Einreichung für den Doktoranden-Ideenwettbewerb
der Stiftung Energie & Klimaschutz Baden-Württemberg im Themenfeld
„Meine Stadt von morgen: Wie sieht die Energielandschaft der Zukunft aus?"

Kamera-basierte Kürzest-Frist Vorhersagen zur Netzstabilisierung

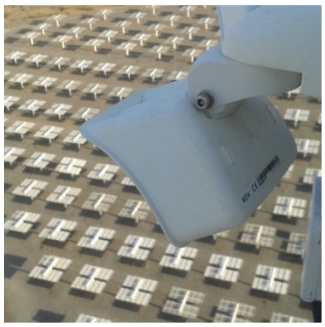
Pascal Kuhn, M.Sc.

Solare Energie-Meteorologie

Institut für Solarforschung

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Pascal.Kuhn@dlr.de | Tel.: 0034-950611743 | Paseo de Almería, 73 N, 04001 Almería – Spanien



Kamera-basierte Kürzest-Frist Vorhersagen zur Netzstabilisierung

Inhaltsverzeichnis

Der Sieg der Erneuerbaren Energien 1
Stabilität durch Vorhersagen 1
Wolkenkamera-basierte Nowcasting-Systeme 2
Schattenkamera-basierte Nowcasting-Systeme 3
Städte zwischen Grid und God Parity 4
Quellen 5

Der Sieg der Erneuerbaren Energien

Im September 2016 wurde für ein 350 MW Kraftwerk in den Vereinigten Arabischen Emiraten das bisher günstigste Angebot für Solarstrom abgegeben: 2.42 US-cent/kWh, ein Mitbewerber bot 2.53 US-cent/kWh [1,2]. Getrieben durch solche Kostenstrukturen werden Erneuerbare Energien, hauptsächlich Solar und Windkraft, eine immer höhere Netzdurchdringung erreichen und in absehbarer Zeit den Strommarkt dominieren. In bestimmten Regionen und Situationen wird schon heute der Strompreis maßgeblich durch Wind und Sonne bestimmt [3,4].

Stabilität durch Vorhersagen

Die natürliche Variabilität von Wind und solarer Einstrahlung verursacht Schwankungen in Stromnetzen mit hoher regenerativer Durchdringung. Diese Herausforderung kann durch (1) Speichertechnologien, (2) das Vorhalten von Reserveleistung, (3) spezialisierte Wettervorhersagen oder durch eine Kombination dieser Ansätze gelöst werden [5]. Für Zeiträume von mehreren Stunden bis mehreren Tagen liefern numerische Wettermodelle diese Vorhersagen (Numerical Weather Predictions – NWP). Prognosen für die nächsten Stunden werden aus Satellitenbeobachtungen gewonnen. Durch fehlende zeitliche und räumliche Auflösung sind Satelliten nicht in der Lage, Verschattungen einzelner Solarkraftwerke vorherzusagen [6,7]. Diese Lücke wird von Kamera-basierten Vorhersagesystemen geschlossen.

Im Rahmen der hier vorgestellten Promotion werden solche Kamera-basierten Vorhersage-Systeme (Nowcasting-Systeme) entwickelt, validiert und verglichen. Die entwickelten Systeme können in (1) Wolkenkamera-basiert und (2) Schattenkamera-basiert eingeteilt werden.

Wolkenkamera-basierte Nowcasting-Systeme

Die WobaS-Produktfamilie umfasst mehrere Wolkenkamera-basierte Nowcasting-Systeme. Als Wolkenkameras werden Standard-Überwachungskameras eingesetzt, welche alle 30 Sekunden ein 360° Bild des Himmels aufnehmen. Abbildung 1 (links) zeigt eine der Wolkenkameras im kommerziellen Solarkraftwerk La Africana (CSP, 50 MW) sowie eine Wolkenkamera in einer Photovoltaik-Anlage (Mitte). In Abbildung 1 (rechts) ist ein Beispielbild einer Wolkenkamera dargestellt.

Abbildung 1 Links: Wolkenkamera im kommerziellen Solarkraftwerk La Africana, Spanien. Mitte: Wolkenkamera vor einer Photovoltaik-Anlage in Tabernas, Spanien. Rechts: Beispielbild einer Wolkenkamera.

In den aufgenommenen Bildern werden Wolken erkannt und modelliert, ihre Geschwindigkeiten, Transmittanzen und Höhen abgeleitet und anschließend räumlich (5m*5m) und zeitlich (30s) hochaufgelöste Einstrahlungskarten für die nächsten 15 Minuten erzeugt (Abbildung 2). Diese Einstrahlungskarten unterstützen Kraftwerksführer [5,7] oder können automatisiert eingesetzt werden um Rampen-Regulierungen durch aktive Steuerung einzuhalten (Ramp rate regulations, [8,9,10]). In Photovoltaik-Batterie-Hybrid-Kraftwerken können Wolkenkamera-Systeme zu einer längeren Lebenszeit kritischer Komponenten beitragen [5].

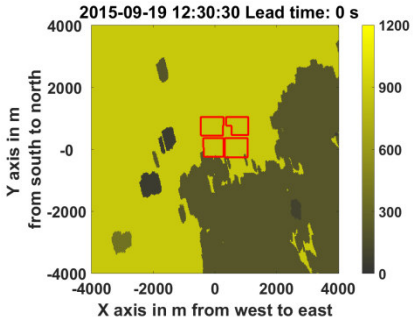


Abbildung 2 Räumlich aufgelöste Einstrahlungskarte [W/m^2]. In rot sind die Umrisse des La Africana Kraftwerks dargestellt.

Flaggschiff der WobaS-Produktfamilie ist WobaS-4cam, welches vier Wolkenkameras nutzt, in drei Standorten operativ eingesetzt wird und über eine Ausgründung kommerziell erhältlich ist [11,12]. WobaS-4cam wurde im Rahmen dieser Promotion zur Marktreife geführt. Zusätzlich wurden WobaS-2cam Systeme neu entwickelt sowie mehrere Ein-Kamera-Systeme.

Die Validierung und der Vergleich verschiedener Ansätze und Systeme ist zentraler Bestandteil dieser Arbeit. Für die Validierungen werden erstmalig räumliche und zeitliche Aggregations-Effekte berücksichtigt [5,6,7,13,14,15], welche in Solarkraftwerken inhärent auftreten. Ferner wurden Validierungssysteme entwickelt um Teilmodule individuell zu testen (z.B. Validierung der Wolkenerkennung [5,13], Validierung der Wolkenhöhe [16], Validierung des Wolken-Trackings [17]). Die

entwickelte Validierungsmethodik ermöglicht zielgerichtete inkrementelle Verbesserungen des untersuchten Gesamtsystems. Durch den Vergleich verschiedener Ansätze wird ferner das Nowcasting-System mit dem besten Genauigkeit/Kosten-Verhältnis bestimmt.

Schattenkamera-basierte Nowcasting-Systeme

Im Rahmen der hier vorgestellten Promotion wurde ein weltweit einmaliges Schattenkamera-System finalisiert und validiert [6]. Das Schattenkamera-System nutzt sechs auf einem Turm (Abbildung 3 links) platzierte Standard-Überwachungskameras (Abbildung 3, Mitte), welche zeitlich synchron alle 15 Sekunden je ein Bild des umliegenden Bodens aufnehmen (Abbildung 3 rechts). Diese sechs Kamerabilder werden in ein sogenanntes Orthobild umgerechnet (Abbildung 4 links). Das Orthobild hat eine räumliche Auflösung von 5m*5m und bildet eine Fläche von 2km*2km ab. Im Orthobild werden Schatten erkannt (Abbildung 4, Mitte) und Einstrahlungskarten abgeleitet (Abbildung 4 rechts).

Abbildung 3 Links: Turm (ca. 90 m) in der Wüste von Tabernas, auf welchem das Schattenkamera-Systeme installiert ist. Mitte: Eine der sechs Schattenkameras. Genutzt werden Standard-Überwachungskameras. Rechts: Beispielbild einer Schattenkamera.

Die so gewonnenen räumlich aufgelösten Einstrahlungskarten werden genutzt um Wolkenkamera-basierte Nowcasting-Systeme unter Berücksichtigung von räumlichen Aggregations-Effekten zu validieren [5,13,14,15,18,19]. Im Rahmen dieser Promotion wird zurzeit ein Schattenkamera-basiertes Nowcasting-System entwickelt. Erste Validierungen deuten an [6], dass Schattenkameras verlässlicher als Wolkenkameras Verschattungen von Solarkraftwerken vorhersagen können.

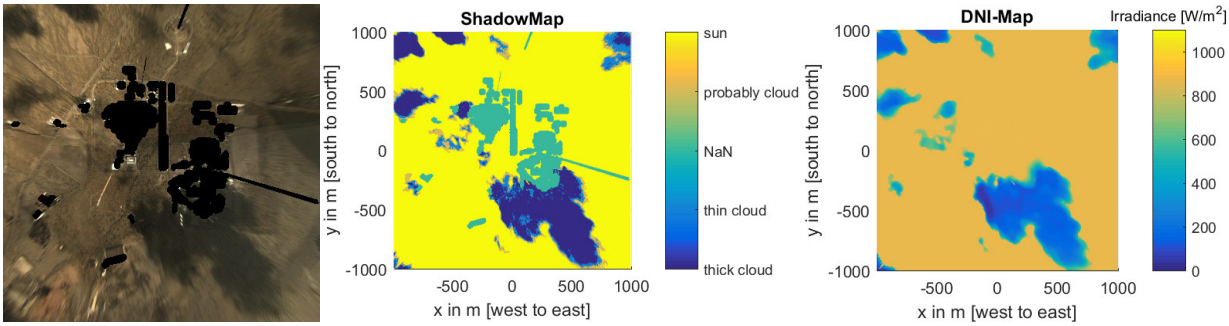


Abbildung 4 Links: Ein aus sechs Schattenkamera-Bildern errechnetes Orthobild mit 5m*5m räumlicher und 15s zeitlicher Auflösung. Mitte: Erkannte Wolkenschatten. Rechts: Berechnete räumlich aufgelöste Einstrahlungskarte.

Abbildung 5 veranschaulicht eine weitere zentrale Anwendung von Schattenkameras. Aus den Messungen einer Schattenkamera können Wolkenbewegungs-Vektoren (Richtung und

Geschwindigkeit) abgeleitet werden [16,17] (Abbildung 5 links). Solche Referenzmessungen waren bisher nicht verfügbar und sind essentiell wichtig zur Validierung numerischer Wettermodelle, Satellitenvorhersagen, Nowcasting-Systemen und spezieller Sensoren. Das entwickelte Verfahren misst darüber hinaus die anderweitig schwer zugänglichen Windgeschwindigkeiten auf Wolkenhöhe. Neben mehreren Nowcasting-Systemen konnte bereits ein Cloud Speed Sensors (Abbildung 5 Mitte und rechts) validiert werden [17].

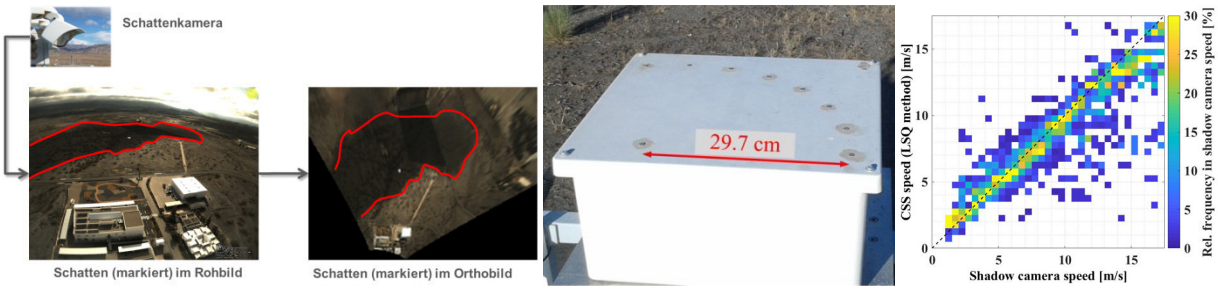


Abbildung 5 Links: Aus den Messungen einer Schattenkameras können Wolkenbewegungs-Vektoren abgeleitet werden. Wolkenbewegungs-Vektoren sind wichtig zur Validierung numerischer Wettermodelle, Satellitenvorhersagen, Nowcasting-Systemen und spezieller Sensoren wie dem Cloud Speed Sensor (Mitte). Rechts: Validierungsergebnisse des Cloud Speed Sensors im Vergleich zu Schattenkamera-Messungen.

Städte zwischen Grid und God Parity

Mit Grid Parity (auch: Socket Parity) wird der Moment bezeichnet, ab welchem Photovoltaik Strom unterhalb des Netzstrom-Preises erzeugen kann [20, S.61]. Tritt Grid Parity ein, entscheiden sich Verbraucher für Energie-Autarkie. Da die Kosten des Netzbetriebs nicht im gleichen Maße reduziert werden können, steigen die Stromtransportkosten pro Verbraucher. Hierdurch wird Netzstrom im Vergleich zur Eigenproduktion teurer, was mehr Verbraucher zur Eigenproduktion bewegt. Die Folge ist eine sich selbst verstärkende Spirale der Netz-Flucht. Grid Parity ist in einigen Regionen, z.B. in Spanien [20, S.30] bereits erreicht und wird voraussichtlich in mehreren weiteren Ländern in naher Zukunft erreicht werden [21,22].

Der Begriff God Parity (Gottgleichheit) wurde von Tony Seba geprägt [23]. Bei God Parity sinken die Kosten des lokal erzeugten Photovoltaik-Stroms inklusive Speicherung unter die Kosten des Strom-Transportes (exklusive der Kosten der Strom-Erzeugung). God Parity bedeutet das Ende der klassischen zentralen Stromerzeugung. Ort und Zeitpunkt, an welchem God Parity zuerst erreicht wird, lassen sich zurzeit nur abschätzen.

Industrialisierte Städte stellen große Verbraucher dar, die ihren Strombedarf nicht ausschließlich auf ihrer Fläche mit Wind und Sonne decken können. Daher sind sowohl Grid Parity (Ausdünnung der Stromnetze) und God Parity (Ende gewarteter Stromnetze) Bedrohungen für urbane Ballungsräume. Eine mögliche Reaktion sind große, gut angebundene Wind- und Solarparks, welche Transport-günstig nahe an den Städten liegen. Diese durch Dezentralisierung der Stromproduktion verursachte Zentralisierung benötigt im besonderen Maße die spezialisierten Wettervorhersagen, welche in dieser Promotion optimiert werden.

Quellen

1. Graves, L., "Record low bids submitted for Abu Dhabi's 350MW solar plant in Sweihan", 2016-09-19, The National, online verfügbar: https://www.thenational.ae/business/record-low-bids-submitted-for-abu-dhabi-s-350mw-solar-plant-in-sweihan-1.213135.
2. Mahapatra, S., "Lowest-Ever Solar Price Bid (2.42¢/kWh) Dropped In Abu Dhabi By JinkoSolar & Marubeni Score", 2016-09-20, Clean Technica, online verfügbar: https://cleantechnica.com/2016/09/20/lowest-ever-solar-price-bid-2-42%C2%A2kwh-dropped-abu-dhabi-jinkosolar-marubeni-score/.
3. Schleicher-Tappeser, R., "How renewables will change electricity markets in the next five years", In Energy Policy, Volume 48, 2012, Pages 64-75, ISSN 0301-4215, https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.04.042.
4. Fanone, E., et al., "The case of negative day-ahead electricity prices", Energy Economics 35 (2013): 22-34. https://doi.org/10.1016/j.eneco.2011.12.006.
5. Kuhn, P., et al., "Validation of an All Sky Imager based nowcasting system for industrial PV plants", EUPVSEC 2017, Progress in Photovoltaics (2017), under review.
6. Kuhn, P., et al., "Shadow camera system for the generation of solar irradiance maps", Solar Energy (2017), https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.05.074.
7. Kuhn, P., et al., "All-sky imager based ramp rate prediction for PV", Artikel des Monats Juni 2017, Sun&Wind Energy, online verfügbar: http://www.sunwindenergy.com/content/sky-imager-based-ramp-rate-prediction-pv.
8. Lave, M., et al., "Simulated PV power plant variability: Impact of utility-imposed ramp limitations in Puerto Rico", 2013 IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Tampa, FL, 2013, pp. 1817-1821. doi: 10.1109/PVSC.2013.6744495.
9. Chen, X., et al., "Forecasting based power ramp-rate control for PV systems without energy storage", 2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEC 2017 - ECCE Asia), Kaohsiung, 2017, pp. 733-738. doi: 10.1109/IFEEC.2017.7992130.
10. Marcos, J., et al., "Storage requirements for PV power ramp-rate control", In Solar Energy, Volume 99, 2014, Pages 28-35, ISSN 0038-092X, https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.10.037.
11. Wilbert, S. et al., "Solarforscher demonstrieren neues Kürzestfrist-Vorhersagesystem für Solarstrahlung in einem 50-Megawatt Solarkraftwerk", Webseite des Instituts für Solarforschung (DLR), 2017-01-10, online verfügbar: http://www.dlr.de/sf/en/desktopdefault.aspx/tabid-10436/20662_read-48274/.
12. CSP Services WobaS-Produktbroschüre, „WobaS – Nowcasting System", online verfügbar: http://www.cspservices.de/media/csps/CSPS_DLR_Forecasting_1705.pdf.
13. Kuhn, P., et al., "Bewertung von Wolkenkamerabasiertem Nowcasting der Solarstrahlung", Vortrag 4. Fachtagung Energiemeteorologie, 2016-04-22, online verfügbar: https://www.uni-oldenburg.de/fileadmin/user_upload/physik/ag/ehf/enmet/download/fachtagung_2016/2016_04_22/1_20160422_Kuhn.pdf.
14. Kuhn, P., et al., "Shadow camera system for the validation of nowcasted plant-size irradiance maps", Vortrag European Meteorological Society Annual Meeting 2017, Dublin, 2017-09-06, online verfügbar: https://presentations.copernicus.org/EMS2017-271_presentation.pdf, Abstract online verfügbar: http://meetingorganizer.copernicus.org/EMS2017/EMS2017-271.pdf.
15. Kuhn, P., et al., "Validation of an all-sky imager based nowcasting system for industrial PV plants", Vortrag EUPVSEC 2017, Amsterdam, 2017-09-28.
16. Kuhn, P., et al., "Benchmarking three low-cost, low-maintenance cloud height measurement systems and ECMWF cloud heights", Solar Energy (2017), under review.
17. Kuhn, P., et al., "Field validation and benchmarking of a cloud shadow speed sensor", Solar Energy (2017), under review.
18. Kuhn, P.; et al., "Validation of nowcasted spatial DNI maps", DNIcast Deliverable 4.1, online verfügbar: http://www.dnicast-project.net/.
19. Kuhn, P., et al. "Validation of Spatially Resolved All Sky Imager Derived DNI Nowcasts", AIP Conference Proceedings, 2017, http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4984522.
20. TRENDS 2016 IN PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS, Survey Report of Selected IEA Countries between 1992 and 2015, Photovoltaic Power Systems Programme, Report IEA PVPS T1-30:2016, ISBN 978-3-906042-45-9, online verfügbar: www.iea-pvps.org.
21. Ramírez-Sagner, G., et al. "Economic feasibility of residential and commercial PV technology: The Chilean case", Renewable Energy 111 (2017): 332-343, https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.011.
22. Karneyeva, Y., et al., "Solar feed-in tariffs in a post-grid parity world: The role of risk, investor diversity and business models", Energy Policy 106 (2017): 445-456, https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.04.005.
23. Seba, Tony, "How to Lose $40 Trillion",2014-06-23, online verfügbar: https://tonyseba.com/how-to-lose-40-trillion/ (Stand 2017-10-05).

Development and benchmarking of camera based nowcasting systems

Pascal Kuhn, Pascal.Kuhn@dlr.de

Solar short-term variability

The stability of electricity grids with high penetrations of renewable energies is challenged by the variable nature of local solar and wind resources. Intra-hour variability of the solar irradiance is mainly caused by transient clouds, which are hard to predict with satellite based forecasting systems.

Fig. 2: All-sky imager of the WobaS-4cam system in the commercial power plant La Africana (50 MW_e), Spain.

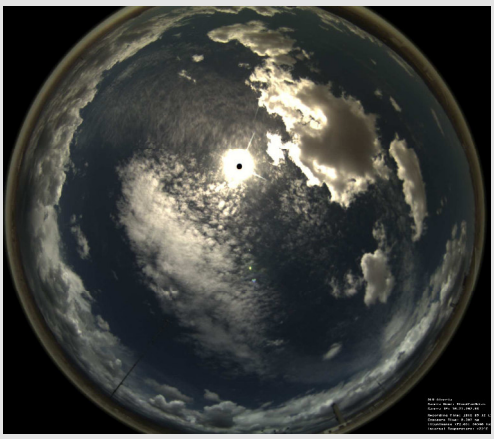


Fig. 3: Example all-sky image showing clouds at various heights.

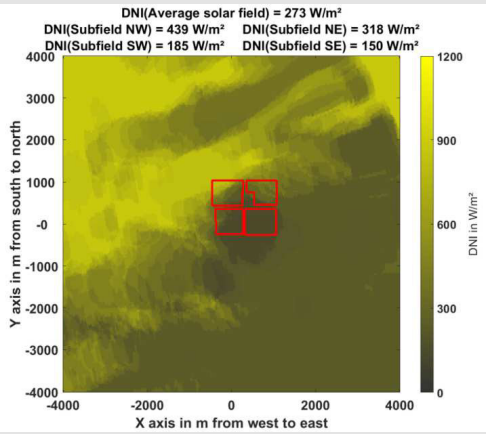


Fig. 4: Example nowcasted irradiance map as derived from WobaS-4cam. The red areas in the center mark the subfields of the La Africana plant.

Fig. 1: Left: Scattered cumulus clouds cause frequent ramps on a photovoltaic plant. Right: Partially shaded Andasol plants (150 MW_e, southern Spain).

WobaS nowcasting systems

All-sky imager (Fig. 2) based nowcasting systems provide shortest-term forecasts ('nowcasts') for the next 15 min. Within this PhD thesis, several nowcasting systems achieved market readiness (WobaS product family). These commercially available nowcasting systems use the input of 1, 2, 3 or 4 all-sky imagers (Fig. 2, Fig. 3) to derive irradiance maps in high spatial and temporal resolutions (Fig. 4). These maps help to optimize plant or grid operations. WobaS nowcasting systems are currently operational at two at solar test facilities and at the commercial power plant La Africana, Spain. A system based on more than 30 all-sky imagers will be installed in April 2018 in Germany.

Shadow cameras

Downward-facing shadow cameras (Fig. 5) are used in newly developed systems to derive reference irradiance maps and reference cloud (shadow) motion vectors. With these reference data, nowcasting systems, satellite forecasts and other sensors are validated. Shadow cameras can furthermore act as nowcasting systems themselves, having distinct advantages and disadvantages in comparison to all-sky imager based systems.

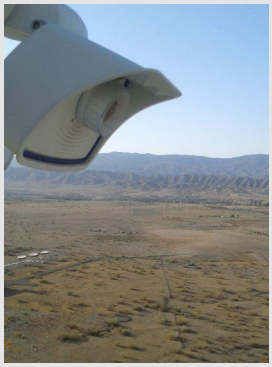


Fig. 5: Shadow camera

Validations and benchmarks

Within this PhD thesis, a validation and benchmarking framework was developed to find the best cost-to-accuracy ratio regarding system configurations and software approaches (Fig. 6). The individually most suitable approach depends on the specific intended applications.

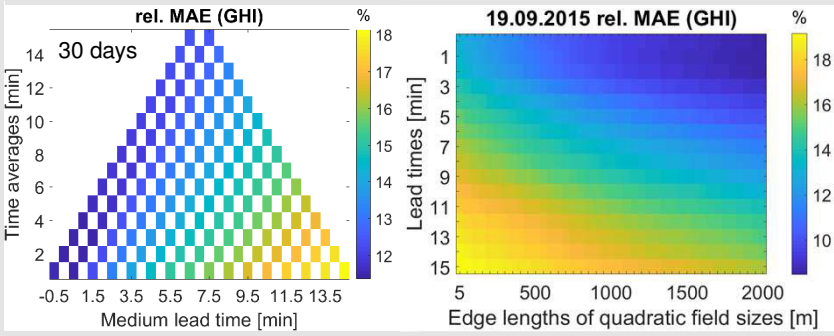


Fig. 6: For the validation of nowcasted irradiance maps, special focus is given to temporal (left) and spatial (right) aggregation effects, which significantly reduce forecasting deviations.

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
German Aerospace Center

Pascal Kuhn
Pascal.Kuhn@dlr.de
Institute of Solar Research
Plataforma de Almería, 04200 Tabernas, Spain