

Zuverlässiger Betrieb von PV-Wechselrichtern: Erkenntnisse der multidisziplinären Analyse von Wechselrichterausfällen

Stephanie Malik^{1,*}, David Daßler¹, Dharm Patel¹, Carola Klute¹, Robert Klengel¹,
Andreas Dietrich², Kai Kaufmann³, Carsten Hennig⁴, Leonard Kraft⁵, Matthias Ebert¹

¹Fraunhofer IMWS, Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen, Walter-Hülse-Straße 1, 06120 Halle

²DiSUN, Deutsche Solarservice GmbH, Mielestraße 2, 14542 Werder (Havel)

³DENKweit GmbH, Blücherstraße 26, 06120 Halle

⁴saferay holding GmbH, Rosenthaler Str. 34-35, 10178 Berlin

⁵Leipziger Energiegesellschaft mbH & Co. KG, Burgstraße 1-5, 04109 Leipzig

* Tel.: 0345 5589 5212, Fax: 0345 5589 101

* E-Mail: Stephanie.Malik@csp.fraunhofer.de

* Internet: <https://www.csp.fraunhofer.de>

Einleitung

Die optimale Integration erneuerbarer Energien in das Stromnetz ist von entscheidender Bedeutung für die Reduktion von Treibhausgasemissionen und die Gewährleistung einer nachhaltigen Energieversorgung. In diesem Zusammenhang spielen Photovoltaik (PV) Wechselrichter eine wichtige Rolle, da sie die Brücke zwischen Solarmodulen und dem öffentlichen Stromnetz bilden. Ihre Aufgabe besteht nicht nur darin, Gleichstrom in netzkompatiblen Wechselstrom umzuwandeln, sondern auch sicherzustellen, dass PV-Strom effizient und zuverlässig in das Netz eingespeist wird.

Eine Störung oder ein Ausfall von PV-Wechselrichtern kann zur teilweisen oder vollständigen Abschaltung des PV-Systems führen. Diese Ausfälle verursachen große finanzielle Einbußen für Betreiber und Investoren. Zudem steigen die Wartungs- und Betriebskosten aufgrund intensiver Ursachenforschung fehlerhafter Wechselrichter überproportional an.

Um eine sichere Stromerzeugung aus PV-Systemen in Deutschland sowie gleichzeitig eine gute Wirtschaftlichkeit und Zuverlässigkeit dieser Anlagen sicherzustellen, ist es von großer Bedeutung, die Defektmechanismen von Wechselrichtern zu verstehen und die Häufigkeit von Ausfällen zu minimieren. Im BMWK-Projekt „robStROM“ forscht hierzu ein Konsortium, bestehend aus Forschung und Industrie, aktuell an innovativen Lösungen. In diesem interdisziplinären Projekt werden Verfahren der Materialwissenschaft, Elektrotechnik, Mathematik und Informatik kombiniert, um Ursachen und Aus-

wirkungen besser verstehen zu können. Ziel des Projektes ist es, mittelfristig systematische Wechselrichterausfälle zu verhindern und somit die Effizienz und Lebensdauer von PV-Systemen erheblich zu steigern.

Es besteht ein hoher Bedarf in der O&M (Operation and Maintenance) in großen Anlagen-Portfolios abweichendes Normverhalten von Wechselrichtern möglichst frühzeitig zu erkennen. Zusätzlich soll eine höhere Klarheit über die Ursachen von systemischen Wechselrichter-Ausfällen geschaffen werden. Dies bezieht sich sowohl auf relevante Parameter als auch auf die Häufigkeit, mit der diese Zustände auftreten. Auf dieser Grundlage können dann prädiktive Wartungsstrategien entwickelt werden.

Zielstellung der vorliegenden Arbeit ist es deshalb, fehlerhaftes Wechselrichterverhalten zu detektieren, Defektursachen einzugrenzen und Gemeinsamkeiten in Mustern zu identifizieren.

Lösungsansatz

Die Grundlage bilden umfangreiche Datensätze (Monitoringdaten) von großen PV-Systemen (jeweils mehrere MWp), mit mehrjähriger Betriebszeit, in hoher zeitlicher Auflösung sowie wesentlichen Informationen über den Betrieb der Wechselrichter. Im ersten Schritt erfolgte die Bewertung der Datenqualität. Hierbei wurde anhand geeigneter Kriterien sichergestellt, dass die vorliegenden Daten plausibel, vollständig und konsistent sind.

Der Schwerpunkt der Untersuchung ist die Erkennung von Wechselrichterausfällen und deren primären Ursachen. Mit Hilfe angewandter Methoden der Datenanalyse und statistischer Verfahren wurden Abhängigkeiten zwischen Parameterveränderungen, Fehlermeldungen und tatsächlichen Wechselrichterstörungen evaluiert.

Parallel zur Datenanalyse konnte durch mikrostrukturelle Untersuchungen ein Bezug zu einzelnen Wechselrichterkomponenten, genauer gesagt den IGBT-Leistungsmodulen, die in den betrachteten Systemen im Einsatz waren, hergestellt werden, um die tatsächliche Ursache und den Grad der Schädigung herauszufinden.

1. Datenanalyse

In der vorliegenden Untersuchung wurden neun Systeme mit Zentralwechselrichtern des gleichen Typs in der Größenordnung 500 bis 700 kWp über einen Zeitraum von 2012 bis 2023 analysiert. Die Systeme sind in Deutschland in unmittelbarer örtlicher Nähe zueinander installiert. Die Datenbasis bildeten die Messdaten und Informationen der Wechselrichter, als auch die von Pyranometern gemessene Bestrahlungsstärke in Modulebene in einer hohen zeitlichen Auflösung von einer Minute. Die Systeme sind mit kristallinen Modulen bestückt.

Die Identifikation verschiedener Betriebszustände (z. B. fehlerfrei oder -behaftet) erfolgt mittels Methoden des Maschinellen Lernens. In der hier vorliegenden Untersuchung wurde das Clustering-Verfahren OPTICS (Ordering Points To Identify the Clustering Structure) verwendet [1], [2]. Der Cluster-Algorithmus wurde unter Anwendung von Funktionalitäten der Scikit-learn Software-Bibliothek (Funktionen des maschinellen Lernens in der Programmiersprache Python) angewandt [3]. Er basiert auf der Dichte der Datenpunkte, d. h. die Anzahl von benachbarten Datenpunkten innerhalb eines bestimmten Umkreises, und kann Cluster beliebiger Form erkennen. Es hat den Vorteil, dass es robust gegenüber Rauschen ist, wie z. B. statistische Ausreißer, Rauschpunkte separat ausweist sowie keine festgelegte Anzahl von Clustern erfordert.

Ziel des Einsatzes von OPTICS war die punktgenaue Unterscheidung zwischen häufigen regulären und außergewöhnlichen Verhaltensmustern. Ein Musterwechsel kann aufgrund äußerer Einflüsse von einem zum anderen Zeitpunkt passieren und danach auch schnell wieder verschwinden, weshalb ein Datensatz mit minütlicher Auflösung verwendet wurde. Jeder Datenpunkt setzt sich mehrdimensional aus 15 unabhängigen und abhängigen Größen zusammen. Diese Parameter sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Für die hier vorliegende Untersuchung wurde ein Datenzeitraum von einem Jahr verwendet.

Clustering-Verfahren sortieren Daten mit ähnlichen Merkmalen in gleiche Gruppen (sog. „Cluster“). Demzufolge werden Datenpunkte mit stark abweichenden Merkmalsausprägungen in unterschiedliche Cluster verteilt. Dabei unterscheiden sich die Verfahren durch ihre Vorgehensweise, z. B. anhand der verwendeten Metrik, der Clusteranzahl und -form sowie der Robustheit und Skalierbarkeit. Im Allgemeinen gruppieren sie den Datensatz ganzheitlich und ohne äußere Zielvorgaben und vorherigen Kenntnissen, womit sie zum Bereich des unüberwachten Lernens gehören.

Das Verfahren OPTICS arbeitet auf der Grundlage der Datendichte. Das Verfahren zeichnet sich im Vergleich zu anderen dichte-basierten Verfahren durch seine Flexibilität aus, wodurch es in der Lage ist, Cluster mit unterschiedlicher Datendichte im mehrdimensionalen Raum zu erkennen. Dabei werden drei Hauptparameter verwendet: der Umgebungsradius (ϵ), der Stufenparameter (ξ), der die „Steilheit“ innerhalb des Erreichbarkeitsdiagramms beeinflusst, und die Mindestanzahl der erreichbaren Punkte (minPts), die zur Bildung eines Clusters erforderlich sind. In OPTICS ist der Umgebungsradius ϵ nicht festgelegt, sondern kann, je nach Beschaffenheit des Datensatzes, variabel entstehen und durch eine Obergrenze reguliert werden.

Ein Datenpunkt wird bei dieser Methode als Kernpunkt eingestuft, wenn sich mindestens minPts anderer Datenpunkte innerhalb seines Radius von ϵ um diesen Punkt befinden.

Die Kerndistanz eines Datenpunkts innerhalb eines Clusters ist der Mindestradius, der erforderlich ist, um ihn als Kernpunkt zu klassifizieren. Ist ein Datenpunkt kein Kernpunkt eines Clusters, so ist seine Kerndistanz undefiniert.

Die Erreichbarkeitsdistanz eines Datenpunkts p ist in Bezug auf einen anderen Datenpunkt q definiert. Sie ist die kleinste Distanz von q , wenn q ein Kernpunkt ist. Wenn q kein Kernpunkt ist, dann ist die Erreichbarkeitsdistanz von p in Bezug auf q undefiniert. Die Erreichbarkeitsdistanz wird verwendet, um die Dichte der Verbindung zwischen zwei Datenpunkten zu bestimmen. Wenn die Erreichbarkeitsdistanz zwischen zwei Datenpunkten kleiner als Epsilon ist, dann gehören sie zum selben Cluster.

Ergebnisse dieses Verfahren sind zum einen die Zuordnung der Datenpunkte in verschiedene Cluster (ohne Vorkenntnisse zur Datenstruktur), die jeweilige Datendichte und -anzahl je Cluster, die Clustergrenzen, die zeitliche Häufung sowie die Menge der Ausreißer.

Der Parameter ξ und minPts wurde mittels statistischer Analyse der Ausgangsdaten bestimmt. Die minPts wurden so gewählt, dass die resultierende Clusteranzahl weder zu klein noch zu groß wird, um eine gute Interpretierbarkeit der Cluster zu ermöglichen.

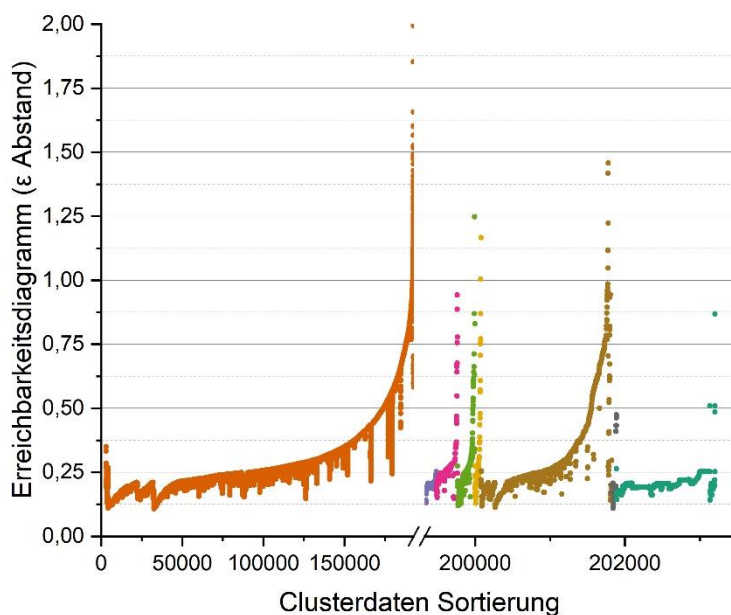


Abbildung 1: Erreichbarkeitsdiagramm für das abschließende OPTICS-Clustering Ergebnis ($\xi = 0,1$ und minPts = 50)

Tabelle 1: Liste der verwendeten Umgebungs- und Systemparameter für das OPTICS-Clustering

	Parameter	Symbol [Einheit]
Elektrische Messgrößen der Wechselrichter	Blindleistung	Q [var]
	Wirkleistung	AC P [W]
	Strom der Phasen L1 bis L3	AC I L1 bis L3 [A]
	Spannung DC-seitig	DC U [V]
	Leistung DC-seitig	DC P [W]
	Strom DC-seitig	DC I [A]
Sonnenposition & Bestrahlungsstärke	Azimuth der Sonne	AZ [°]
	Elevation der Sonne	EL [°]
	Bestrahlungsstärke in Modulebene	Pyr poa [W/m²]
Betriebszustände	Wechselrichter-Status - Abschaltung (0) - Standby (1) - Start (2) - Haupteinstellungen (3) - Online (4)	inv [-]
	System-Status - Initialisierung (0) - Tastensperre (1) - Abschaltung (2) - Start (3) - Leistungsnachführung (4) - Manuell I (5) - IGBT-Test (6) - Fehler (7)	sys [-]
	PV-Status - Abschaltung (0) - Nacht (1) - Aufwecken (2) - Online (3) - Nacht-Test (4) - Unterlastung (5)	pv [-]
	Abregelung durch den Netzbetreiber	NSM [%]

2. Materialcharakterisierung

Parallel zur Datenanalyse wurden auch Wechselrichterkomponenten, die in den betrachteten Systemen im Einsatz waren, weitergehend untersucht, um die tatsächliche Ausfallursache und den Grad der Schädigung herauszufinden. Um dabei möglichst sensibel vorzugehen und das Risiko einer Beeinträchtigung des Schadensbildes durch Präparationsschritte zu minimieren, beginnt man in der Regel mit zerstörungsfreien Charakterisierungsmethoden, wie beispielsweise Röntgen-inspektionsverfahren und

akustischer Mikroskopie (SAM). Diese können bereits erste Erkenntnisse hinsichtlich des Schädigungslevels ermöglichen und zur lokalen Eingrenzung des Ursprungs beitragen. Im nächsten Schritt erfolgt die Freilegung des Schädigungsbereiches, zum Beispiel durch Gehäuseöffnung oder Vergussentfernung. Häufig ist das Zerstörungsausmaß bei Überlast-bedingten Ausfällen von Leistungshalbleitern durch die freiwerdende thermische Energie derart drastisch, dass eine zielgerichtete Detailanalyse zur Fehlerursache nicht mehr möglich ist. Wird eine weiterführende Untersuchung als sinnvoll eingeschätzt, sind Methoden zur Präparation und Analyse der Mikrostruktur vorzusehen. Diese können Hinweise über abgelaufene Materialwechselwirkungen, aufgetretene Temperaturen und beeinträchtigte Funktionselemente liefern, welche wiederum Rückschlüsse auf den Degradationsablauf und die Ursachen erlauben.

Ergebnisse & Diskussion

1. Datenanalyse

Basierend auf umfangreichen Datenanalysen konnte ein Überblick wesentlicher Fehlerzustände von Wechselrichtern gewonnen werden. Abbildung 2 fasst hierzu die Anzahl der Fehlermeldungen einer Auswahl von Zentralwechselrichtern über einen Zeitraum von über 10 Jahren zusammen. Diese bildet die Basis der Priorisierung von Fehler- und Ausfallmechanismen für die weitere Untersuchung.

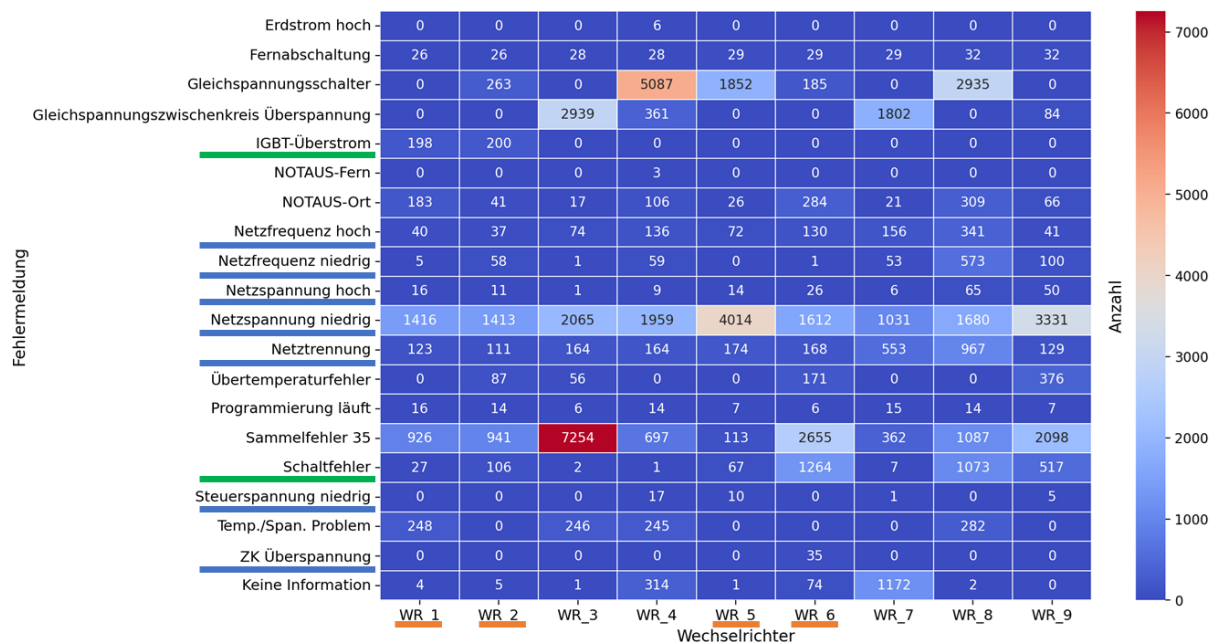


Abbildung 2: Anzahl aufgetretener Fehlermeldungen für eine Auswahl an Zentralwechselrichtern über einen Zeitraum von über 10 Jahren

Die in der Grafik blau unterstrichenen Fehlermeldungen hängen mit Netzstörungen zusammen, auf die man keinen direkten Einfluss nehmen kann. Diese Fehler sind

selbstlöschend und werden zurückgesetzt, sobald die Netzspannung und Netzfrequenz wieder im akzeptablen Bereich liegen. Die in grün hervorgehobenen Fehlermeldungen stehen in Zusammenhang mit den IGBT-Modulen (IGBT: Bipolartransistor mit isolierter Gate-Elektrode), die in der vorliegenden Untersuchung schwerpunktmäßig behandelt wurden, auf Grund ihrer wichtigen Funktion und gleichzeitigen Vulnerabilität. Beispielsweise wurden in einer industriebasierten Umfrage [4], [5] Halbleiterschalter und Kondensatoren als die am stärksten gefährdeten Komponenten in Wechselrichtern bezeichnet. Unerwartete Überlastungen und transiente Systemzustände sind die Hauptgründe für zufällige Ausfälle, während thermische Belastungen, gefolgt von mechanischen Vibrationen und Feuchtigkeit die Hauptursachen für Ausfälle aufgrund von Langzeitverschleiß sind. Die in der Abbildung 2 auf der X-Achse orange unterstrichenen Wechselrichter sind Bestandteil detaillierterer Analysen der hier vorliegenden Untersuchung. Bei den Wechselrichtern 1 und 5 liegen zusätzlich Wartungshinweise hinsichtlich des Ausfalls von IGBT-Modulen vor. Vergleichend hierzu wurde jeweils ein weiterer Wechselrichter ausgewählt (2 & 6), um das jeweilige Verhalten am gleichen Standort zu überprüfen.

Die Anzahl der Fehlermeldungen in Abbildung 2 sind erstmal nur ein Indikator für ein auffälliges Verhalten, es kann nicht daraus geschlussfolgert werden, dass eine höhere Fehleranzahl zu einem höher wahrscheinlicheren Ausfall führt. Des Weiteren sind bei denen im Detail betrachteten Wechselrichtern 1 & 5 Wochen und Monate im Vorfeld des Ausfalls keine Wechselrichter-Fehlermeldungen aufgetreten. Beim Wechselrichter 1 ist am Tag des Totalausfalls die Fehlermeldung „Schaltfehler“ des IGBT aufgetreten, zu dem Zeitpunkt war es jedoch zu spät noch zu handeln. Schlussfolgernd daraus ist die Betrachtung von Fehlermeldungen allein nicht ausreichend, sondern die gesamttheitliche Analyse des Wechselrichter-Verhaltens, um auf ein unter Umständen abweichendes Verhalten aufmerksam zu werden.

Bei den vorliegenden Wechselrichtern konnte ein voneinander abweichendes Verhalten identifiziert werden. In

Abbildung 3 ist ein Zeitausschnitt für solches Verhalten für die Wechselrichter 1 & 2 dargestellt. Während einer netzbetreiberbedingten Abregelung auf 0% würde im Normalfall der Wechselrichter in den PV-Status „Unterlastung“ wechseln und in diesem Zustand bleiben, bis die Abregelung vorüber ist (siehe Wechselrichter 2). Der Wechselrichter 1 bleibt jedoch nicht in diesem Zustand, sondern fährt in einem Wechsel verschiedene Zustände an („Unterlastung“ – „Aufwachen“ – „Unterlastung“, u. a. auch „Nacht“). Die einzelnen AC-Ströme schwanken hierbei zwischen ca. 90A und 0A. Das gleiche Muster ist auch bei der Wechselrichterkombination 5 & 6 zu beobachten, wobei der Wechselrichter 5 diesen Zustandswechsel anfährt und Wechselrichter 6 nicht (siehe Abbildung 4). Zusätzlich lässt sich eine zeitliche Verbindung zwischen diesem abweichenden Wechselrichter-Verhalten beim Abregeln und des Ausfalls des IGBT-Moduls herstellen. In

Abbildung 3 findet eine Abregelung von 10 bis 12 Uhr statt (NSM 0%) und eine halbe Stunde später, nach dem der Wechselrichter wieder im Normalbetrieb ist, geht er in den bereits genannten Fehlermodus.

Eine so detaillierte Fehleranalyse ist für ein gesamtes Anlagenportfolio nicht zeiteffizient möglich, weshalb eine automatische Detektion solcher Muster notwendig ist. Mit der Methodik des Clusters, wie in Kapitel „Lösungsansatz“ beschrieben, ist es gelungen, diese Zustände in Form separater Cluster sichtbar zu machen. In Abbildung 5 sind die entstandenen Cluster in ihren Begrenzungen für alle beim Clustern genutzten Parameter dargestellt. Der untere und obere Rand, der in den einzelnen Farben aufgespannten Flächen, entspricht dem 25%- und 75%-Quantil des Datensatzes, der dem Cluster zugeordnet ist. Der Mittelwert des jeweiligen Clusters ist mit der dick gedruckten Linie dargestellt. Die Abkürzungen der dargestellten Parameter auf der X-Achse sind in Tabelle 1 definiert.

Das Cluster 0 spannt den größten Bereich auf und enthält 96,6% der Daten. Dieses Cluster stellt in Bezug auf die Monitoring-Daten den gewöhnlichen Wechselrichterbetrieb dar. Im Cluster -1 sammeln sich Daten-Ausreißer (1,5% der Daten), es wird auch als „Noise“-Cluster bezeichnet.

Dem Cluster 5 werden 0,9% der Daten zugeordnet und stellt die Situationen dar, in denen das System auf Grund des DC/AC-Auslegungsverhältnisses abgeregelt wird. Die Cluster, denen man das Muster zuordnen kann (siehe Abbildung 4), sind 2, 3 und 4 (zusammen 0,2% der Daten). Durch den Zustandswechsel, der dem Muster zu Grunde liegt, variiert auch die Parameterkonstellation untereinander, weshalb verschiedene Cluster entstehen, jedoch insgesamt zum Muster gehören. Diese genannten Cluster treten über den gesamten Datenzeitraum auf (1 Jahr). Zusätzliche kleinere Cluster entstehen durch eine zeitlich bedingte Spezifik, bspw. ein netzbedingtes Abregeln auf 60%, dass nur für einen kurzen Zeitraum an einem Tag aufgetreten ist (Cluster 6), oder besondere Einstrahlungsbedingungen oder auch Verschattungen durch Schnee.

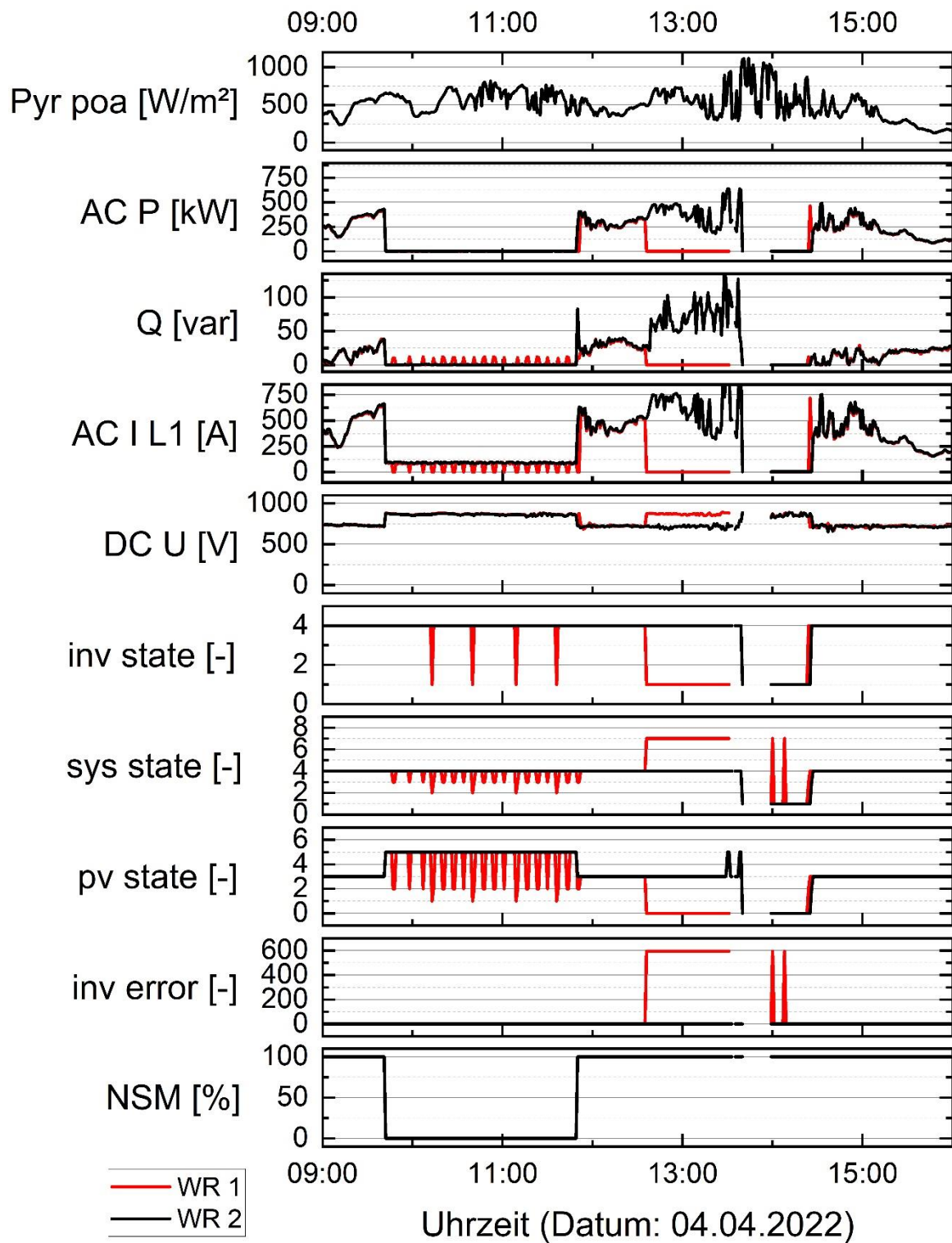


Abbildung 3: Gegenüberstellung einzelner elektrischer Messgrößen und Statusinformationen des Wechselrichters WR 1 und eines vergleichbaren Wechselrichter WR 2 im selben System, am 04.04.2022 (Abkürzungen siehe Parameterbeschreibung Tabelle 1)

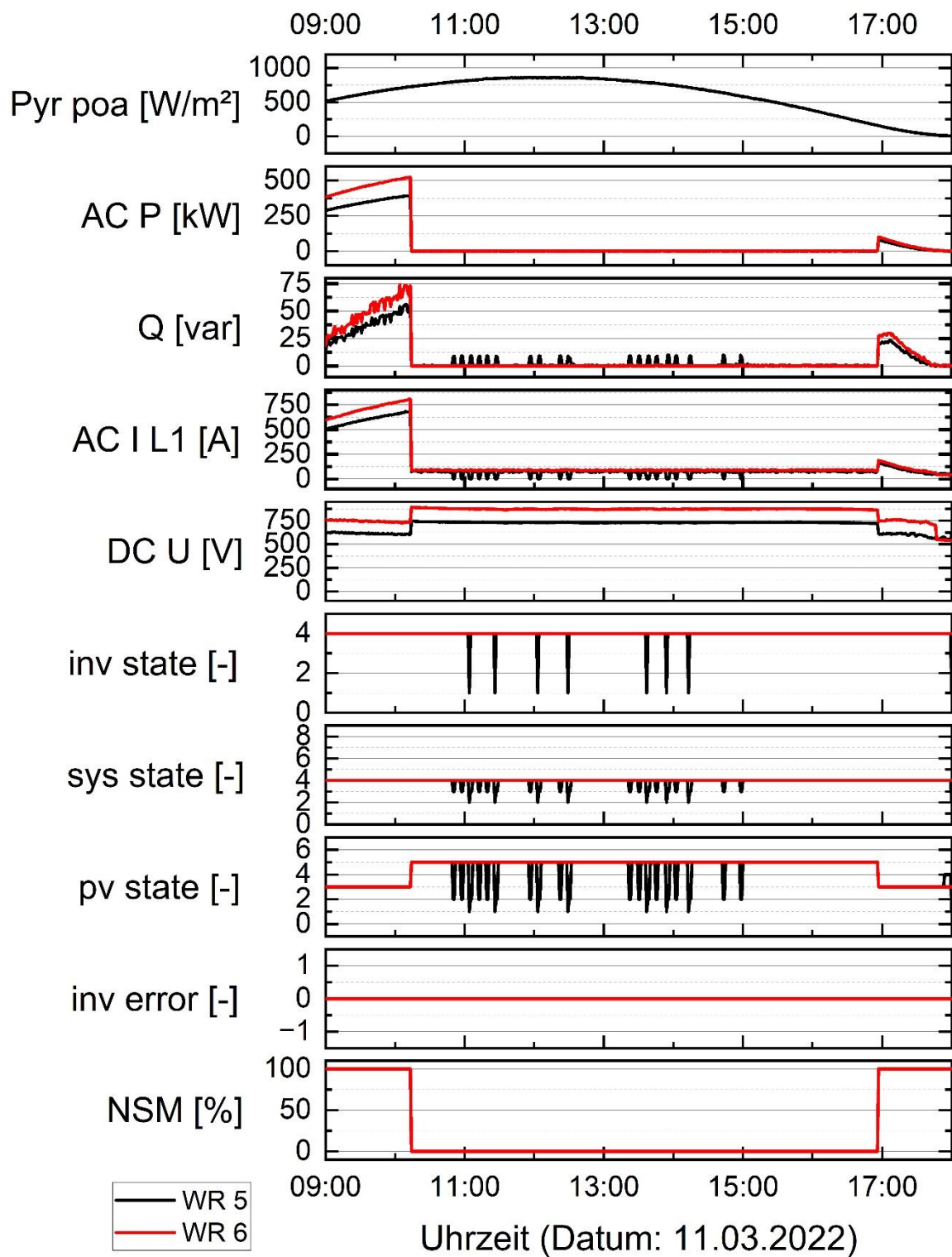


Abbildung 4: Gegenüberstellung einzelner elektrischer Messgrößen und Statusinformationen des Wechselrichters WR 5 und eines vergleichbaren Wechselrichter WR 6 im selben System, am 11.03.2022 (Abkürzungen siehe Parameterbeschreibung Tabelle 1)

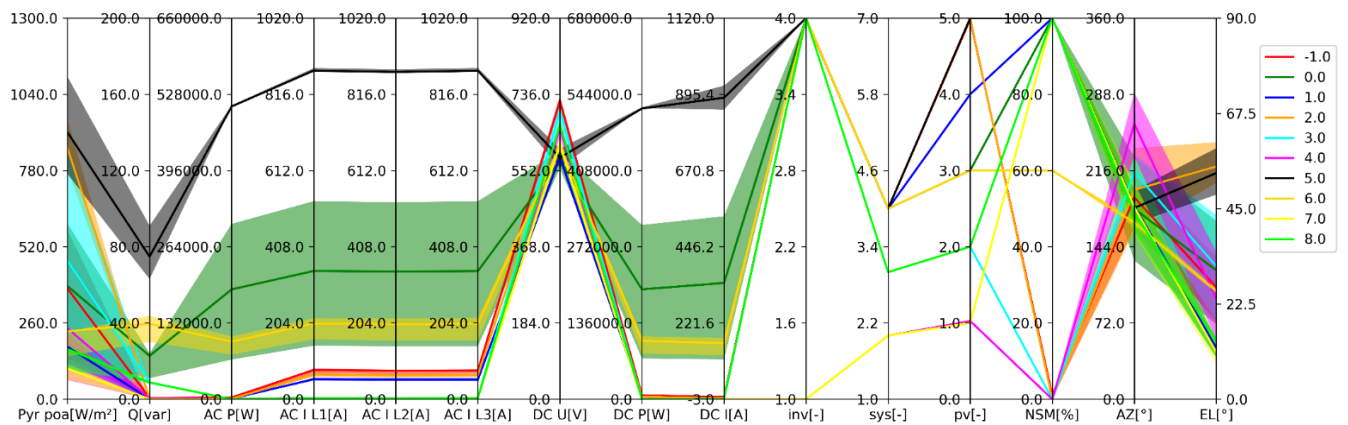
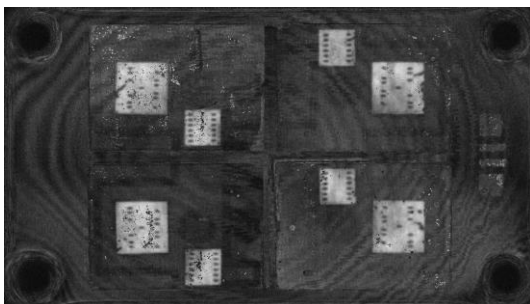
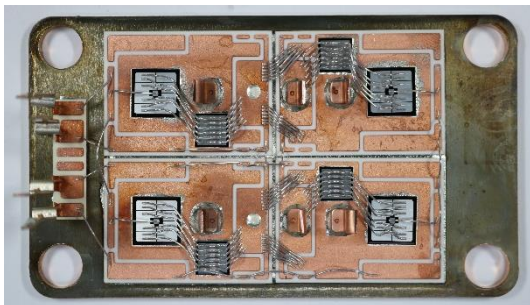


Abbildung 5: Ergebnisse des Clusters mit OPTICS: Farbe = Cluster; Linie = Mittelwert pro Cluster; gefüllte Fläche = 25%- und 75%-Quantil, Wechselrichter 5, Zeitraum des Datensatzes: 01/22 - 12/22

2. Materialcharakterisierung

In Bezug auf Wechselrichter 5 konnte eine Verbindung bis auf Komponentenebene hergestellt werden. Es wurde ein Leistungsmodul, das im Wechselrichter 5 im Einsatz war, im Labor charakterisiert. In **Abbildung 6** ist das ausgefallene Leistungsmodul im Vergleich zu einem Leistungsmodul nach Feldalterung des Wechselrichters 6 dargestellt.

Leistungsmodul nach Feldalterung



Leistungsmodul nach Ausfall

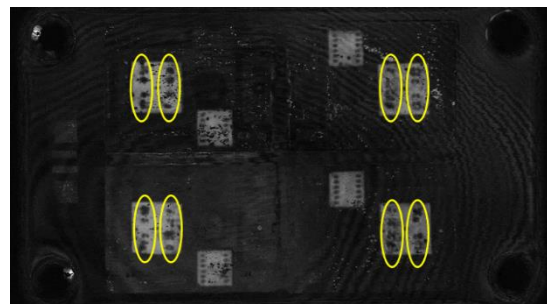
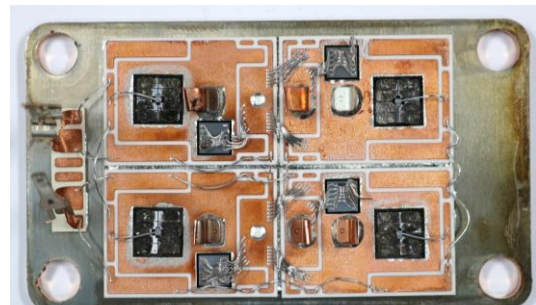


Abbildung 6: Charakterisierung der Ausfallmechanismen in Wechselrichterkomponenten, oben: Leistungsmodul ohne Gehäuse und Verguss, unten: zerstörungsfreie SAM-Analyse (Ebene Drahtbondanbindung) vor der Entfernung von Gehäuse und Verguss

Bereits die zerstörungsfreie Untersuchung der Module mittels SAM vor Gehäuseöffnung und Entfernung des Silikongel-Vergusses zeigt deutliche Unterschiede zwischen Ausfall- und Referenz-Modul und gibt Hinweise auf das Schädigungsbild. Es lassen sich Beeinträchtigungen in der Ebene der Drahtbondanbindungen erkennen (siehe Abbildung 6) und auch hinsichtlich der Chip-Lötungen sind Veränderungen erkennbar. Nach dem Öffnen des Gehäuses und der chemischen Entfernung des Silikongel-Vergusses sind die Unterschiede offensichtlicher. Die Emittermetallisierung der IGBT-Bauteile ist vollständig degradiert und auch die zugehörigen Drahtbondverbindungen zum DCB-Substrat sind zerstört. Des Weiteren erkennt man ein Wiederaufschmelzen von Lötverbindungen der Chips sowie der Pins der Anschlussterminals.

Aufgrund der Tatsache, dass alle vier IGBT-Bauteile gleichermaßen betroffen sind, die zugehörigen Dioden keine Schädigung aufweisen und sich das periphere Schädigungsausmaß insgesamt weniger drastisch zeigt, ist davon auszugehen, dass eine länger andauernde Übertemperaturbelastung zur Degradation der Halbleiter und schließlich zum Ausfall geführt haben.

Schlussfolgerung

Der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit war die Analyse von Wechselrichterausfällen auf Grund von geschädigten IGBT-Modulen. Die detaillierte Ursachenforschung wurde von zwei Seiten betrieben, auf der einen die Analyse von Monitoring-Daten der Wechselrichter und auf der anderen die Materialcharakterisierung der geschädigten Komponente. Es konnten zeitliche Zusammenhänge zwischen einem abweichenden Wechselrichterverhalten und dem Auftreten des Schaltfehlers der IGBT-Module hergestellt werden. Zusätzlich wurde eine Methode angewandt, dieses abweichende „Verhaltensmuster“ des Wechselrichters automatisiert in den Monitoring-Daten zu detektieren. Auf Grund des begrenzten Umfangs der Untersuchung lassen sich die gemachten Beobachtungen nicht generalisieren und es lässt sich auch keine gesicherte Zuordnung der Fehlerursache zum Ausfall herstellen. Jedoch gilt es, dieser Spur weiter zu folgen und auf einem größeren Anlagen-Portfolio, das dem Projekt robStROM zur Analyse zur Verfügung steht, zu validieren. Das Clustern der Daten bietet gute Chancen, selbst kleine Veränderungen der Parameter zueinander zu identifizieren. Durch die Kenntnis der Rahmenbedingungen der entstandenen Cluster lassen sich auch weitere neu-geclusterte Zeiträume des gleichen Systems automatisiert vergleichen, um möglichst frühzeitig auf Veränderungen im System aufmerksam zu werden.

Danksagung

Die Arbeiten im Projekt robStROM werden mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramms gefördert (Förderkennzeichen: 03EE1163B).

Referenzen

- [1] Ankerst, Mihael, Markus M. Breunig, Hans-Peter Kriegel, and Jörg Sander. "OPTICS: ordering points to identify the clustering structure." ACM SIGMOD Record 28, no. 2 (1999): 49-60.
- [2] Schubert, Erich, Michael Gertz. "Improving the Cluster Structure Extracted from OPTICS Plots." Proc. of the Conference "Lernen, Wissen, Daten, Analysen" (LWDA) (2018): 318-329.
- [3] Scikit-learn: Machine Learning in Python, Pedregosa et al., JMLR 12, pp. 2825-2830, 2011.
- [4] M. Shahzad, K. V S Bharath, M. A. Khan, and A. Haque, "Review on reliability of power electronic components in photovoltaic inverters," in Proc. Int. Conf. Power Electron., Control Autom. (ICPECA), New Delhi, India, Nov. 2019, pp. 1-6.
- [5] J. Falck, C. Felgemacher, A. Rojko, M. Liserre, and P. Zacharias, "Reliability of power electronic systems: An industry perspective," IEEE Ind. Electron. Mag., vol. 12, no. 2, pp. 24-35, Jun. 2018.