

# Qualifizierung und Qualitätssicherung zur Lebensdauer-Optimierung und Ertragskontrolle – Rückwirkungen auf Technologieentwicklung und Montage

Prof. Dr. Peter Zacharias

ISET  
pzacharias@iset.uni-kassel.de

Dr. Michael Köhl  
Fraunhofer ISE  
michael.koehl@ise.fraunhofer.de

Dr. Klaus Vanoli  
ISFH  
k.vanoli@isfh.de

Dr. Andreas Herrfeld  
SMA Technologie AG  
andreas.herrfeld@sma.de

## Einleitung

Maßnahmen zur Qualitätssicherung und Qualifizierung von Komponenten für bestimmte Einsatzbedingungen bzw. -bereiche haben hohe Bedeutung für die Lebensdauer, den störungsfreien Betrieb und den Ertrag von photovoltaischen und thermischen Solaranlagen. Dies gilt sowohl für die einzelnen Komponenten als auch für die gesamte Anlage im Verbund. Wesentliche technische Beurteilungsparameter für den wirtschaftlichen Betrieb sind der Ertrag und die Lebensdauer aber auch der Aufwand für Wartung und Reparatur.

## Qualifizierung und Qualitätssicherung von Komponenten

Bei Photovoltaik (PV)-Anlagen haben die Zuverlässigkeit und Beständigkeit der PV-Module besondere Bedeutung. Denn ein Großteil der Investitionskosten (> 50 %) entfallen auf den PV-Generator (das ist die Gesamtheit aller PV-Module einer Anlage). An die Module sind somit hohe Qualitätsanforderungen zu stellen: Neben dem elektrischen Energieertrag muss auch die Gebrauchsdauer im Sinne des Aufrechterhaltens der elektrischen Leistungsfähigkeit im Bereich von zwei bis drei Jahrzehnten liegen. Dies entspricht der Anforderung an eine nachhaltige Produktentwicklung und ist auch aktueller Stand der Technik für Solarmodule gemäß den gegenwärtigen Qualitätsstandards. Von allen PV-Modulherstellern werden heute Garantieaussagen zur Leistungs- und Produktgarantie gemacht. Die Leistungsgarantie beträgt

in den meisten Fällen 25 Jahre und bezieht sich auf den Erhalt der elektrischen Leistung des Solarmoduls im Vergleich zu dessen Nennleistung. Üblicherweise wird garantiert, dass die Leistung nicht unter 80 % des Nennwertes absinkt.

Es existiert derzeit jedoch noch kein Lebensdauertest für Solarmodule, der gesicherte Prognosen zur Langzeitstabilität zulässt. Auch sind die konkreten Umwelteinflüsse von Temperatur, Feuchte und UV-Strahlung und die damit verbundenen Alterungsmechanismen bei den einzelnen Modulkomponenten und beim Materialverbund innerhalb der Module bisher nur unzureichend bekannt. Ausgehend von diesen Unsicherheiten, sowie der Unkenntnis der Hersteller über die späteren Einsatzbedingungen bergen lange Garantiezeiten erhebliche wirtschaftliche Risiken für die Hersteller von Solarmodulen. Es werden daher gebrauchsdaueranalytische Prüfverfahren benötigt, die durch beschleunigte Tests durch Umweltsimulation im Labor belastbare Aussagen über die Beständigkeit der neuen Materialien und Komponenten unter den denkbaren Einsatzbedingungen ermöglichen. Solche Prüfverfahren werden in Zusammenarbeit mit der Industrie und anderen Forschungsinstituten am Fraunhofer ISE entwickelt.

Hierfür ist es wichtig, dass die durch künstliche Beanspruchung festgestellten Alterungsmechanismen mit natürlichen Degradationsmechanismen unter verschiedenen klimatischen Bedingungen korrelieren und damit die Prüfverfahren bestätigen. Dies ist durch kontrollierte Freibewitterung von Solarmodulen möglich, bei der alle Belastungsparameter durch Bewitterung und Betrieb mit ausreichend hohem Zeittakt



Abbildung 1  
UV-Tests von Solar-  
modulen (links)  
müssen verschärft und  
mit Feuchte-Wärme  
kombiniert werden, um  
der Belastung bei  
20 Jahren Gebrauchs-  
dauer zu entsprechen.  
Vergleichstests mit Frei-  
bewitterung (rechts)  
dienen der Validierung  
von beschleunigten  
Gebrauchsdauer-  
prüfungen.

Quelle: Fraunhofer ISE

gemessen und aufgezeichnet werden. Solche Freibewitterungsteststände hat das Fraunhofer ISE gemeinsam mit dem TÜV Rheinland in verschiedenen Klimazonen aufgebaut und mit der notwendigen Messtechnik ausgestattet oder sich über die Kooperation mit Partnern gesichert. Das ISET testet Solarmodule im Freifeld an seinem Standort in Kassel in Industriaufträgen für verschiedene Hersteller.

Arides Klima herrscht in der Wüste Negev vor: niedrige Luftfeuchtigkeit, hohe Temperaturen mit großem Temperaturwechsel zwischen Tag und Nacht, sowie lange Sonnenscheindauer sind hier die Hauptfaktoren. Tropische Verhältnisse findet man in Serpong in Indonesien vor. Hingegen sind die Hauptstressfaktoren auf der Zugspitze die Schnee- und Windlasten sowie ein hoher UV-Strahlungsanteil.

Derzeit werden im Rahmen des EU-Projektes „Performance“ weitere interessante Materialien und Module mit Dünnschichttechnik ausgewählt. Die Zielsetzung des Projektkonsortiums ist es, einen beschleunigten Test zur Bestimmung der Lebensdauer von Solarmodulen zu entwickeln und zu verifizieren. Das Clusterprojekt „Zuverlässigkeit von PV-Modulen“ wird vom Bundesministerium für Umwelt, Natur - schutz und Reaktorsicherheit (BMU) gefördert.

## Zusammenwirken verschiedener Komponenten in Systemen

Die zweite Hauptkomponente in Photovoltaikanlagen sind Wechselrichter, die den erzeugten Gleichstrom in Wechselstrom umwandeln. Sie übernehmen gleichzeitig vielfältige Steuerungs-, Regelungs- und Sicherheitsfunktionen. Neben der Qualität dieser komplexen von Leistungs- und Signalelektronik sowie computertechnischen Elementen dominierten Komponente gilt es, den einwandfreien Betrieb in Wechselwirkung mit den elektrischen Netzen sicherzustellen.

PV-Wechselrichter sind für eine Lebensdauer von 20 Jahren ausgelegt. Bei bis zu 14 Stunden Betrieb an 7 Tagen der Woche unter wechselnden klimatischen Bedingungen stellt dies hohe Anforderungen an die Qualität der verarbeiteten Teile und die Verarbeitungsprozesse. Um diese Qualität abzusichern, betreibt die SMA Technologie AG als Wechselrichterproduzent ein eigenes Testzentrum als unabhängige Abteilung. Grundlage aller Tests ist eine Simulationsumgebung die es erlaubt, Wechselrichter unabhängig von realen Einstrahlungsverhältnissen rund um die Uhr elektrisch zu betreiben.

Bevor ein neuer Wechselrichter auf den Markt kommt, hat er eine Vielzahl von Tests durchlaufen. Im Rahmen von entwicklungsbegleitenden

Tests werden Prüfungen auf die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV), mechanische Tests des Wechselrichters und der Verpackung, eine Überprüfung auf Staub- und Wasserdichtigkeit zur Bestimmung der Schutzklasse, Tests und Validierungen der Hard- und Firmware<sup>1</sup> und vieles mehr durchgeführt.

Mit Hilfe einer Simulationsumgebung wird versucht, den realen Betrieb eines Wechselrichters so gut wie möglich nachzubilden. Hierzu gehören u. a. die Simulation eines Sonnenaufgangs, eines Sonnenuntergangs, eines bewölkten Tages, schnelle Einstrahlungswechsel, die Aufschaltung von Störgrößen sowie der Betrieb bei unterschiedlichem Leistungsangebot, das bis zu 110 % der Nennleistung des Wechselrichters reicht. Hinzu kommen noch Tests bezüglich des Anlaufverhaltens bei hohen bzw. niedrigen Temperaturen sowie Derating-Tests, die das Verhalten des Wechselrichters bei hoher Leistung und steigenden Umgebungstemperaturen ermitteln.

Zur Absicherung der Lebensdauer werden in einer begehbaren Klimakammer in der Regel zwölf Wechselrichter eines in der Entwicklung befindlichen Wechselrichtertyps zeitgleich einem internen Feldtest unterzogen. Hierzu werden die Feldtestgeräte unter Verwendung

der Simulationsumgebung rund um die Uhr für viele Wochen anspruchsvollen elektrischen und klimatischen Bedingungen ausgesetzt. Diese simulierte Umgebung erlaubt es, in verkürzter Zeit gegenüber einer externen Durchführung Daten zum Langzeitverhalten aus einem Feldtest zu erhalten.

Serienbegleitend werden stichprobenartig die Nutzungsgrade getestet. Als Nutzungsgrad wird ein prozentualer Wert definiert, der die vom Wechselrichter eingespeiste Energie zu der ihm angebotenen Energie ins Verhältnis setzt. Die ermittelten Werte werden mit denen zum Zeitpunkt der Serienfreigabe des entsprechenden Gerätetyps verglichen. Unterschiede in den Werten können auf Abweichungen in den Produktionsprozessen oder auf der Schwankungsbreite der verwendeten Bauteilkennwerte beruhen.

## Test von Systemen im Verbund

Die umfangreichen Untersuchungen zur Sicherheit und Zuverlässigkeit von dezentralen netzgekoppelten Energieerzeugungsanlagen, insbesondere PV-Wechselrichtern, an einem praxisnah aufgebauten Netzausläufer bilden die Grundlage für zahlreiche Projektergebnisse. Unter dem Themenschwerpunkt „Erkennung ungewollter Inselnetzbildung“ hat das ISET im Projekt SIDENA zusammen mit Industriepartnern das Verhalten von zahlreichen PV-Wechselrichtern an einem Netzanschlusspunkt unter extremen Bedingungen untersucht und Defizite ermittelt. Dies führte zu neuen Lösungsansätzen, die unter anderem in neuen Produkten von Netzabschalteneinrichtungen (ENS)<sup>2</sup> Eingang fanden. Darüber hinaus konnten die Ergebnisse in die Verabschiedung entsprechender Normen (DIN VDE 0126-1-1) eingebracht und mit Konzepten anderer europäischer Länder international harmonisiert werden.

- 1 Betriebssoftware, die fest installiert ist
- 2 Eine Einrichtung zur Netzüberwachung mit zugeordneten Schaltorganen (ENS) ist eine automatische Freischaltstelle für kleine Stromerzeugungsanlagen (bis 30 kWp). Sie garantiert, dass sich der Wechselrichter bei Stromausfall oder Netzabschaltung auf jeden Fall selbständig vom AC-Netz trennt, um eine Inselbildung und dadurch erfolgende Rückspeisungen in das Stromnetz, die möglicherweise zu gefährlich sein kann, zu verhindern.

*Abbildung 2  
Begehbare und automatisierte Klimakammer für entwicklungs- und serienbegleitende Feldtests von Photovoltaikwechselrichtern*

Quelle: SMA  
Technologie AG



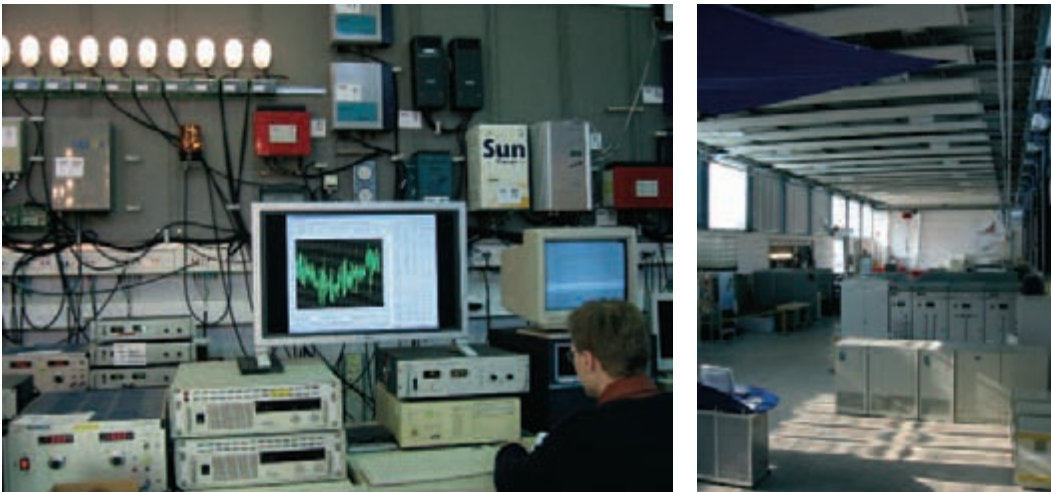


Abbildung 3  
Test- und Prüfzentrum  
DeMoTec zur  
Untersuchung von  
elektrischen Energie-  
wandlern oder deren  
Komponenten unter  
realistischen Einsatz-  
und Lastbedingungen  
sowie im Verbund in  
Nieder- und Mittel-  
spannungsnetzen.

Quelle: ISET

Ein anderer Schwerpunkt dieses Forschungsprojekts behandelte die spezifischen Eigenschaften der PV-Wechselrichter auf der Gleich- und Wechselspannungsseite, die für die sicherheitstechnische Auslegung von wesentlicher Bedeutung sind. Transformatorlose Wechselrichter bieten neben dem Vorteil eines geringen Gewichts meist hohe Wirkungsgrade und einen einfachen und daher kostengünstigen Aufbau. Beim Betrieb transformatorloser Wechselrichter ist die DC-Seite (die Gleichspannungsseite) meist mit einer Wechselspannung überlagert, die durch eine „Umpolung“ des Solargenerators beim Wechsel zwischen positiver und negativer Halbwelle der Netzspannung erzeugt wird.

Einige transformatorlose Wechselrichtertypen verursachen aufgrund ihrer Funktion große kapazitive Ableitströme, z. B. am Solargenerator, die im Fehlerfall ein Gefahrenpotenzial darstellen. Die gemessenen Ableitströme liegen, je nach Wechselrichter, zwischen wenigen und mehreren hundert Milliampère. Neben der möglichen Personengefährdung sind auch Fehlmessungen in Prüflaboren möglich. Die beobachteten Fehlmessungen wurden intensiv im akkreditierten EMV-Prüflabor untersucht und die möglichen Ursachen ermittelt. Es wurden Vorstellungen für neue Grenzwerte von nicht-sinusförmigen Ableitströmen sowie für Prüfaufbau und Prüfprozedur und für die zuverlässige Messung von kapazitiven Ableitströmen unter Berücksichtigung von realen Erdkapazitäten von Solarmodulen und Konstantern entwickelt. Diese sollen in zukünftige Normungsaktivitäten einfließen.

Das ISET bietet mit seinem Test- und Prüfzentrum DeMoTec vielfältige Möglichkeiten zum Betrieb von elektrischen Energiewandlern oder deren Komponenten unter realistischen Einsatz- und Lastbedingungen von Nieder- und Mittelspannungsnetzen. Ziel ist die Erkennung der systemtechnischen Eigenschaften und deren Verträglichkeit in Versorgungsnetzen. Über Kreuzschienenverteiler lassen sich beispielsweise Einzelaggregate in bis zu drei Teilnetzen fernsteuerbar koppeln. Ein 10 kV-Mittelspannungssimulator ermöglicht die Nachbildung von Kabelstrecken stufig bis 18 km und von Freileitungen bis 28 km Länge. Die Messung wichtiger elektrischer Größen ist in den Anlagen integriert. Zur Ausweitung der realitätsnahen Testmöglichkeiten befindet sich mit dem „ISET Systems Test Centre“ eine Freifeldumgebung für den Verbundbetrieb von PV-Modulen und -Systemen, kleinen Windenergieanlagen, Biogas-Blockheizkraftwerken, anderen dezentralen Stromerzeugern, Energiespeichern, Wechselrichtern, Kommunikations-, Regelungs- und Steuerungssystemen sowie autonomen Hybridsystemen und Inselnetzen (Minigrids) in Vorbereitung.

## Ertragssicherung im Betrieb

### 1. Photovoltaikanlagen

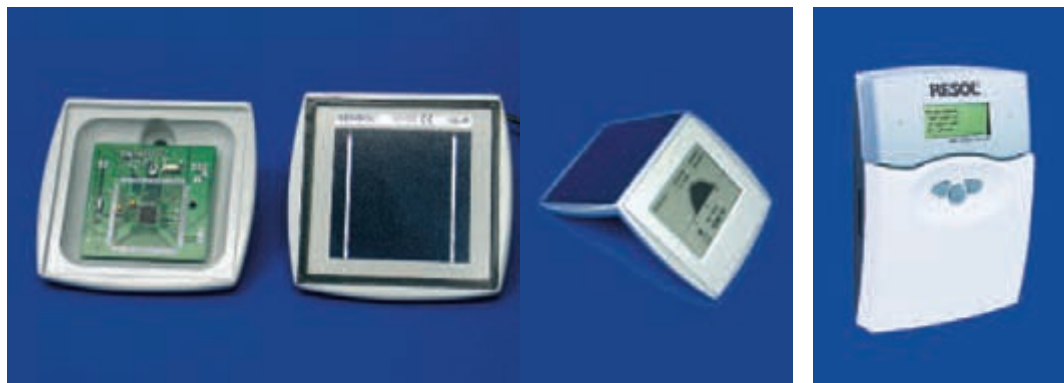
Für die energetische Bewertung eines Standortes für Photovoltaikanlagen ist die Messung der Bestrahlungsstärke mit einem Pyranometer präzise und sinnvoll. Um den Energieertrag genauer prognostizieren zu können (Ertragsprog-



Abbildung 4  
Energetische und funktionale Anlagenüberwachung mit speziellen Controllern

a) für die Photovoltaik  
(links, Quelle: ISET)

b) für solarthermische Anlagen  
(rechts, Quelle: ISFH)



a)

b)

nose für Investoren), sollte das spektrale Verhalten der jeweiligen PV-Anlagentechnologie am Standort berücksichtigt werden. Das gilt auch für ein präzises PV-Anlagenmonitoring. In dem kalibrierten Solarzellensensoren „ISETSENSOR mpp“ ist dieser Ansatz für verschiedene Zellentechnologien umgesetzt. Die solare Einstrahlung wird dabei im Punkt maximaler Leistung (Maximum Power Point – MPP) bestimmt und entspricht damit nahezu der eines technologiegleichen PV-Generators mit PV-Wechselrichter.

Eine spezielle Elektronik ermittelt über eine Strom- und Spannungsmessung die Kennlinie der Messzelle und berechnet damit den MPP. Die Messpausen werden dazu genutzt, eine Energiemanagementeinheit mit Doppelschichtkondensator über die Messzelle „aufzuladen“. Die gesamten Messungen und Berechnungen übernimmt ein spezieller Mikrocontroller in Low-Power-Technologie. Nach entsprechender Kalibrierung wird die Bestrahlungsstärke direkt in  $W/m^2$  ausgegeben. Die Messwertübertragung an eine Auswerteeinheit kann zum Beispiel über eine RS232-Schnittstelle oder über Funk erfolgen.

## 2. Solarthermische Anlagen

Bei solarthermischen Anlagen können Störungen und sogar der vollständige Ausfall lange Zeit unentdeckt bleiben, da die Heizung die fehlende Wärme unbemerkt nachliefert. Eine zuverlässige Störungserkennung bietet das am ISFH entwickelte Input/Output-Verfahren (IOC). Wissen - schaftlich-technische Grundlage für das Input/Output-Verfahren ist ein innovativer, neuartiger IOC-Algorithmus. Er ermöglicht die automati-

sche Berechnung des erwarteten Ertrags von Kollektorkreislauf bzw. Solaranlage mit Hilfe eines kompakten Simulationsmodells. Anhand eines Soll-Ist-Werte-Vergleichs mit täglichen Messwerten erfolgt eine Ertragsbewertung. Dabei werden aktuelle Messwerte und aus der Anlagenplanung bekannte Parameter wie z. B. Kollektor- und Systemdaten verarbeitet. Das Input/Output-Verfahren besteht aus zwei Bausteinen: dem Input/Output-Controller mit dem darin automatisch ablaufendem IOC-Algorithmus und der angeschlossenen Messsensorik, sowie den Verfahrensregeln zur Organisation der schrittweisen Integration des Verfahrens in den gesamten Realisierungsprozess einer Solaranlage. Neue Entwicklungen zeigen, dass die IOC-Technologie zusammen mit Microsensoren auf MEMS-Basis zu einer erheblichen Kostenreduktion beim Betrieb solarthermischer Anlagen beitragen können.<sup>3</sup>

Das ISFH entwickelte zusammen mit der Firma RESOL einen Input/Output-Controller als erstes kommerziell verfügbares Kompaktgerät auf dem Solarmarkt. Erste Praxisdemonstrationen in der Wohnungsbauwirtschaft haben zu sehr positiven Ergebnissen geführt.

Mit der Umsetzung in eine internetbasierte IOC-Variante zum Einsatz in Anlagen der Gebäudeleittechnik wurde begonnen. Insgesamt wurden bisher IOC-Test-Geräte in 13 verschiedenartigen

<sup>3</sup> Siehe auch Artikel „Intelligente Mikrosensoren für den Einsatz in solarthermischen Anlagen – Integration in die Systemtechnik“ von Michael Verdirk in diesem Heft auf S. 66

Solaranlagen eingebaut. Bei einer Soll-Ist-Wert-Toleranz von 20 % kann mit einer Sicherheit von 99 % auf einen Störfall geschlossen werden. Im Entwurf zur VDI 2169 „Funktionskontrolle“ ist das Input/Output-Verfahren als Verfahren zur automatischen Ertragsbewertung etabliert worden.

Die positiven Projektergebnisse bieten eine neuartige Grundlage für Qualitätssicherung solarthermischer Anlagen: Fehler und Störungen können jetzt kostengünstig erkannt und rasch beseitigt werden. Der Solarthermie-Branche bietet sich die große Chance eines erheblichen Vertrauensgewinnes bei Investoren sowie seitens der Anbieter durch selbstbewusstes Qualitäts-Marketing. Darüber hinaus bietet es sich an, den Denkansatz des energetischen Soll-Ist-Wert-Vergleiches auch für die Effizienzkontrolle konventioneller Wärmeversorgungs-Systeme zu nutzen.

Das vom ISET koordinierte, europäische Exzellenznetzwerk von unabhängigen Laboren DERlab<sup>4</sup> unterstützt die konsistente Entwicklung dezentraler Energietechnologien auf der Basis einer gemeinsamen europäischen Forschungs- und Entwicklungsplattform. Ziele von DERlab sind der Aufbau eines verteilten, unabhängigen DER-Labors für Europa, um die Schaffung von europäischen und internationalen Normen substantiell zu unterstützen.

## Danksagung

für die Förderung der Projekte SIDENA und des Clusterprojekts „Zuverlässigkeit von PV-Modulen“

## Zusammenfassung und Ausblick

Eine hohe Verfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit von Systemen in der Energieversorgung erfordert neben der hohen Qualität der Einzelkomponenten eine hohe Verlässlichkeit für das Zusammenspiel in verschiedenen Systemstrukturen bzw. großen Netzen. Neben der Einhaltung von Qualitätsstandards in der Entwicklung und Produktion sind daher auch Maßnahmen zur Qualifizierung und Qualitätssicherung der Lebensdauer und Erträge von Solarsystemen von besonderer Bedeutung. Das gilt sowohl für solarthermische als auch für photovoltaische Anlagen.

Einhergehend mit der Integration von dezentralen Generatoren in die elektrischen Verteilnetze, müssen neue Konzepte für Analyse, Planung, Steuerung und Überwachung der Energieversorgung und -verteilung durch Laboruntersuchungen validiert werden, um diese neuen Komponenten bei der Leistungsoptimierung des Gesamtsystems zu berücksichtigen.

<sup>4</sup> DERlab ist ein europäisches Netzwerk der Exzellenz (NoE) von unabhängigen Laboratorien, die auf dem Gebiet der Integration verteilter Energiequellen (distributed energy resources (DER)) ins Stromnetz arbeiten.