

---

# Thermographische Kontrolle von Photovoltaikanlagen mittels GPS-gestützter Drohne

Roland ZINK, Wolfgang DORNER, Martin SCHLOTT,  
Patrick REIDELSTÜRZ und Andreas GRZEMBA

## Zusammenfassung

Photovoltaik gewinnt eine stetig größer werdende Bedeutung bei der Stromversorgung, weshalb auch die Überprüfung derartiger Anlagen auf ihre Leistungsfähigkeit für eine sichere und kostengünstige Energieversorgung zunehmend wichtiger wird. Mit dem Verfahren „Aerial Thermal Solar Control“ (ATSC), einer Kombination von Wärmebildkamera, Drohne (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) und Auswertesoftware, bieten sich neue Möglichkeiten, sowohl schwer zugängliche Photovoltaik-Dachanlagen als auch großflächige Solarparks berührungsfrei und während des normalen Anlagenbetriebs zu inspizieren. Der Beitrag gibt Einblicke in die Synergien von Thermalbildfotographie und Fernerkundung im Anwendungsbereich der Photovoltaik und geht speziell auf die Probleme der räumlichen Positionierung der Fluggeräte mittels GPS ein.

## 1 Photovoltaik: nicht alles Gold was glänzt

Die Photovoltaikindustrie hat speziell in Deutschland in den vergangenen Jahren einen enormen wirtschaftlichen Boom erfahren. Gefördert durch das Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (kurz EEG) sind zahlreiche Dach- und weiträumige Freiflächenanlagen entstanden. Die installierte PV-Leistung beträgt aktuell 24.820 MW<sub>p</sub> (Stand 31.12.2011) bei einem rasanten Zubau von 7.406 MW<sub>p</sub> im Jahr 2010 und 7.500 MW<sub>p</sub> im Jahr 2011 (vgl. BMU 2012). Die hohe Nachfrage nach Photovoltaikmodulen hat großes wirtschaftliches Interesse geweckt, worauf eine Vielzahl an Herstellern aus dem In- und Ausland in den Markt eingetreten sind. Um konkurrenzfähig zu sein, galt es, die hohen spezifischen Investitionskosten der Photovoltaiktechnologie (€/kW<sub>p</sub>) zu senken, was in den letzten Jahren vornehmlich durch eine Reduktion der Modulproduktionskosten gelungen ist. Der hohe Kostendruck hat neben der Senkung von Stromgestehungskosten teils aber auch zu Qualitätsmängeln geführt, sodass aktuell angestrebte Wirkungsgrade, Sicherheitsstandards sowie Lebenserwartungen von Modulen teils verfehlt und die Ansprüche von Investoren und Betreibern vielfach nicht erfüllt werden. Ein massiver Leistungsverlust kann dabei auch erst nach ein paar Jahren auftreten. Es ist also nicht alles Gold, was bläulich von den Dächern oder auf den Ackerflächen schimmert.

Die ständige Überwachung und Überprüfung von PV-Anlagen erhält deshalb einen hohen Stellenwert. Wie widerstandsfähig sind die Module gegenüber den verschiedenen Witterungsbedingungen (z. B. Eis, Schnee oder Hitze), treten Schäden nach Unwettern auf (z. B. Hagel oder Sturm) oder werden die garantierten Leistungszusagen der Produzenten erreicht? Fragen, die nicht nur für den Investor bzw. Betreiber, sondern auch für Versiche-

rungen, Hersteller und Monteur große Relevanz besitzen. Neben den herkömmlichen elektrotechnischen Messverfahren fordert der beständig wachsende Photovoltaikmarkt in zunehmendem Maße – die ersten installierten Anlagen erreichen in Deutschland nun ein Alter von acht bis zehn Jahren – kostengünstige und effiziente Kontrollverfahren. Die innovative Kombination aus Thermographie, mit welcher schadhafte Module detektiert werden können, und GPS-gestützter Drohne, die stets eine optimale Perspektive auf die Module gewährleistet, bietet hier ein vielversprechendes Potenzial.

## 2 Kontrolle von Photovoltaik

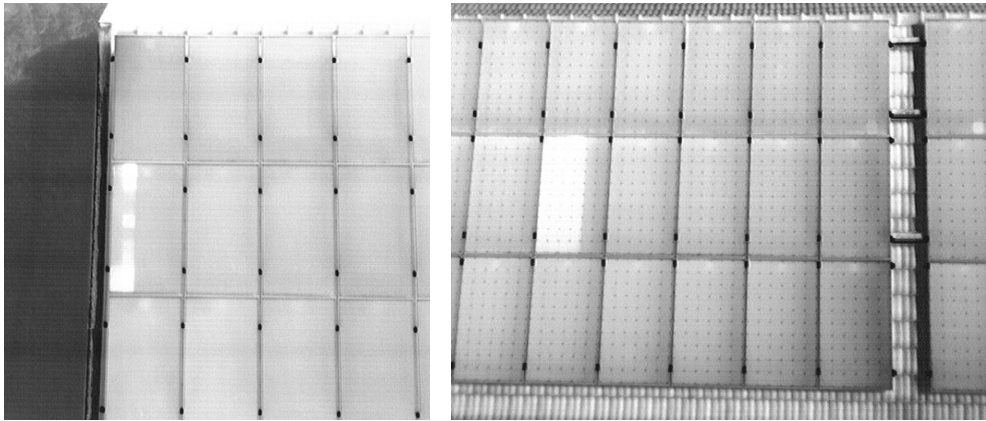
Schäden an einem Modul können sowohl während der Produktion als auch durch eine unsachgemäße Installation bzw. im Betrieb (z. B. durch Unwetter oder technische Defekte) entstehen. Die Kontrolle von Photovoltaikanlagen bereitet in der Praxis dabei in mehrfacher Weise Probleme. Bei klassischen Messverfahren müssen die Module bzw. Strings einzeln an entsprechende Messgeräte angeschlossen und überprüft werden. Diese Methode stößt bei einer Photovoltaik-Dachanlage aufgrund der meist schwierigen Zugänglichkeit zu entsprechenden Anlagenkomponenten bzw. zu einzelnen Modulen und bei einer Photovoltaik-Freiflächenanlage aufgrund der großen Anzahl an Modulen (1 MWp entspricht in etwa 4.500 Modulen) an ihre Grenzen. Das Fotografieren von Modulen mit einer Wärmebildkamera (Thermographie) kann hier Abhilfe schaffen und schadhafte Module während des Normalbetriebs der Anlage effizient und schnell kenntlich machen. Aber auch diese Inspektionsmethode besitzt ihre Schwächen. Um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, müssen vor allem der Abstand zwischen Kamera und Modul sowie der Aufnahmewinkel jederzeit innerhalb einer gewissen Bandbreite sein. Die richtige Positionierung der Kamera ist deshalb entscheidend.

### 2.1 Thermographische Überprüfung

Die Thermographie ist ein Inspektionsverfahren, mit dem PV-Module sowohl auf physische Schäden als auch auf technische, meist äußerlich nicht sichtbare Defekte kontrolliert werden können. Moduldefekte wie z. B. interne Kurzschlüsse, fehlerhafte Bypassdioden, unterbrochene Kontakte oder Glasbrüche führen zu punkthaften bzw. flächigen Erwärmungen, welche im Thermogramm sichtbar sind und anhand ihres Erscheinungsbildes analysiert werden können (vgl. Abb. 1). Das Verfahren bietet somit die Möglichkeit, neben der reinen Fehlersuche auch Defekte hinsichtlich ihrer Art zu unterscheiden und zu analysieren, um entsprechende Reparaturen durchzuführen bzw. Maßnahmen einzuleiten (vgl. AUER et al. 2007, BUERHOP et al. 2007).

Bereits bei der Produktion von Modulen kommen Wärmebildkameras in der Endkontrolle zum Einsatz, allerdings unter den festgelegten Standard-Testbedingungen (Standard Test Conditions, STC), welche Laborvoraussetzungen entsprechen. Aufgrund der jeweiligen Anlagenparameter (z. B. Exposition und Ausrichtung zur Sonne) oder der Witterungseinflüsse (z. B. Sonneneinstrahlung oder Temperatur der Luft) sind diese normierten Testbedingungen bei installierten Anlagen äußerst selten bzw. niemals vorzufinden. Um diesem Nachteil bei der Überprüfung mittels Wärmebildkamera im Außenbereich entgegen zu wirken, ist es daher geboten, die weiteren Einflussfaktoren möglichst optimal zu gestalten. Hierzu zählen primär eine geeignete Entfernung zwischen Kamera und Modul (Sicherstel-

lung einer hohen Auflösung) sowie die möglichst senkrechte, aber dennoch von der lotrechten leicht abweichende Aufnahmeposition der Kamera. Die Glasflächen der PV-Module reflektieren im Spektralbereich der Wärmemessung (8 bis 12  $\mu\text{m}$ ) gerichtet, weshalb die senkrechte Position über den Modulen zu vermeiden ist (vgl. BUERHOP et al. 2007). Die korrekte Positionierung der Kamera ist folglich der entscheidende Parameter, um aussagekräftige Fehleranalysen mittels Thermalbildüberprüfung bei Photovoltaikanlagen zu erreichen.



**Abb. 1:** Verschiedene Schadensbilder von Photovoltaikmodulen aus der Vogelperspektive

## 2.2 Einsatz eines unbemannten Flugsystems

Der Einsatz von Drohnen bzw. unbemannten Flugsystemen (UAS) setzt sich seit einigen Jahren neben der militärischen Nutzung immer stärker auch in zivilen Anwendungsbereichen durch. Hierzu zählen u. a. die Luftbildfotographie und -archäologie, die Schadensbegutachtung bei Unwetter und Waldbränden oder die Generierung von vegetationskundlichen Fernerkundungsdaten. Die innovativen Entwicklungen im zivilen Bereich gehen dabei hin zu kleinen, leichten, wendigen und präzise zu steuernden Fluggeräten. Ausgestattet mit ebenfalls beweglich gelagerten und stabilisierten Kamerasystemen (z. B. Digital-, Wärmebild- oder Infrarotkamera) lassen sich damit schnell neue Perspektiven auf verschiedene Objekte erkunden und neue Fernerkundungs- bzw. Geodaten gewinnen.

Gegenwärtig sind Drohnen die zielführende Option, um zuverlässig alle notwendigen Parameter zur Überprüfung von Photovoltaikmodulen bestehender Anlagen mit Mitteln der Thermographie zu erfüllen. Mit stationären und vom Boden aus agierenden Verfahren erreicht man nur mit großem Aufwand eine Höhe, die sowohl einen optimalen Aufnahmewinkel als auch optimalen Abstand bietet. Bei großen Photovoltaik-Dachanlagen wie Freiflächenanlagen ist die Praktikabilität deshalb stark eingeschränkt. Eine Drohne hingegen gewährleistet nicht nur den geforderten Winkel, sie kann eine Anlage auch in einem Abstand befliegen, der neben einer Fehlererkennung aufgrund der hohen Auflösung zusätzlich eine verlässliche Schadensklassifizierung zulässt.

Während umfangreicher Forschungsversuche wurden deshalb unterschiedliche Flugsysteme auf die Eignung zur Befliegung von Photovoltaikanlagen getestet. Grundsätzlich besitzen Drohnen mit horizontal angeordneten Rotoren die besten Eigenschaften. Prädestiniert sind sogenannte Quadro-, Hexa- oder Octocopter mit vier, sechs bzw. acht Rotoren, deren wesentlicher Vorzug das hubschrauberähnliche Flugverhalten ist, im Besondern die Möglichkeit stabil in der Luft zu stehen. Gleichzeitig ist das Gewicht dieser Flugkörper gering, die Tragkraft allerdings ausreichend, um spezielle Wärmebildkameras zu heben und ausreichend lange Flugzeiten auch bei begrenzten Akkukapazitäten zu erreichen.

Die Nützlichkeit dieser Drohnen hinsichtlich der Befliegung von Photovoltaikanlagen resultiert jedoch vor allem aus der Tatsache, dass man gefahrlos und ohne große Beeinträchtigung an den Untersuchungsgegenstand heranfliegen kann. Diesbezüglich zeichnet sich eine Drohne vor allem gegenüber einem bemannten Hubschrauber aus, dessen Einsatz im geforderten Tiefflug über bebauten bzw. bewohnten Gebieten stark begrenzt ist. Alle Faktoren zusammen lassen einen effizienten Einsatz der Drohnentechnologie für die dargelegte Anwendung bei Photovoltaikanlagen zu und ermöglichen auch ökonomische Betriebskosten.

### 2.3 Steuerung und Positionierung der Drohne

Obwohl moderne Drohnen, gleich welcher Bauart, mit präzisen Flugregelungs- und Flugführungssystemen ausgestattet sind, wodurch deren praktische Handhabung wesentlich erleichtert wird, reichen die elektronischen Hilfsmittel vielfach für die Anwendung im Photovoltaikbereich und der Thermographie nicht aus. Dies gilt vor allem für Schwebepattformen wie Quadro-, Hexa- und Octocopter, die ohne Unterstützung z. B. durch GPS und barometrischer Höhenmessung für den normalen Anwender nur schwer steuerbar sind. Die räumliche Positionierbarkeit der Drohne mittels GPS, Kompass und barometrischer Höhenmessung führt zwar dazu, dass das Flugsystem eine erreichte Position gut beibehält und der Pilot zur Positionsveränderung nur in übergeordnete Flugregelungslöops lenkend eingreifen muss. Allerdings verhindert die mangelnde Genauigkeit speziell von GPS (ca. 3 bis 5 Meter Genauigkeit; vgl. DEPARTMENT OF DEFENSE & GPS NAVSTAR 2008) eine ausreichend konstante Ortstreue der Drohne im benötigten Abstand bzw. Winkel zum Photovoltaikmodul, um eine stabile, automatisierbare und reproduzierbare Fluglage sicherzustellen. Die präzise Flugregelung wird folglich Opfer der ungenauen und springenden GPS-Position, indem sie stets versucht, die Position dem fehlerhaften GPS-Signal anzupassen. Deshalb ist für die beschriebene Anwendung der Einsatz einer optimierten GPS-Genauigkeit zwingend erforderlich.

Eine kostenpflichtige Möglichkeit ist hierbei u. a. der SAPOS<sup>®</sup>-Dienst HEPS (Hochpräziser Echtzeit Positionierungs-Service), ein äußerst exaktes differenzial-GPS, welches (für Deutschland) dreidimensionale Positionen im europäischem geodätischem Bezugssystem ETRS89 liefert (vgl. hierzu und zu folgenden Angaben BILL 2010 / LANDESAMT FÜR VERMESSUNG UND GEOINFORMATION BAYERN 2012). Mittels Korrekturdaten erlaubt der SAPOS<sup>®</sup>-Dienst eine deutlich verbesserte Positionsbestimmung mit Genauigkeiten von 1 bis 2cm in der Lage bzw. 2 bis 3cm in der Höhe. Dies wird durch ein flächendeckendes Netz an Referenzstationen erreicht, die permanent sowohl in Echtzeit als auch für das Post-processing Daten bereithalten.

Eine Alternative ist die Nutzung eines DGPS mit einer selbst installierten Referenzstation am Boden. Die absolute Position der Referenzstation ist dabei, im Falle einer nicht GIS-basierten Auswertung, nicht zwingend erforderlich, da für eine präzise Steuerung des Fluggerätes lediglich die relative Abweichung des GPS-Signals zu einem als fix positioniert angenommenen Standort (Referenzstation) von Interesse ist. Sollen die Thermalbilder z. B. in einem GIS verortet werden, ist jedoch eine exakte absolute Positionsbestimmung auch der Referenzstation notwendig. An der Referenzstation ermittelte Fehler im GPS-Signal können wie bei kommerziellen Diensten der Drohne als Korrektursignal zugesendet werden. Ausgestattet mit entsprechender Hardware und einer speziell für den Anwendungsbereich Photovoltaik entwickelten Software kann die Drohne somit im Funkumfeld der Referenzstation vor Ort höchst präzise bewegt werden.

In Kombination mit den oben beschriebenen Sensoren können die aufgezeigten Techniken eine exakte Positionierung und Positionsbestimmung der Drohne bis auf wenige Zentimeter ermöglichen. Hierdurch soll zum einen die erforderliche Ortstabilität der Drohne für die Thermographie erreicht werden. Zum anderen kann aber auch die bisher komplett manuelle oder die einfache GPS-gestützte manuelle Steuerung durch automatisiertes GPS-Wegepunkttracking abgelöst werden.

Durch die exakte Positionsbestimmung des Fluggerätes wird gleichzeitig auf – bei exakter Lagebestimmung der Referenzstation – die räumliche Zuordnung der Wärmebilder zu den jeweiligen Photovoltaikmodulen verbessert. Schadhafte Module lassen sich so z. B. in GIS-basierten Lage- oder Anlageplänen lokalisieren, was gerade bei großen Dach- und insbesondere Freiflächenanlagen wichtig ist.

### **3 Fazit**

Geoinformation und exakte Positionierbarkeit sind bei „Aerial Thermal Solar Control“ eine zentrale Grundlage, um Fehler und Schäden an Photovoltaikmodulen identifizieren und zuordnen sowie den Operator der Drohne bei der Flugführung unterstützen zu können. Sowohl die Optimierung des Flugverhaltens der Drohne als auch der thermographischen Aufnahme und der automatischen Bilderkennung stellen diesbezüglich weiterhin große Herausforderungen an Soft- und Hardware. Mit der aufgezeigten Kombination aus unbemanntem Fluggerät mit hochpräziser Steuerung und Wärmebildkamera wird aber ein vielversprechendes Verfahren präsentiert, um künftig den großen Bedarf der Überwachung effizient, schnell und aussagekräftig bewältigen zu können. Der Einsatz einer präzise zu lenkenden Drohne ist dabei der wesentliche Vorteil, ermöglicht dieser die gefahrenlose und berührungsfreie Überprüfung aus der Luft sowohl für Photovoltaik-Dachanlagen als auch für Freiflächenanlagen. Mit barometrischer Höhenmessung, Kompasssteuerung und der Verwendung von differenzial-GPS unterstützt, kann die Drohne stets in der geforderten Genauigkeit richtig positioniert werden und die Automatisierung von Bild- und Fehlererkennung leistungsfähig und ökonomisch effizient arbeiten. Luftbild-Thermographie gewährt somit auch im Anwendungsfeld der Photovoltaik-Thermographie im Außenbereich künftig beachtenswerte Anknüpfungspunkte zu Methoden und Technologien der Geoinformatik, die es weiter auszubauen gilt.

## Literatur

- AUER, R., JAHN, U., BUERHOP-LUTZ, C., VORDERMAYER, C., WOTRUBA, G., ZEHNER, M. & NIEB, M. (2007), Infrared analysis of PV Modules für Improving Quality. In: PVSEC 22<sup>nd</sup> European Photovoltaic Solar Energy Converenc and Exhibition 2007 – Milano, 2519-2522.
- BILL, R. (2010), Grundlagen der Geo-Informationssysteme. Berlin.
- BUERHOP, C., JAHN, U., HOYER, U., LERCHE, B. & WITTMANN, S. (2007), Überprüfung der Qualität von Photovoltaik-Modulen mittels Infrarot-Aufnahmen, Korrelation von Infrarot-Messung und elektrischer Messung. ZAE Bayern e.V. <http://www.sev-bayern.de/content/downloads/IR-Handbuch.pdf> (Zugriff am: 28.12.2011).
- BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (BMU) (2012), Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2011. [http://www.erneuerbare-energien.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/ee\\_in\\_deutschland\\_graf\\_tab.pdf](http://www.erneuerbare-energien.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/ee_in_deutschland_graf_tab.pdf) (Zugriff am 12.04.2012).
- DEPARTMENT OF DEFENSE & GPS NAVSTAR (2008), Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard. <http://www.gps.gov/technical/ps/2008-SPS-performance-standard.pdf> (Zugriff am 29.01.12).
- LANDESAMT FÜR VERMESSUNG UND GEOINFORMATION BAYERN (2012), Satellitenpositionierungsdienst. SAPOS<sup>®</sup>. [http://vermessung.bayern.de/file/pdf/1040/download\\_faltblatt-sapos08.pdf](http://vermessung.bayern.de/file/pdf/1040/download_faltblatt-sapos08.pdf) (Zugriff am 09.01.12).