

Meilinger, Stefanie et al.

Working Paper

Development of innovative satellite-based methods for improved PV yield prediction on different time scales for distribution grid level applications (MetPVNet)

IZNE Working Paper Series, No. 21/4

Provided in Cooperation with:

Bonn-Rhein-Sieg University of Applied Sciences, International Centre for Sustainable Development (IZNE)

Suggested Citation: Meilinger, Stefanie et al. (2021) : Development of innovative satellite-based methods for improved PV yield prediction on different time scales for distribution grid level applications (MetPVNet), IZNE Working Paper Series, No. 21/4, ISBN 978-3-96043-094-0, Hochschule Bonn-Rhein-Sieg, Internationales Zentrum für Nachhaltige Entwicklung (IZNE), Sankt Augustin,
<https://doi.org/10.18418/978-3-96043-094-0>

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/264892>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.

Development of innovative satellite-based methods for improved PV yield prediction on different time scales for distribution grid level applications (MetPVNet)

Entwicklung innovativer satellitengestützter Methoden zur verbesserten PV-Ertragsvorhersage auf verschiedenen Zeitskalen für Anwendungen auf Verteilnetzebene (MetPVNet)

Stefanie Meilinger, Anna Herman-Czezuch, Nicola Kimiaie, Christopher Schirrmeister, Rone Yousif, Stefan Geiss, Leonhard Scheck, Martin Weissmann, Felix Gödde, Bernhard Mayer, Tobias Zinner, James Barry, Klaus Pfeilsticker, Markus Kraiczy, Kevin Winter, Abdullah Altayara, Christian Reise, Mariella Rivera, Hartwig Deneke, Jonas Witthuhn, Jethro Betcke, Marion Schroedter-Homscheidt, Philipp Hofbauer, Bernhard Rindt



Development of innovative satellite-based methods for improved PV yield prediction on different time scales for distribution grid level applications (MetPVNet)

Entwicklung innovativer satellitengestützter Methoden zur verbesserten PV-Ertragsvorhersage auf verschiedenen Zeitskalen für Anwendungen auf Verteilnetzebene (MetPVNet)

Stefanie Meilinger¹, Anna Herman-Czezuch¹, Nicola Kimiaie¹, Christopher Schirrmeister¹, Rone Yousif¹, Stefan Geiss², Leonhard Scheck², Martin Weissmann², Felix Gödde³, Bernhard Mayer³, Tobias Zinner³, James Barry⁴, Klaus Pfeilsticker⁴, Markus Kraicz⁵, Kevin Winter⁵, Abdullah Altayara⁵, Christian Reise⁶, Mariella Rivera⁶, Hartwig Deneke⁷, Jonas Witthuhn⁷, Jethro Betcke⁸, Marion Schroedter-Homscheidt⁸, Philipp Hofbauer⁹, Bernhard Rindt⁹

¹ Hochschule Bonn-Rhein-Sieg, Internationales Zentrum für Nachhaltige Entwicklung (Projektleitung) ²Ludwig-Maximilians-Universität München, Deutscher Wetterdienst Offenbach, Hans-Ertel Zentrum für Wetterforschung

³Ludwig-Maximilians-Universität München, Meteorologisches Institut München

⁴Universität Heidelberg, Institut für Umweltphysik

⁵Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik

⁶Fraunhofer Institut für Solare Energie Systeme ISE

⁷Leibniz Institute für Troposphärenforschung

⁸Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Vernetzte Energiesysteme

⁹egrid application & consulting GmbH

Kontakt: stefanie.meilinger@h-brs.de

ISBN 978-3-96043-094-0 (Working Paper 21/4)

DOI 10.18418/978-3-96043-094-0 (Working Paper 21/4)

IZNE Working Paper Series

ISSN 2511-0861

Bonn-Rhein-Sieg University of Applied Sciences
International Centre for Sustainable Development (IZNE)

Grantham-Allee 20

53757 Sankt Augustin / Germany

izne.info@h-brs.de

www.izne.h-brs.de

Dieses Working Paper umfasst eine Kurzfassung des Abschlussberichtes, der im Rahmen des Forschungsprojektes „Entwicklung innovativer satellitengestützter Methoden zur verbesserten PV-Ertragsvorhersage auf verschiedenen Zeitskalen für Anwendungen auf Verteilnetzebene (MetPVNet)“ verfasst wurde.

Das Vorhaben MetPVNet wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) unter dem Förderkennzeichen 0350009A-G gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Die Vollversion des Schlussberichtes ist über den Publikationsserver der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg abrufbar: <https://doi.org/10.18418/opus-5955>

Abstract - English

In the research project "MetPVNet", both, the forecast-based operation management in distribution grids and as well as the forecasts of the feed-in of PV-power from decentralized plants could be improved on the basis of satellite data and numerical weather forecasts. Based on a detailed network analyses for a real medium-voltage grid area, it was shown that both – the integration of forecast data based on satellite and weather data and the improvement of subsequent day forecasts based on numerical weather models – have a significant added value for forecast-based congestion management or redispatch and reactive power management in the distribution grid. Furthermore, forecast improvements for the forecast model of the German Weather Service were achieved by assimilating visible satellite imagery, and cloud and radiation products from satellites were improved, thus improving the database for short-term forecasting as well as for assimilation. In addition, several methods have been developed that will enable forecast improvement in the future, especially for weather situations with high cloud induced variability and high forecast errors. This article summarizes the most important project results.

Keywords: *Distribution grid management, photovoltaics, generation forecast, satellite products, numerical weather prediction, radiation, cloud parameters, reflectance, COD, AOD, radiation variability, spectral influence, Si reference cells, inversion, energy meteorology*

Abstract - Deutsch

Im Rahmen des Forschungsprojektes „MetPVNet“ konnten sowohl die prognosebasierte Betriebsführung in Verteilnetzen als auch die Erzeugungsprognose von dezentralen PV-Anlagen auf der Basis von Satellitendaten und Numerischer Wettervorhersage verbessert werden. Anhand detaillierter Netzanalysen für ein reales Mittelspannungsnetzgebiet konnte gezeigt werden, dass sowohl die Einbindung von Prognosedaten auf Basis von Satelliten und Wetterdaten, als auch die Verbesserung von Folgetagsprognosen auf der Basis numerischer Wettermodelle einen deutlichen Mehrwert für ein prognosebasiertes Engpassmanagement bzw. Redispatch und Blindleistungsmanagement im Verteilnetz aufweisen. Darüber hinaus wurden Prognoseverbesserungen für das Vorhersagemodell des Deutschen Wetterdienstes durch die Assimilation von sichtbaren Satellitenbildern erreicht, sowie Wolken- und Strahlungsprodukte aus Satelliten verbessert und somit die Datenbasis für die Kurzfristprognose als auch für die Assimilation. Darüber hinaus wurden verschiedene Methoden entwickelt, die zukünftig eine Prognoseverbesserung, insbesondere für Wettersituationen mit hoher wolkenbedingter Strahlungsvariabilität und hohen Prognosefehlern, ermöglichen. In diesem Artikel werden dies wichtigsten Projektergebnisse zusammengefasst.

Schlagwörter: *Verteilnetzbetriebsführung, Photovoltaik, Erzeugungsprognose, Satellitenprodukte, numerische Wettervorhersage, Strahlung, Wolkenparameter, Reflektanz, COD, AOD, Strahlungsvariabilität, Spektraler Einfluss, Si-Referenzzellen, Inversion, Energiemeteorologie*

Table of Contents - Inhaltsverzeichnis

1. Introduction.....	1
2. Summary.....	2
2.1. Improvements in the operational management of distribution grids through the integration of forecasts (WP5)	2
2.2. Improved satellite products for cloud parameters and radiation (WP1).....	3
2.3. Improvements in global irradiance forecasts from weather models (WP2)	3
2.4. Improved modelling of cloud-induced irradiance variability (WP3a).....	4
2.5. Influence of spectral irradiance variability on PV performance (WP3b).....	5
2.6. Development of methods for ground-based irradiance measurements (WP4).....	6
2.7. Improvement of data availability through the data set of the MetPVNet measurement campaigns	7
3. Conclusion and outlook	8
1. Einleitung	10
2. Zusammenfassung	11
2.1. Verbesserungen technische Betriebsführung von Verteilnetzen durch Einbindung von Prognosen.....	11
2.2. Verbesserte Satellitenprodukte für Wolkenparameter und Strahlung	12
2.3. Verbesserungen der Globalstrahlungsvorhersagen aus Wettermodellen.....	12
2.4. Verbesserte Modellierung der bewölkungsbedingten Strahlungsvariabilität.....	13
2.5. Einfluss der spektralen Strahlungsvariabilität auf die PV-Leistung	14
2.6. Entwicklung von Methoden für bodenbasierte Strahlungsmessungen.....	15
2.7. Verbesserung der Datenbasis durch den Datensatz der MetPVNet Messkampagnen	17
3. Fazit und Ausblick.....	17

1. Introduction

By 2050, the share of renewable energy sources in Germany is expected to increase to 80% of gross electricity consumption as part of the energy transition. This requires a more effective adaptation of grid operation to the increased weather dependency of electricity feed-in to the grid. In particular, the decentralized feed-in of electricity from photovoltaic systems poses new challenges for distribution grid operators in terms of grid expansion, grid operation and market integration. Improved forecasts of the weather-dependent variability of PV feed-in are an important determinant for the energy market and, for example, also for the provision of balancing power and for the implementation of redispatch measures, especially in transmission system operation. Therefore, they have direct economic consequences. In addition, the application of improved PV forecasts is becoming increasingly relevant for distribution grid operation due to the decentralization of the generation landscape and new regulatory developments, such as the integration of decentralized generation plants into a uniform redispatch process (Redispatch 2.0) and the intended market-based procurement of non-frequency-related system services, such as voltage regulation or the provision of reactive power. The aim of the joint project MetPVNet was therefore to (further) develop innovative energy meteorological methods for satellite-based forecasts of irradiance and PV power at plant level, and to work out their added value for distribution grid operation. To this end, work was carried out on improving various components of the overall model chain, with a focus on improved prediction of the cloud-dependent variability of radiation fields and PV power. In the following, the main project results are summarized.

The summary is organized as follows: First, chapter 2.1 discusses the improvements achieved in the technical operation management of distribution grids by incorporating forecasts. Then, the improvements achieved with respect to satellite products for cloud parameters and radiation (chapter 2.2) and global radiation forecasts based on weather models (chapter 2.3) are presented in detail. Improvements in radiation variability modeling and investigations of the influence of radiation variability on PV performance follow (Chapters 2.4 and 2.5). The validation of the achieved improvements is based on an improved database of ground-based radiation measurements, which was made possible on the one hand by the development of new methods for ground-based radiation measurements (Chapter 2.6) and on the other hand by the implementation of two measurement campaigns (Chapter 2.7). The full version of the final report is available on the publication server of the Bonn-Rhein-Sieg University of Applied Sciences: <https://doi.org/10.18418/opus-5955> .

2. Summary

2.1. Improvements in the operational management of distribution grids through the integration of forecasts (WP5)

The benefit of forecasts for distribution grid operation was assessed using the example of the local distribution grid in Ursulasried, which is part of the area managed by AllgäuNetz GmbH. Network congestion management, redispatch and reactive power management were identified as relevant use cases in distribution network operation. In order to assess the benefit of improved feed-in forecasts, the effect of forecasts and forecast improvements on these use cases was evaluated. Forecasts with different forecast quality were used: in addition to so-called "case day" (CharDF) forecasts, short-term forecasts (SIDF) and standard day ahead forecasts (SDAF), the effect of forecast improvements of about 10 % and 20 % (ADAF10 and ADAF20) was investigated, for the subsequent day and for the entire PV system fleet. Within the different work packages in MetPVNet, the project partners estimated an improvement of the radiation forecasts of the order of 10 % to be realistic. For distribution grid operation, it was shown that:

- For vertical power flow forecasts at high-voltage/medium-voltage substations, forecast improvements over the entire power range of PV feed-in are relevant.
- An improved next-day forecast or shorter forecast horizons have considerable savings potential for plan-value or forecast-based grid congestion management in distribution grid areas with high PV feed-in power. This is revealed by a reduction of ad-hoc grid congestion measures and/or a reduction of unnecessarily planned redispatch measures of the generation plants. In addition, it was shown that situations with broken cloud cover are particularly relevant for the investigated use case of grid congestion with high PV feed-in.
- Improved PV forecasts lead to relevant improvements in the reactive power flexibility forecast for PV systems that have cosphi actuating capability, and improved PV forecasts for heavily cloudy situations are of particular importance for the reactive power flexibility forecast of PV systems with VDE-AR-N 4110 actuating capability.

From a distribution grid operation perspective, the areas requiring further research and development by the energy meteorology community were specified by identifying weather situations (case days) that pose a particular challenge for grid congestion and reactive power management.

The situations identified (broken cloud cover, continuous but inhomogeneous cloud cover, multi-layered cloud cover) were used as a guideline by the project partners in order to assess the improvements that could be achieved by the satellite-, weather-, model-, and novel inversion-based methods developed in the MetPVNet project.

2.2. Improved satellite products for cloud parameters and radiation (WP1)

The broadband HRV channel of the Meteosat satellite was combined with other spectral channels to achieve a higher spatial resolution, and two of the implemented methods show a significant improvement over the SEVIRI standard resolution. A validation of the method for those cloud cover situations critical for distribution network operation (case days, described above) showed that for situations with high variability, a reduction of the deviation between ground-based and satellite measurements of about 10 percent can be achieved by making use of the HRV channel. For cases with low cloud cover variability, this improvement is significantly lower, and could even lead to an increased error. Longer averaging times reduce the influence of the spatial and temporal resolution of the observations, which conversely means that the improved satellite products are particularly suitable for applications that require high temporal resolution.

A comparison with the improved APOLLO_NG/Heliosat-4 radiation measurements at seven BRSN stations shows a significant reduction of the systematic deviation. In addition, within the framework of MetPVNet, work was carried out on improving the algorithm used in CAMS to determine the COD for thin and broken clouds, thus reducing the overestimation of the GHI for those clouds. As expected, the greatest improvements are found in cloudier situations (variability classes 6 to 8) and these dominate the very encouraging result. In contrast, a slight deterioration is observed in classes 3 and 4 with optically thin clouds. These improvements have meanwhile been operationally implemented in version 4 of the CAMS Radiation Service and are available to all users free of charge as open data in the European Copernicus programme, as of June 2021.

2.3. Improvements in global irradiance forecasts from weather models (WP2)

The largest source of error for irradiance forecasts based on NWP models are errors in the simulated clouds. In order to improve irradiance predictions, either one can reduce systematic errors in the modelled clouds themselves or on the other hand one can reduce random errors in the cloud cover by assimilating cloud information. In WP2, visible satellite images were used to detect and reduce cloud errors. For this purpose, the forward operator VISOP developed at HErZ was adapted to and optimised for the NWP model ICON, and additional options for ground albedo and cloud effective radii were implemented. In order to detect systematic errors in the modelled clouds, synthetic satellite images for several weeks of ICON forecasts were calculated with different model and operator settings and compared with observations. VISOP was integrated into the DWD data assimilation cycle, assimilation experiments were calculated for the period of the 2019 measurement campaign and the corresponding irradiance predictions were evaluated.

An investigation of the systematic errors showed that visible satellite images provide previously unavailable information on deficits in the simulated clouds and can thus contribute to the further

development of NWP models. The methods developed in WP2 are currently being used at the DWD and have already led to improvements in the models of ice clouds. By assimilating visible satellite images, errors in the spatial distribution and in the water content of the clouds could be significantly reduced and these improvements were to an extent still present in the forecasts after 24h. Significant improvements were also achieved in the radiation forecasts: the error in global irradiance could be reduced by up to 30% after one hour of forecasting and the reduction in error is still measurable the next day. In this way, both intra-day and day-ahead radiation forecasts are improved.

2.4. Improved modelling of cloud-induced irradiance variability (WP3a)

Forecasting irradiance variability based on a random forest model: Numerical weather models are indispensable for producing PV yield forecasts. However, for reasons of available computing capacity, their spatial resolution is only about 2 km, the model output is available at intervals of at least 15 minutes, but in most cases only hourly, and a 1D radiation scheme is used to calculate the irradiance. For these reasons, the actual variability of solar irradiance at the PV system scale, which is relevant for grid stability among other things, cannot be represented by the weather model. The variability index according to Kleissl et al. (2013), which is based on temporal differences of the normalised GHI, was used as a measure for sub-grid-scale variability of the GHI. Subsequently, a random forest model was selected to search for relevant variables among 80 model parameters of the weather model COSMO-D2, which contain information about the small-scale variability. The standard deviation of the direct solar irradiance within 5x5 grid points in the vicinity of the measurement site was identified as the feature with the highest information content. Other important features are the mean cloud cover of low clouds, as well as the zonal wind speed at 250 hPa and 500 hPa. For the prediction of variability based on COSMO-DE, the ten most important features were considered.

A validation of the predicted variability with measurements from the MetPVNet measurement campaigns shows that a rather low variability prevailed during the measurement campaigns, which is especially the case in very clear and completely overcast weather situations. This pattern is correctly reproduced by the random forest overall, although a slightly positive bias can be seen for very small values of the variability index. For a variability index of more than 0.1, the sign of the bias changes and the variability is underestimated overall. The RMSE of the predictions is around 0.04. Thus, the method provides promising results for the prediction of small-scale irradiance variability, which will further improve in quality in the future, especially with larger training data sets.

Analysis of irradiance variability on the basis of variability classes: Two methods were further developed for deriving hourly variability classes. Firstly, a method that derives the variability class from one minute resolved ground-based direct irradiance measurements and, secondly, a method

based on satellite-based observations of cloud structures. The latter will in the future allow for the estimation of variability classes even for locations or periods for which no ground-based radiation measurements are available. It could be shown within the project that the classification results of this method can be used for the assessment of radiation forecasts for Redispatch 2.0 in distribution grids.

Furthermore, it was investigated to what extent a class-dependent bias correction of the satellite-based irradiance data and a quantification of the expected variability is possible. An analysis of the class-dependent relative deviation between ground-observed GHI and CAMS v3.2 radiation data during the MetPVNet measurement campaigns shows that in the case of small variability classes the local irradiance on the ground is underestimated by a few percent on average, while in the case of optically thick clouds there is a strong overestimation of more than 30% on average for the higher variability classes. As expected, the variability increases with increasing cloud cover and class. This means that as far as possible, both a variability estimation and a bias correction based on satellite data should in future be carried out, depending on the cloud class. A corresponding method for this was developed within the framework of MetPVNet and applied to individual case days.

2.5. Influence of spectral irradiance variability on PV performance (WP3b)

Model chain for calculating spectrally-dependent PV power: In order to investigate the influence of the variability of the atmospheric composition (including the water vapour column) on the PV power, a suitable model was created as part of the project. The model is based on an electrical circuit with diode(s) and is spectrally resolved via the spectral dependence of the photocurrent. Validation experiments showed that the model performs better than a comparable broadband PV model. As an example, the model was used to calculate the influence of water vapour on PV performance for two different technologies (polycrystalline and amorphous silicon). In the future, the model can be used to determine the spectral influence of atmospheric composition or soil albedo on different PV technologies and silicon reference cells.

Spectral influence of ground albedo: In order to investigate the effect of spectral albedo on the PV yield as realistically as possible, radiative transfer simulations were carried out with the 3D model MYSTIC, which on the one hand directly simulates the irradiance on an inclined surface and on the other hand integrates spatially resolved spectral albedo or BRDF data. The influence of the spectral BRDF compared to a constant albedo was quantified via the relative spectral factor for the two PV technologies mentioned above. It could be shown that the deviation between BRDF and constant albedo for both technologies is relatively constant throughout the day in the cloudy case, while there is a pronounced diurnal variation on clear days. While the deviation for polycrystalline modules reaches its highest values in the morning and evening hours, it decreases for amorphous modules towards the end of the day. In general, the influence of the wavelength-dependent ground albedo

increases for polycrystalline silicon with the inclination of the module, while it decreases for amorphous silicon.

In summary, it can be said that taking into account the actual spectral reflectivity of the earth's surface leads to significant deviations in the expected output and thus also the expected yield of PV systems compared to the assumption of a constant albedo. This effect should therefore be considered not only in future forecast models, but also in the interpretation of irradiance measurements with silicon-based pyranometers.

2.6. Development of methods for ground-based irradiance measurements (WP4)

Correction procedure for Si reference cells: The measured values of pyranometers and silicon reference cells differ due to several influencing factors: temperature dependence, dependence on the angle of incidence, spectral response and possible (long-term) deviations in calibration. In the context of MetPVNet, in addition to empirical corrections derived from correlations between the measured values of both sensor types, analytical corrections known from previous studies are also used. The correction algorithm was developed by Fraunhofer ISE.

The result of the correction algorithm is a robust conversion procedure for the measured values of silicon sensors. Applying the correction procedure to data from the MetPVNet measurement campaign shows that significant improvements in the measurement accuracy of the Si reference cell for clear days (cf. reference day 7.5.2018) can be achieved. However, the analysis of the case day 21.09.2018 also makes it clear that the application of the correction to measurements during cloudy conditions still needs to be investigated in more detail. In this case the angular and spectral response correction do not appear to work equally well for every atmospheric condition. This finding is consistent with the results described above on the spectral influence of ground albedo.

Irradiance and atmospheric optical parameters inferred from PV systems: In WP3 and WP4, the software package PV2RAD was developed to infer global irradiance and optical properties of the atmosphere, in particular cloud optical depth (COD) and aerosol optical depth (AOD), from current and/or power data of photovoltaic systems. The software package consists of calibration software that employs non-linear optimisation to determine the relevant system-specific parameters using PV measurements on clear days and radiative transfer simulations, and (if possible) to compare them with ground truth values. Furthermore, the package includes data acquisition software to integrate ground-based as well as weather model, aerosol and satellite data into the inversion procedure. For the derivation of the AOD, the so-called AERosol Importance Sampling (AERIS) method was newly incorporated into MYSTIC. In addition, DISORT-based lookup tables for the derivation of cloud optical depth and a lookup table for the conversion of tilted (GTI) to horizontal (GHI) global irradiance under broken cloud cover were developed.

It was shown that the methods developed allow the corresponding parameters (AOD, COD and

GHI) to be determined from electricity and power data of PV systems. A comparison with AOD data from AERONET shows that the method works in principle. However, in this case using the DC current measurement of a PV system yields better results than using the AC power. There is generally good agreement, except for large solar zenith angles. The CODs derived from PV systems and pyranometers agree well at high COD. Since the LUTs used for this purpose were developed for homogeneous cloud cover, the results are not quite as good at low COD and decreasing cloud cover (broken cloud cover). A comparison with CODs from satellite data (MSG SEVIRI), on the other hand, makes it clear that, as expected, the COD from satellite and ground data differs significantly, especially on days with multilayer cloud cover. The comparison of global irradiance derived from PV system data with GHI measurements with secondary standard pyranometers also shows that the methods developed for inferring irradiance and deriving atmospheric optical parameters using PV systems work very well. This will make it possible in the future to establish a PV system-based measurement network for irradiance and atmospheric parameters. The optical quantities obtained in this way could be jointly assimilated in weather models in the future in order to further improve the forecasts for distribution grid operation.

2.7. Improvement of data availability through the data set of the MetPVNet measurement campaigns

As part of MetPVNet, two measurement campaigns were carried out in autumn 2018 and summer 2019. At over 20 locations in the Kempten area in Allgäu, Germany, power and DC current measurements were carried out on PV systems synchronously with pyranometer measurements of both the inclined and horizontal global irradiance. These measurements were supplemented by measurements at two master stations, one on the roof of the Kempten University of Applied Sciences and one at the PV Park Veits, where further high-quality measurement equipment was used.

Both the pyranometer measurement network in Kempten as well as the development of methods for widespread PV system and reference cell-based measurement networks have large potential for the evaluation of day ahead forecasts. In future, it will be possible to validate the day ahead forecasts of a wide variety of forecasting methods both against a single measurement of individual master stations and against the mean value of spatially distributed measurements with Si pyranometers and PV systems. This campaign data set will thus enable a more reliable and practically relevant validation of irradiance and PV production forecasts in the future. The project will have this effect well beyond its project duration.

3. Conclusion and outlook

The overall objective of the present project was to improve the forecast-based operation management of distribution grids. This was to be achieved by an improved generation forecast of decentralised PV plants on the basis of satellite data and numerical weather forecasts. Both objectives could be fulfilled within the framework of MetPVNet:

On the one hand, detailed network analyses for a real medium-voltage grid area showed that both the integration of forecast data based on satellites and weather data and the improvement of next-day forecasts based on numerical weather models have clear added value for forecast-based congestion management or redispatch and reactive power management in the distribution grid. Short-term forecasts based on satellite data also have a positive effect. Another important added value of the project is the feedback of critical forecast situations from the point of view of the use cases, so that, as already shown in the project and beyond, forecasts can be designed and optimised more specifically for the specific application in distribution grid operation.

On the other hand, improvements to the forecast model of the German Weather Service were achieved through the assimilation of visible satellite images. Furthermore, cloud and radiation products from satellites were improved and through this also the data basis for both short-term forecasts as well as data assimilation.

In addition, various methods were developed that could lead to further forecast improvements in the future, especially for weather situations with high forecast errors. Such situations were identified from the perspective of grid operation and with the help of satellite-based analyses of the overall weather situation for the periods of the MetPVNet measurement campaigns. In particular, these were situations with heavy or very changeable cloud cover.

For the MetPVNet measurement campaigns, the deviation of the near-surface irradiance from satellite data or radiation forecasts was quantified on the basis of a training data set and depending on the variability class. In the future, this type of information will offer the possibility of evaluating the forecast quality.

It is expected that the methods developed within the framework of MetPVNet for determining small-scale irradiance variability will lead to further forecast improvements in the future. For example, the random forest method for variability forecasting provides promising results for the Kempten area. However, in order to separate general forecast errors from the uncertainty of the variability forecast and to make the method applicable for the whole of Germany, it would be necessary in future to apply the method to much more extensive data sets.

Of course, in the future one could also assimilate the observations of global irradiance on the ground itself into weather models. However, due to the small number of DWD radiation

measurements (approx. 100), the influence on the forecasts is not expected to be significant. This deficit of ground-based measurements of global irradiance for assimilation into weather models could, however, be overcome in the future by adding the current yield data or the inferred global irradiance of a network of PV plants. The improved understanding of spectral influences should in this future context also be taken more into account. In particular, the assimilation of irradiance inferred from the DC current of PV systems seems to be advantageous for an improved forecast. The assimilation of irradiance data obtained in this way should definitely be further developed in the future.

1. Einleitung

Bis 2050 soll im Rahmen der Energiewende der Anteil der erneuerbaren Energieträger in Deutschland auf 80 % des Bruttostromverbrauchs ansteigen. Dies erfordert eine effektivere Anpassung des Netzbetriebs an die erhöhte Wetterabhängigkeit der Stromeinspeisung ins Netz. Insbesondere die dezentrale Einspeisung von Strom aus Photovoltaikanlagen stellt die Verteilnetzbetreiber vor neue Herausforderungen hinsichtlich des Netzausbaus, des Netzbetriebs und der Marktintegration. Verbesserte Prognosen der wetterabhängigen Variabilität der PV-Einspeisung sind eine wichtige Determinante für den Energiemarkt und zum Beispiel auch für Erbringung von Regelleistung und für die Durchführung von Redispatchmaßnahmen insbesondere im Übertragungsnetzbetrieb. Sie haben daher direkte wirtschaftliche Konsequenzen. Darüber hinaus erreicht die Anwendung von verbesserten PV Prognosen durch die Dezentralisierung der Erzeugungslandschaft und die neuen regulatorischen Entwicklungen, wie zum Beispiel die Einbindung dezentraler Erzeugungsanlagen in einen einheitlichen Redispatch Prozeß (Redispatch 2.0) und die angestrebte marktgestützte Beschaffung von nicht frequenzgebundenen Systemdienstleistungen, wie der Spannungsregelung bzw. die Blindleistungsbereitstellung, zunehmend auch für den Verteilnetzbetrieb eine hohe Relevanz. Ziel des Verbundprojektes MetPVNet war es daher, innovative energiemeteorologische Methoden zu satellitenbasierten Vorhersagen von Einstrahlung und PV-Leistung auf Anlagenebene (weiter-)zu entwickeln, und deren Mehrwert für den Verteilnetzbetrieb herauszuarbeiten. Hierzu wurde an einer Verbesserung verschiedenster Komponenten der Gesamtmodellkette gearbeitet, wobei der Fokus auf der verbesserten Vorhersage der bewölkungsabhängigen Variabilität von Strahlungsfeldern und PV-Leistung lag. Im Folgenden werden die wichtigsten Projektergebnisse zusammenfassend dargestellt. Die Zusammenfassung ist folgendermaßen strukturiert: Zunächst wird in Kapitel 2.1 auf die erreichten Verbesserungen in der technischen Betriebsführung von Verteilnetzen durch Einbindung von Prognosen eingegangen. Danach werden die erreichten Verbesserungen im Hinblick auf Satellitenprodukte für Wolkenparameter und Strahlung (Kapitel 2.2) und Globalstrahlungsvorhersagen auf Basis von Wettermodellen (Kapitel 2.3) detailliert dargestellt. Verbesserungen in der Modellierung der Strahlungsvariabilität und Untersuchungen zum Einfluss der Strahlungsvariabilität auf die PV-Leistung folgen (Kapitel 2.4 und 2.5). Die Validierung der erreichten Verbesserungen basiert auf einer verbesserten Datenbasis an bodenbasierten Strahlungsmessungen, die zum einen durch die Entwicklung neuer Methoden für bodenbasierte Strahlungsmessungen (Kapitel 2.6) und durch die Durchführung von zwei Messkampagnen (Kapitel 2.7) ermöglicht wurde. Die Vollversion des Schlussberichtes ist über folgende Adresse abrufbar: <https://doi.org/10.18418/opus-5955> .

2. Zusammenfassung

2.1. Verbesserungen technische Betriebsführung von Verteilnetzen durch Einbindung von Prognosen

Im Rahmen von MetPVNet wurde am Beispiel des Netzgebietes Ursulasried der AllgäuNetz GmbH untersucht, welchen Mehrwert Prognosen für den Verteilnetzbetrieb haben können. Als relevante Anwendungsfälle im Verteilnetzbetrieb wurden das Netzengpassmanagement bzw. Redispatch und das Blindleistungsmanagement identifiziert. Um den Mehrwert verbesserter Einspeiseprognosen für diese Anwendungsfälle zu beurteilen, wurde der Effekt von Prognosen und Prognoseverbesserungen auf diese Anwendungsfälle untersucht. Dabei kamen Prognosen mit unterschiedlicher Prognosequalität zum Einsatz: Neben einer Vorhersage nach sog. „Typtagen“ (CharDF), Kurzfristprognosen (SIDF) und Standard-Folgetagprognosen (SDAF), wurde der Einfluss von Prognoseverbesserungen für den Folgetag und die gesamte PV-Anlagenflotte mit etwa 10 % und 20 % untersucht (ADAF10 und ADAF20). Von den Projektpartnern wurde im Rahmen der verschiedenen Arbeitspakete in MetPVNet eine Verbesserung der Strahlungsprognosen in der Größenordnung von 10 % als realistisch abgeschätzt. Für den Verteilnetzbetrieb konnte gezeigt werden, dass

- für die vertikalen Leistungsflussprognosen am Hochspannungs-/ Mittelspannungs-Umspannwerk Prognoseverbesserung über den gesamten Leistungsbereich der PV-Einspeisung relevant sind,
- eine verbesserte Folgetagprognose bzw. kürzere Prognosehorizonte einen erhebliches Einsparpotenzial für ein planwert- bzw. prognosebasiertes Netzengpassmanagement in Verteilnetzgebieten mit hoher PV-Einspeiseleistung aufweisen. Dies zeigt sich in einer Reduzierung von Ad-hoc Netzengpassmaßnahmen und/ oder einer Reduzierung von unnötig geplanten Redispatchmaßnahmen der Erzeugungsanlagen. Zudem wurde gezeigt, dass für den untersuchten Anwendungsfall mit Netzengpässen bei hoher PV-Einspeisung Situationen mit durchbrochener Bewölkung besonders relevant sind,
- verbesserte PV-Prognosen die Blindleistungsflexibilitätsprognose für PV-Anlagen mit cosphi-Stellfähigkeit relevant verbessern können und verbesserte PV-Prognosen für stark bewölkte Situationen für die Blindleistungsflexibilitätsprognose der PV-Anlagen mit VDE-AR-N 4110 Stellfähigkeit von besonderer Bedeutung sind.

Aus Sicht des Verteilnetzbetriebs wurde der Entwicklungsbedarf für die Energiemeteorologie-Community präzisiert, indem Wettersituationen (Falltage) identifiziert wurden, die eine besondere Herausforderung für Netzengpass- und Blindleistungsmanagement darstellen.

Die identifizierten Situationen (durchbrochene Bewölkung, durchgängige aber inhomogene

Bewölkung, mehrschichtige Bewölkung) wurden im Laufe des Projektes als Orientierung verwendet, um die Verbesserungen zu beurteilen, die durch die im Rahmen von MetPVNet erreichten Verbesserungen der satellitenbasierten Prognose und durch die neu entwickelten energie-meteorologischen Methoden erreicht werden konnten.

2.2. Verbesserte Satellitenprodukte für Wolkenparameter und Strahlung

Der breitbandige HRV-Kanal wurde mit weiteren spektralen Kanälen kombiniert, um so eine höhere räumliche Auflösung von Meteosat zu erreichen. Zwei der implementierten Verfahren zeigt eine erhebliche Verbesserung gegenüber der SEVIRI-Standardauflösung. Die Validierung der erreichten Verbesserungen für kritische Bewölkungssituationen im Sinne des Verteilnetzbetriebs (Falltage) zeigt, dass sich für Situationen mit hoher Variabilität durch die Nutzung des HRV-Kanals eine Reduzierung der Abweichungen mit Bodenmessungen um etwa 10 Prozent erreichen lässt. Für Fälle mit geringer Variabilität der Bewölkung fällt die erreichte Verbesserung deutlich geringer aus (bis hin zu einer Verschlechterung). Durch längere Mittelungszeiten reduziert sich der Einfluss der räumlichen und zeitlichen Auflösung der Beobachtungen, was im Umkehrschluss bedeutet, dass die erreichten Verbesserungen sich insbesondere für Anwendungen mit der Notwendigkeit einer hohen Zeitauflösung eignen.

Ein Vergleich mit den verbesserten APOLLO_NG/Heliosat-4 Strahlungsmessungen an sieben BRSN Stationen zeigt eine deutliche Reduktion der systematischen Abweichung. Darüber hinaus wurde im Rahmen von MetPVNet an der Verbesserung des im Rahmen CAMS genutzten Algorithmus zu Bestimmung der COT für dünne und durchbrochene Wolken gearbeitet. Hierdurch konnte die Überschätzung der GHI für diese Wolken reduziert werden. Die größten Verbesserungen werden erwartungsgemäß in den stärker bewölkten Situationen (Variabilitätsklassen 6 bis 8) gefunden und diese dominieren das sehr positive Ergebnis. In den Klassen 3 und 4 mit optisch dünnen Wolken wird dagegen eine leichte Verschlechterung beobachtet. Die Verbesserungen wurden mittlerweile im CAMS Strahlungsservice v4 operativ implementiert und stehen seit Juni 2021 allen Nutzern kostenfrei als „open data“ des europäischen Copernicus-Programms zur Verfügung.

2.3. Verbesserungen der Globalstrahlungsvorhersagen aus Wettermodellen

Die größte Fehlerquelle für auf NWV-Modellen basierenden Strahlungsvorhersagen sind Fehler in den Modellwolken. Zur Verbesserung der Strahlungsvorhersagen kann man einerseits durch Modellverbesserungen systematische Fehler in den Modellwolken reduzieren, und andererseits durch das Assimilieren von Wolkeninformationen zufällige Fehler in der Bewölkung verringern. In AP2 wurden sichtbare Satellitenbilder genutzt, um Wolkenfehler zu detektieren und zu reduzieren. Dafür wurde der in HERZ entwickelte Vorwärtsoperator VISOP an das NWV-Modell ICON angepasst, optimiert und es wurden zusätzliche Optionen für die Bodenalbedo und die Wolken-Effektivradien

implementiert. Um systematische Fehler in den Modellwolken zu erkennen, wurden synthetische Satellitenbilder für mehrwöchige ICON-Vorhersagen mit unterschiedlichen Modell- und Operatoreinstellungen gerechnet und mit den Beobachtungen verglichen. VISOP wurde in den Datenassimilationszyklus des DWD integriert und es wurden Assimilationsexperimente für den Zeitraum der Messkampagne 2019 gerechnet und darauf basierende Strahlungsvorhersagen evaluiert.

Die Untersuchungen zu den systematischen Fehlern haben gezeigt, dass sichtbare Satellitenbilder bisher nicht verfügbare Informationen über Defizite in den Modellwolken liefern und damit einen Beitrag zur Weiterentwicklung von NWV-Modellen leisten können. Die in AP2 entwickelten Verfahren werden derzeit am DWD genutzt und haben schon zu Verbesserungen in den Eiswolken geführt. Durch das Assimilieren von sichtbaren Satellitenbildern konnten Fehler in der räumlichen Verteilung und im Wassergehalt der Wolken deutlich reduziert werden und diese Verbesserungen waren in den Vorhersagen teilweise auch noch nach 24h vorhanden. Auch in den Strahlungsvorhersagen konnten starke Verbesserungen erzielt werden. Der Fehler in der Globalstrahlung ist nach einer Vorhersagestunde bis zu 30% reduziert und auch am nächsten Tag gibt es noch messbare Verbesserungen. Somit werden sowohl intra-day als auch day-ahead Strahlungsvorhersagen verbessert.

2.4. Verbesserte Modellierung der bewölkungsbedingten Strahlungsvariabilität

Prognose der Strahlungsvariabilität auf Basis eines Random Forest Modells: Zur Erstellung von PV-Ertragsprognosen sind numerische Wettermodelle unverzichtbar. Aus Gründen der verfügbaren Rechenkapazität beträgt deren räumliche Auflösung jedoch nur ca. 2 km, der Modelloutput steht in Abständen von mindestens 15 Minuten, meist aber stündlich zur Verfügung und zur Berechnung der Einstrahlung wird ein 1D-Strahlungsschema verwendet. Aus diesen Gründen kann die tatsächliche Variabilität der solaren Einstrahlung auf der PV-Anlagen-Skala, welche unter anderem für die Netzstabilität relevant ist, nicht vom Wettermodell abgebildet werden. Als Maß für Sub-Gridskalige Variabilität der GHI wurde der Variabilitätsindex nach Kleissl et al. (2013) herangezogen, der auf zeitlichen Differenzen der normierten GHI basiert. Anschließend wurde ein Random Forest Modell herangezogen, um unter 80 Modellparametern des Wettermodells COSMO-D2 nach relevanten Variablen gesucht, die Informationen über die kleinskalige Variabilität enthalten. Hierbei wurde die Standardabweichung der solaren Direktstrahlung innerhalb von 5x5 Gitterpunkten in der Umgebung des Messortes als das Feature mit dem höchsten Informationsgehalt identifiziert. Weitere wichtige Features sind der mittlere Bedeckungsgrad niedriger Wolken, sowie die zonale Windgeschwindigkeit in 250 hPa und 500 hPa. Für die Vorhersage der Variabilität auf Basis von COSMO-DE wurden die zehn wichtigsten Features berücksichtigt.

Eine Validierung der prognostizierten Variabilität mit Messungen aus den MetPVNet

Messkampagnen zeigt, dass während der Messkampagnen eine eher geringe Variabilität vorherrschte, was insbesondere bei sehr klaren und vollständig bedeckten Wettersituationen der Fall ist. Dieses Muster wird vom Random Forest insgesamt korrekt wiedergegeben, wobei ein leicht positiver Bias bei sehr kleinen Werten für den Variabilitätsindex auszumachen ist. Bei einem Variabilitätsindex von mehr als 0,1 ändert sich das Vorzeichen des Bias und die tatsächliche Variabilität wird insgesamt unterschätzt. Der RMSE der Vorhersagen liegt bei rund 0,04. Damit liefert die Methode vielversprechende Resultate für die Prognose der kleinskaligen Strahlungsvariabilität, welche insbesondere durch größere Trainingsdatensätze in Zukunft weiter an Qualität gewinnen werden.

Analyse der Strahlungsvariabilität auf Basis von Variabilitätsklassen: Zur Ableitung stündlicher Variabilitätsklassen wurden zwei Methoden weiterentwickelt: Zum einen ein Verfahren, das die Variabilitätsklasse aus 1-min aufgelösten bodenbasierten Direktstrahlungsmessungen ableitet und zum anderen ein Verfahren, das auf satelliten-basierten Beobachtungen der Wolkenstrukturen basiert. Letzteres erlaubt die Abschätzung der Variabilitätsklassen zukünftig auch für Standorte oder Zeiträume für die keine bodenbasierten Strahlungsmessungen vorliegen. Es konnte im Rahmen des Projektes gezeigt werden, dass die Klassifizierungsergebnisse dieser Methode für die Beurteilung von Strahlungsvorhersagen für Redispatch 2.0 in Verteilnetzen eingesetzt werden können.

Darüber hinaus wurde untersucht, inwieweit eine klassenabhängige Bias-Korrektur der satellitenbasierten Strahlungsdaten und eine Quantifizierung der zu erwartenden Variabilität möglich ist. Eine Analyse der klassenabhängigen relativen Abweichung zwischen bodenbeobachteter GHI zu CAMS v3.2 Strahlungsdaten während der MetPVNet Messkampagnen zeigt, dass im Falle kleiner Variabilitätsklassen die lokale Strahlung am Boden im Mittel um wenige Prozent unterschätzt wird, während es bei optisch dicken Wolken für die höheren Variabilitätsklassen im Mittel zu einer starken Überschätzung von über 30% kommt. Die Variabilität wächst erwartungsgemäß mit zunehmender Bewölkung und Klasse. Dies bedeutet, dass sowohl eine Variabilitätsabschätzung als auch eine BIAS Korrektur anhand der Satellitendaten in Zukunft möglichst wolkenklassenabhängig vorgenommen werden sollte. Eine entsprechende Methode wurde im Rahmen von MetPVNet entwickelt und auf einzelne Falltage angewendet.

2.5. Einfluss der spektralen Strahlungsvariabilität auf die PV-Leistung

Modellkette zur Berechnung der spektralabhängigen PV-Leistung: Um den Einfluss der Variabilität der atmosphärischen Zusammensetzung (u.a. der Wasserdampfsäule) auf die PV-Leistung zu untersuchen, wurde im Rahmen des Projektes ein dafür geeignetes Modell erstellt. Das Modell basiert auf einem elektrischen-Schaltkreis mit Diode(n) und wird über die spektrale Abhängigkeit des Fotostroms spektral aufgelöst. Validierungsexperimente konnten zeigen, dass das Modell besser performt als eine vergleichbares Breitband PV-Modell. Beispielhaft wurde mithilfe des Modells der

Einfluss von Wasserdampf auf die PV-Leistung für zwei verschiedene Technologien (polykristallines und amorphes Silizium) berechnet. Zukünftig kann das Modell eingesetzt werden, um den spektralen Einfluss der atmosphärischen Zusammensetzung oder der Bodenalbedo auf unterschiedliche PV Technologien und Silizium-Referenzzellen zu bestimmen.

Spektraler Einfluss der Bodenalbedo: Um den Effekt spektraler Albedo auf den PV-Ertrag möglichst realitätsnah zu untersuchen wurden Strahlungstransportsimulationen mit dem 3D-Modell MYSTIC durchgeführt, die einerseits die Einstrahlung auf eine geneigte Oberfläche direkt simulieren und andererseits räumlich aufgelöste spektrale Albedo bzw. BRDF Daten einbinden. Dabei wurde der Einfluss der spektralen BRDF gegenüber einer konstanten Albedo über den Relativen Spektralen Faktor für die beiden oben genannten PV Technologien quantifiziert. Es konnte gezeigt werden, dass die Abweichung zwischen BRDF und konstanter Albedo für beide Technologien im bewölkten Fall über den Tag verteilt relativ konstant ist, während es an klaren Tagen einen ausgeprägten Tagesgang gibt. Während hier die Abweichung für polykristalline Module in den Morgen- und Abendstunden ihre höchsten Werte erreichen, nehmen sie für amorphe Module zu den Tagesrandzeiten hin ab. Generell gilt, dass der Einfluss der wellenlängenabhängigen Bodenalbedo für polkristallines Silizium mit der Neigung des Moduls zunimmt, während sie für amorphes Silizium abnimmt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Berücksichtigung der tatsächlichen spektralen Reflektanz der Erdoberfläche zu signifikanten Abweichungen in der zu erwartenden Leistung und damit auch dem erwarteten Ertrag von PV Anlagen gegenüber der Annahme einer konstanten Albedo führt. Dieser Effekt sollte daher in zukünftigen Prognosemodellen aber auch in der Interpretation von Strahlungsmessungen mit Silizium-Pyranometern berücksichtigt werden.

2.6. Entwicklung von Methoden für bodenbasierte Strahlungsmessungen

Korrekturverfahren für Si-Referenzzellen: Die Messwerte von Pyranometern und Silizium-Referenzzellen unterscheiden sich aufgrund mehrerer Einflussfaktoren: Temperaturabhängigkeit, Abhängigkeit vom Einfallswinkel, Spektralantwort und mögliche (langfristige) Abweichungen in der Kalibrierung. Im Rahmen von MetPVNet kommen neben empirischen Korrekturen, die aus Korrelationen zwischen den Messwerten beider Sensortypen abgeleitet wurden, auch analytische Korrekturen zum Einsatz, die aus früheren Studien bekannt sind. Der Korrekturalgorithmus wurde vom Fh ISE entwickelt.

Das Ergebnis des Korrekturalgorithmus ist ein robustes Umrechnungsverfahren für die Messwerte von Siliziumsensoren. Bei der Anwendung des Korrekturverfahrens auf Daten der MetPVNet Messkampagne zeigt, dass hierdurch deutliche Verbesserung der Messgenauigkeit der Si-Referenzzelle für die klaren Tage (vgl. Referenztag 7.5.2018) erreicht werden können. Die Analyse des Falltags (21.9.2018) macht aber auch deutlich, dass die Anwendung der Korrektur auf die

Messungen bei Bewölkung noch näher untersucht werden muss. Hierbei scheinen die Winkel- und Spektralantwortkorrektur nicht bei jeder atmosphärischen Bedingung gleichermaßen gut zu funktionieren. Dieser Befund deckt sich mit den oben beschriebenen Ergebnissen zum spektralen Einfluss der Bodenalbedo.

Strahlungsmessung und Ableitung atmosphärischer Parameter mithilfe von PV-Anlagen: Im Rahmen von MetPVNet wurde das Softwarepaket *PV2RAD* entwickelt, um aus Strom- oder Leistungsdaten von Photovoltaikanlagen die Globalstrahlung sowie optische Eigenschaften der Atmosphäre, insbesondere die Wolken optische Dicke (COD) und die Aerosol optische Dicke (AOD), abzuleiten. Das Softwarepaket besteht aus einer Kalibrationssoftware, um mithilfe von klaren Tagen und Strahlungstransport Simulationen die relevanten Anlagenspezifischen Parameter mithilfe nichtlinearer Optimierung zu bestimmen und – wenn möglich – mit Ground-Truth Werten zu vergleichen (Anlagenkalibration). Darüber hinaus enthält das Paket eine Datenerfassungssoftware, um sowohl bodenbasierte Daten als auch Wettermodell-, Aerosol- und Satellitendaten in das Inversionsverfahren einzubinden. Für die Ableitung der AOD wurde das sogenannte AERosol Importance Sampling (AERIS) neu in MYSTIC eingebaut. Außerdem wurden DISORT Lookup Tabellen für die Ableitung der Wolken optischen Dicke sowie eine Lookup Tabelle zur Umrechnung von geneigter (GTI) in horizontale (GHI) Globalstrahlung bei durchbrochener Bewölkung.

Es konnte gezeigt werden, dass entwickelten Methoden es erlauben, die entsprechenden Parameter (AOD, COD und GHI) aus Strom- bzw. Leistungsdaten von PV-Anlagen zu ermitteln. So zeigt ein Vergleich mit AERONET Daten der AOD, dass die Methode prinzipiell funktioniert. Bessere Ergebnisse erzielt allerdings ein Verfahren, das statt der AC-Leistung die DC-Strommessung einer PV-Anlage nutzt. Außer bei hohen Sonnenzenitwinkeln findet sich hier eine gute Übereinstimmung. Vergleicht man die aus der PV-Anlage und Pyranometer abgeleiteten CODs, so stimmen diese bei hoher COD gut überein. Da die hierfür verwendeten LUTs für homogene Bewölkung entwickelt wurden, sind die Ergebnisse bei kleiner COD und abnehmendem Bedeckungsgrad (durchbrochene Bewölkung) nicht ganz so gut. Ein Vergleich mit CODs aus Satellitendaten (MSG SEVIRI) hingegen macht deutlich, dass sich insbesondere an Tagen mit mehrschichtiger Bewölkung die COD aus Satelliten- und Bodendaten erwartungsgemäß deutlich unterscheidet. Auch der Vergleich von aus PV-Anlagendaten abgeleiteten Globalstrahlung mit GHI Messungen mit Secondary-Standard-Pyranometern zeigt, dass die im Rahmen von MetPVNet entwickelten Methoden zur Strahlungsmessung und Ableitung atmosphärischer Parameter mithilfe von PV-Anlagen sehr gut zu funktionieren. Hierdurch wird es in Zukunft möglich werden, ein PV-Anlagen-basiertes Messnetz für Strahlung und atmosphärische Parameter aufzubauen. Die so gewonnenen optischen Größen könnten zukünftig in Wettermodellen gemeinsam assimiliert werden, um hierdurch die Prognose für den Verteilnetzbetrieb noch weiter zu verbessern.

2.7. Verbesserung der Datenbasis durch den Datensatz der MetPVNet Messkampagnen

Im Rahmen von MetPVNet wurden zwei Messkampagnen im Herbst 2018 und Sommer 2019 durchgeführt. An über 20 Standorten im Großraum Kempten im Allgäu wurden Leistungs- und DC-Strommessungen an PV-Anlagen synchron mit Pyranometermessungen der geneigten und horizontalen Globalstrahlung durchgeführt. Ergänzt wurden diese Messungen durch Messungen an zwei Masterstationen, eine auf dem Dach der Hochschule Kempten und eine am PV-Park Veits, an denen weiteres hochwertiges Messequipment zum Einsatz kam.

Für die Bewertung von Folgetagsprognosen ist der Wert des Pyranometer-Messnetzes in Kempten sowie die Entwicklung von Methoden zum Ausbau flächendeckender PV-Anlagen- und Referenzzellen-basierter Messnetze als sehr hoch einzuschätzen. In Zukunft wird es möglich sein, die Folgetagsprognosen verschiedenster Vorhersageverfahren sowohl gegen eine Einzelmessung einzelner Masterstationen als aber auch gegen den Mittelwert räumlich verteilter Messungen mit Si-Pyranometern und PV-Anlagen zu validieren. Damit wird mit Hilfe dieses Kampagnendatensatzes in Zukunft eine zuverlässigere und für die Praxis relevantere Validierung von Einstrahlungs- und PV-Produktionsprognosen ermöglicht. Diese Wirkung wird das Projekt deutlich über seine Projektlaufzeit hinaus entfalten.

3. Fazit und Ausblick

Übergeordnetes Ziel des vorliegenden Projektes war es, die prognosebasierte Betriebsführung in Verteilnetzen zu verbessern, dies sollte erreicht werden durch eine verbesserte Erzeugungsprognose von dezentralen PV-Anlagen auf der Basis von Satellitendaten und Numerischer Wettervorhersage. Beide Ziele konnten im Rahmen von MetPVNet erfüllt werden:

Zum einen konnte anhand detaillierter Netzanalysen für ein reales Mittelspannungsnetzgebiet gezeigt werden, dass sowohl die Einbindung von Prognosedaten auf Basis von Satelliten und Wetterdaten, als auch die Verbesserung von Folgetagsprognosen auf der Basis numerischer Wettermodelle einen deutlichen Mehrwert für ein prognosebasiertes Engpassmanagement bzw. Redispatch und Blindleistungsmanagement im Verteilnetz aufweisen. Auch Kurzfristprognosen auf der Basis von Satellitendaten haben einen positiven Effekt. Ein weiterer wichtiger Mehrwert des Projektes ist auch die Rückmeldung der kritischen Prognosesituationen aus Sicht der Anwendungsfälle, so dass wie bereits im Projekt gezeigt und darüber hinaus, Prognosen zielgerichteter auf die Anwendung im Verteilnetzbetrieb ausgelegt und optimiert werden können. Zum anderen konnten Prognoseverbesserungen für das Vorhersagemodell des Deutschen Wetterdienstes durch die Assimilation von sichtbaren Satellitenbildern erreicht werden. Darüber hinaus wurden Wolken- und Strahlungsprodukte aus Satelliten verbessert und somit die Datenbasis

für die Kurzfristprognose als auch für die Assimilation.

Darüber hinaus wurden verschiedene Methoden entwickelt, die zukünftig zu einer weiteren Prognoseverbesserung, insbesondere für Wettersituationen mit hohen Prognosefehlern, führen könnten. Solche Situationen wurden aus Sicht des Netzbetriebs und mithilfe von satellitenbasierten Analysen der Gesamtwetterlage für die Perioden der MetPVNet Messkampagnen identifiziert. Hierbei handelte es sich insbesondere um Situationen mit starker oder stark wechselhafter Bewölkung.

Für die MetPVNet Messkampagnen wurde auf der Basis eines Trainingsdatensatzes und in Abhängigkeit der Variabilitätsklasse die Abweichung der bodennahen Einstrahlung von Satellitendaten oder von Strahlungsprognosen quantifiziert. Diese Art der Informationen bietet zukünftig die Möglichkeit zur Bewertung der Prognosegüte.

Es ist zu erwarten, dass die im Rahmen von MetPVNet entwickelten Methoden zur Bestimmung der kleinskaligen Strahlungsvariabilität zukünftig zu weiteren Prognoseverbesserung führen werden. So liefert die im Rahmen von MetPVNet entwickelte Random-Tree-Methode zur Variabilitätsprognose vielversprechende Ergebnisse für den Raum Kempten. Um jedoch generelle Vorhersagefehler von der Unsicherheit der Variabilitätsvorhersage zu trennen und die Methode für ganz Deutschland anwendbar zu machen, wäre es zukünftig erforderlich, die Methode auf wesentlich umfangreichere Datensätze anzuwenden.

Natürlich könnte man zukünftig auch die Beobachtungen der Globalstrahlung am Boden selbst in Wettermodellen assimilieren. Wegen der geringen Anzahl von DWD-Strahlungsmessungen (ca. 100) ist jedoch kein starker Einfluss auf die Vorhersagen zu erwarten. Dieses Defizit an Bodenmessungen der Globalstrahlung zur Assimilation der Wettermodelle könnte jedoch durch die Hinzunahme der aktuellen Ertragsdaten bzw. der abgeleiteten Globalstrahlung eines Netzes von PV-Anlagen in Zukunft verriert werden. Das verbesserte Verständnis spektraler Einflüsse sollte hierbei zukünftig stärker berücksichtigt werden. Insbesondere die Assimilation der aus DC-Strom von PV-Anlagen abgeleiteten Strahlung scheint für eine verbesserte Prognose vorteilhaft zu sein. Die Assimilation der so gewonnenen Strahlungsdaten sollte in Zukunft unbedingt weiterentwickelt werden.