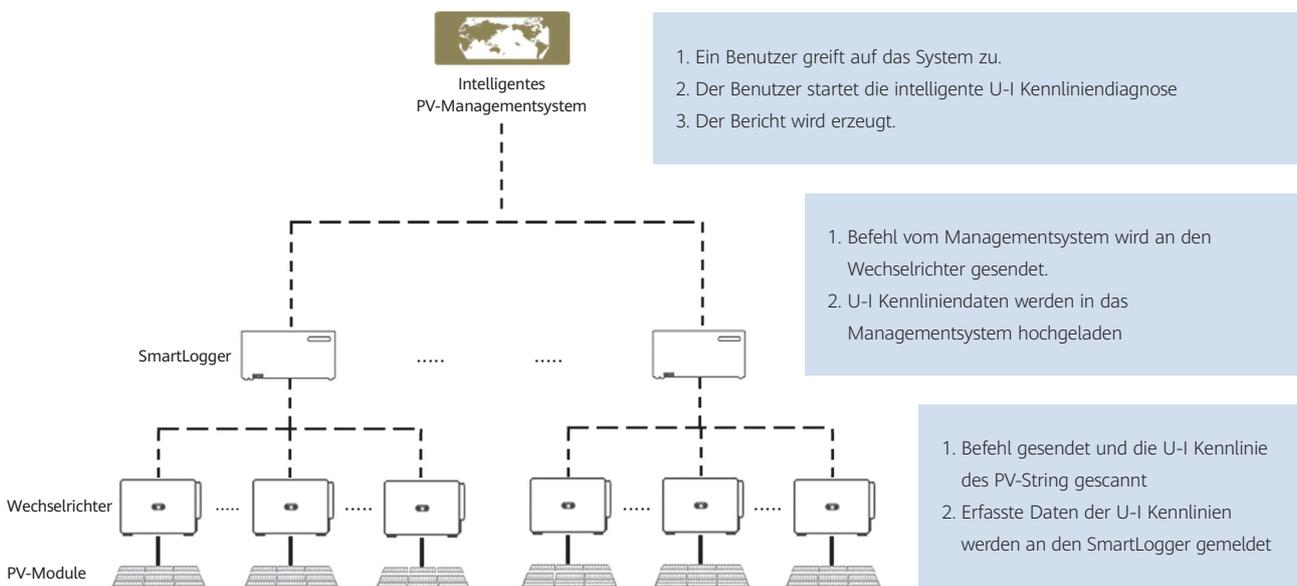


Abbildung 2-2 Vernetzung der intelligenten I-V Kennliniendiagnose von Huawei

- (1) Wechselrichter: empfängt den Scan-Befehl vom Managementsystem, scannt die U-I Kennlinie des PV-Strings und lädt die Kennliniendaten über den SmartLogger in das Managementsystem hoch.
- (2) SmartLogger: überträgt den Befehl vom Managementsystem an den Wechselrichter und lädt die vom Wechselrichter gescannten U-I Kennliniendaten des PV-Strings in das Managementsystem hoch.

- (3) Huawei Smart PV Management System: Unterstützt die Parameterkonfiguration auf Anlagenebene, ermöglicht die U-I Kennliniendiagnose auf Anlagen-, Array- und Wechselrichterebene, gibt Diagnoseergebnisse und Fehlertypen aus und unterstützt den Export von Betriebs- und Wartungsberichten als Orientierungshilfe für die Betriebsführung und bzw. Wartungsplanung.



03

Technische Prüfung und Bewertung

Um die Leistungsfähigkeit der smarten U-I Kennliniendiagnose von Huawei umfassend zu belegen, hat das CGC im Auftrag von Huawei von Februar bis Juli 2020 ein Team zur Überprüfung und Bewertung

der Technologie aufgestellt. Abbildung 3-1 zeigt diesen Prüfungs- und Bewertungsprozess, und Abbildung 3-2 zeigt die Bewertungsindikatoren und ein Beispiel für eine Prüfmethode.

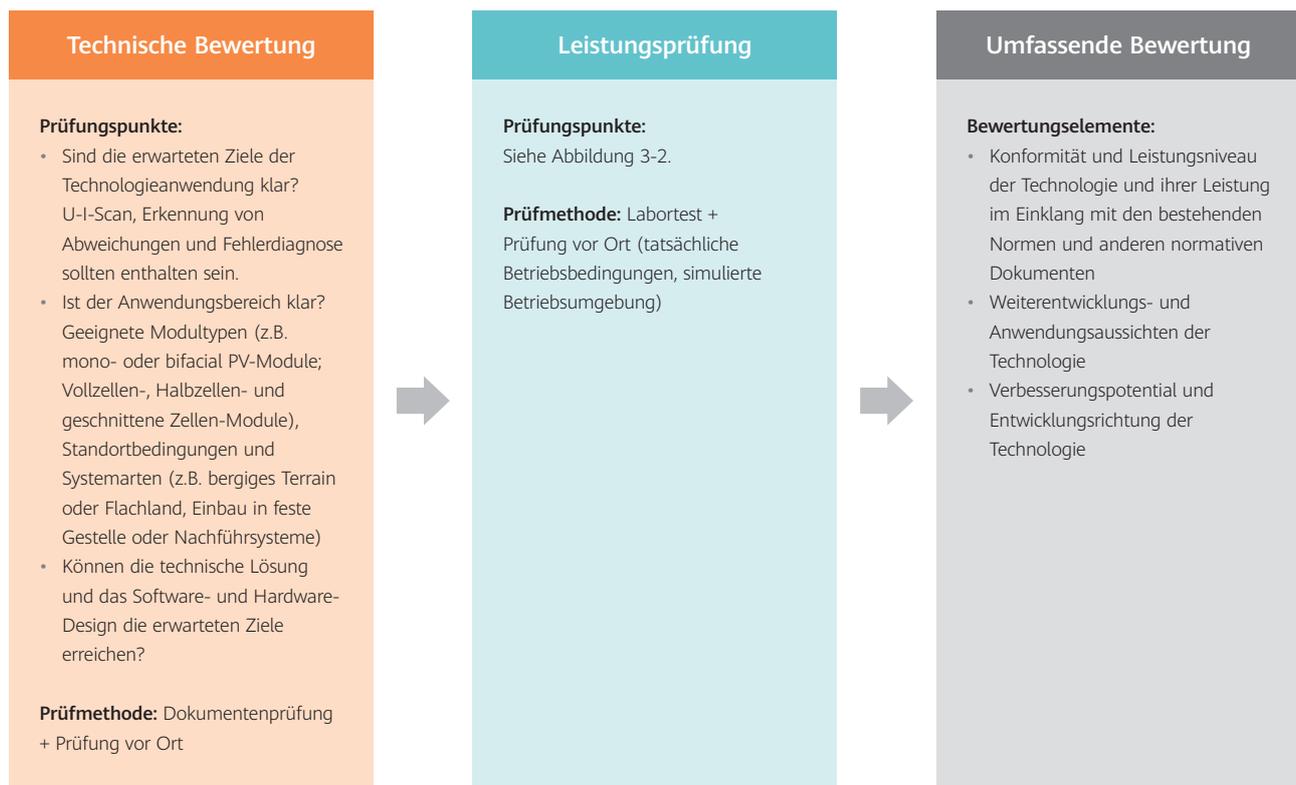


Abbildung 3-1 Prüfungs- und Bewertungsprozess

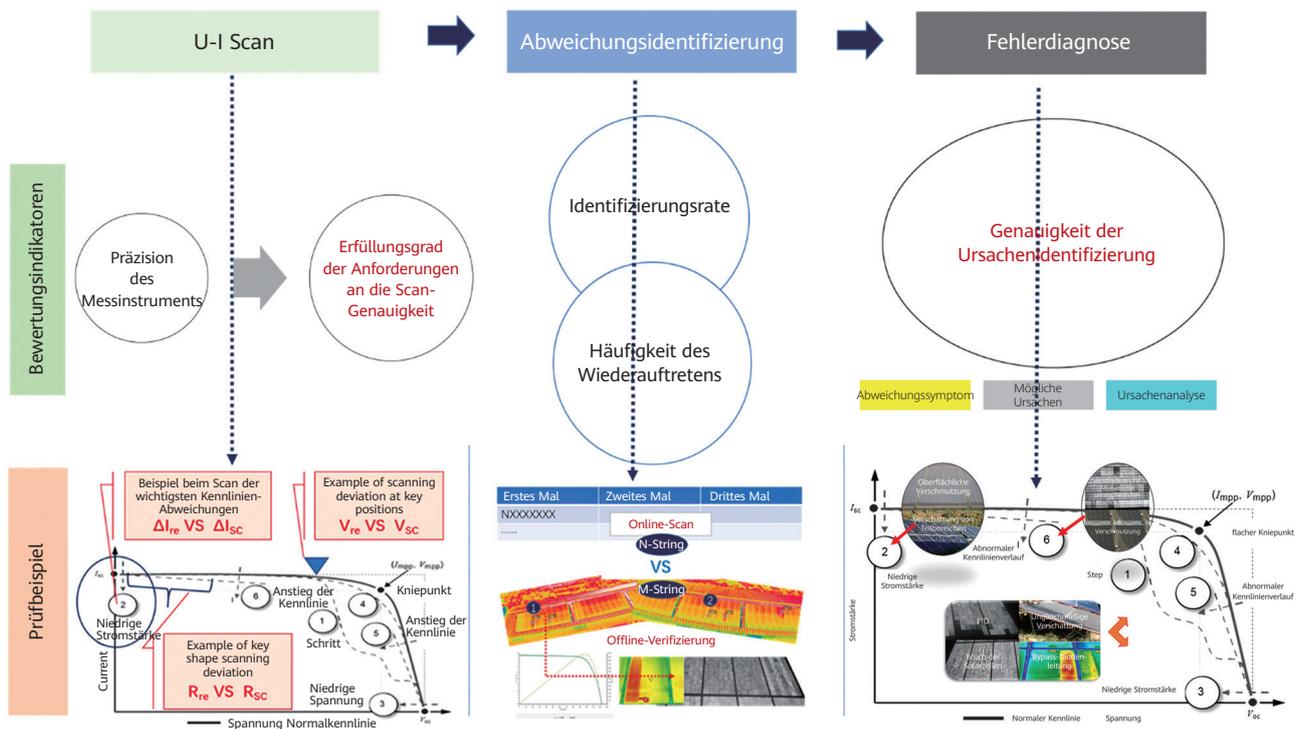


Abbildung 3-2 Bewertungsindikatoren und Beispiel einer Prüfmethode

3.1 Ergebnis der technischen Überprüfung

Huawei hat die intelligente U-I Kennliniendiagnose-Technologie eigenständig entwickelt und zählt zu den Ersten, die diese Technologie in der Branche vorantreiben. Nach erfolgter Überprüfung kam das CGC - Prüfteam zu dem Schluss, dass die Technologie die Anwendungsanforderungen erfüllt und für alle

Systemtypen und Anwendungsszenarien anwendbar ist. Die technische Lösung ist einwandfrei und kann die gesetzten Ziele erreichen. Es ist zu erwarten, dass diese Technologie zur Lösung von Problemen in der Betriebsführung und Wartung von PV-Anlagen beitragen wird.

3.2 Leistungsprüfung

Ausgehend von der Erläuterung der U-I Kennlinien der PV-Strings in IEC 62446-1: 2016 "Photovoltaik (PV)-Systeme - Teil 1: Netzgekoppelte Systeme - Dokumentation, Inbetriebnahmeprüfung und Prüfanforderungen", formulierte das CGC das Dokument CGC/GF 180:2020 "Technical Specifications for PV String I-V Scanning and

Smart Diagnosis Evaluation." (zu deutsch: "Technische Spezifikationen für das U-I Scannen von PV-Strings und die Auswertung der intelligenten Diagnose) Tabelle 3-1 enthält eine Beschreibung der darin aufgeführten Prüfungselemente, und Tabelle 3-2 führt die Leistungsbewertungsstandards für den U-I Scan und die intelligente Kennliniendiagnose auf.

Tabelle 3-1 Beschreibung der Prüfungspunkte.

Kategorie	Gegenstand der Prüfung	Beschreibung
U-I Scan	Genauigkeit des Messinstruments	Messgenauigkeit der Strom- und Spannungsmessung der an den Wechselrichter angeschlossenen Strings oder Arrays
	Genauigkeit der gemessenen U-I Kennlinien	Genauigkeit der gemessenen U-I Kennlinien verglichen mit den Testergebnissen gemäß Standardmessmethode
Abweichungsidentifizierung	Identifizierungsrate	Verhältnis der Anzahl der PV-Strings mit abweichenden U-I Kennlinien zur Gesamtanzahl der identifizierten PV-Strings
	Häufigkeit des Wiederauftretens	Verhältnis der erneuten Identifizierung zu unterschiedlichen Zeiten innerhalb der Stichprobengruppe, bevor die Ursache für abweichende U-I Werte unter ähnlichen Betriebsbedingungen beseitigt wird
Fehlerdiagnose	Genauigkeit der Ursachenidentifizierung	Vergleich der Fehleridentifikationsrate bei der intelligente U-I Kennliniendiagnose mit der Fehleridentifikationsrate der Standardmethode

Tabelle 3-2 Leistungsbewertungsstandards

Leistungsniveau	U-I Scan		Abweichungsidentifizierung			Fehlerdiagnose
	Messgenauigkeit	Erfüllungsgrad der Anforderungen an die Scan-Genauigkeit	Identifizierungsrate		Häufigkeit des Wiederauftretens	Genauigkeit der Ursachenidentifizierung
			Fehler Typ I	Fehler Typ II		
L1	Spannung und Stromstärke $\leq 1,0$ %	≥ 70 %	≥ 75 %	≥ 70 %	≥ 70 %	≥ 70 %
L2	Spannung und Stromstärke $\leq 1,0$ %	≥ 80 %	≥ 85 %	≥ 80 %	≥ 80 %	≥ 80 %
L3	Spannung und Stromstärke $\leq 0,5$ %	≥ 85 %	≥ 90 %	≥ 85 %	≥ 85 %	≥ 85 %
L4	Spannung und Stromstärke $\leq 0,5$ %	≥ 95 %	≥ 95 %	≥ 90 %	≥ 90 %	≥ 90 %
L5	Reserviert (für PV-Modultyp und Systemtyperweiterung)					
Gesamtniveau: gibt das Leistungsniveau an, das alle Indikatoren erreichen.						

Aus den Testergebnissen der PV-Anlagen-Stichproben ergibt sich ein Erfüllungsgrad der Anforderungen an die U-I Kennliniendiagnose, Scan-Genauigkeit, Identifizierungsrate,

die Häufigkeit des Wiederauftretens und die Genauigkeit der Ursachenidentifizierung von über 95 %. Das Ergebnis entspricht einem Leistungsniveau auf Level 4 (L4).

3.3 Zusammenfassende Bewertung

Die intelligente U-I Kennliniendiagnose von Huawei hat die Phase der großtechnischen Anwendung erreicht. Basierend auf den Ergebnissen der technischen Überprüfung und Leistungsüberprüfung

(1) erreicht diese Technologie das umfassende Leistungsniveau L4 gemäß CGC/GF 180:2020 "Technical Specifications for PV String I-V Scanning and Smart Diagnosis Evaluation."

(2) erfüllt diese Technologie die Anwendungsanforderungen und ist für alle Systemtypen und Anwendungsszenarien anwendbar. Die technische Lösung ist einwandfrei und kann die erwarteten Ziele erreichen, und es wird erwartet, dass die erfolgreiche Anwendung dieser Technologie zur Lösung von Problemen bei der Betriebsführung und Anlagenwartung beitragen wird.



Trademark Notice

 HUAWEI , HUAWEI ,  are trademarks or registered trademarks of Huawei Technologies Co., Ltd.

Other Trademarks, product, service and company names mentioned are the property of their respective owners.

General Disclaimer

The information in this document may contain predictive statement including, without limitation, statements regarding the future financial and operating results, future product portfolios, new technologies, etc. There are a number of factors that could cause actual results and developments to differ materially from those expressed or implied in the predictive statements. Therefore, such information is provided for reference purpose only and constitutes neither an offer nor an acceptance. Huawei may change the information at any time without notice.

Copyright © 2021 HUAWEI TECHNOLOGIES CO., LTD. All Rights Reserved.

No part of this document may be reproduced or transmitted in any form or by any means without prior written consent of Huawei Technologies Co., Ltd.

HUAWEI TECHNOLOGIES CO., LTD.

Huawei Industrial Base
Bantian Longgang
Shenzhen 518129, P. R. China
Tel: +86-755-28780808
www.huawei.com