

Wie PV-Freiflächenanlagen den Bodenwasserhaushalt verändern – Begleitforschung im größten Solarpark Deutschlands

Ulrike Feistel, Susanna Kettner, Jakob Ebermann, Fabian Müller, Stefan Werisch

Zusammenfassung

Als Antwort auf die Diskrepanz zwischen der weltweit steigenden Anzahl großer Photovoltaik-Freiflächenanlagen (PV-FFA) und dem geringen Wissenstand, was deren Einfluss auf die Umwelt betrifft, begann das Team Ingenieurhydrologie der HTW Dresden 2017 mit seinen Untersuchungen. Die ersten Ergebnisse an der 164 ha großen PV-FFA in Weesow-Wilmersdorf werden im Kontext der Voruntersuchungen an einer PV-FFA sowie zwei Lysimetern diskutiert, die zeigten, dass es durch Überdeckung und Beschattung von Bodenflächen zu Veränderungen im Bodenwasserhaushalt kommt. Eine wesentliche Rolle spielt dabei die Reduzierung der Evapotranspiration, die sich im Verlauf der Bodenfeuchte widerspiegelt. So wurden auf der PV-FFA in Boxberg im Mittel von acht Trockenperioden zwischen April 2019 und April 2020 die niedrigsten Bodenfeuchtwerte auf der Referenzfläche beobachtet, während unter den Modulen und zwischen den Modulreihen eine höhere Bodenfeuchte auftrat.

1. Einleitung

Im Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) 2021 verpflichtet sich Deutschland, seinen Stromversorgungssektor bis 2050 CO₂-emissionsfrei umzugestalten (Bundesrat, 2020). In dem Anfang April 2022 vom Bundeskabinett verabschiedeten Osterpaket wurde entschieden, dass bereits 2035 der Strom in Deutschland nahezu vollständig aus erneuerbaren Energien stammen soll. Dies ist ein wichtiger Beitrag zum European Green Deal, der Klimaneutralität innerhalb der nächsten 30 Jahre anstrebt (European Commission, 2019). 2020 betrug der Anteil erneuerbarer Energien am Gesamtstromverbrauch 45,5 % (Umweltbundesamt, 2021), wovon 9,3 % von Photovoltaik kam (Wirth, 2021). Mit dem Ziel diesen Anteil zu erhöhen, wird der Ausbau erneuerbarer Energien weiter vorangetrieben. Konventionelle Photovoltaik-Freiflächenanlagen (PV-FFA) haben dabei ein zusätzliches technisches Potential von 226 GWp (Wirth, 2021). Flächenbeschränkungen für die Errichtung neuer PV-Anlagen haben in den letzten Jahren zu einem steigenden Interesse an Agri-Photovoltaik (APV) geführt, die die Doppelnutzung von Flächen für die Strom- und Lebensmittelerzeugung erlaubt (Wirth, 2021).

Im Bemühen um Klimaneutralität bei der Energieerzeugung entstehen weltweit immer größere PV-FFA auf der einen Seite und immer zahlreichere, wenn auch kleinere APV-Anlagen.

Bei den wenigen APV-Anlagen in Deutschland handelt es sich größtenteils um kleine Forschungs- oder Pilotanlagen (Weselek, 2019), wohingegen z.B. Japan bereits 1922 APV-Systeme kommerziell betreibt, in deren Schatten 120 verschiedene Kulturen angebaut werden (Tajima & Aida, 2020). Die zahlreichen Untersuchungen bezüglich APV, die auf der jährlichen internationalen Konferenz AgriVoltaics vorgestellt und diskutiert werden, konzentrieren sich auf Pflanzenwachstum und Ertrag, Rentabilität sowie technisches Design. Im Vergleich dazu gibt es nur verhältnismäßig wenige Untersuchungen zum Einfluss von PV-FFA auf die Umwelt und im Besonderen auf den Boden- und Gebietswasserhaushalt.

Hassanpour Adeh et al. (2018) untersuchte Bodenfeuchte und Mikro-Klima auf einer PV-FFA in Oregon (USA) und dokumentierte geringere Bodenfeuchte in unbeschatteten Bereichen zwischen den Modulreihen, jedoch höhere Bodenfeuchte unter den Modulen, jeweils im Vergleich zu einer Referenzfläche. Bartholomäus (2013) kam bei Untersuchungen von Bodenprofilen auf einer mit Solarmodulen bestandenen Halde in Bautzen/Nadelwitz zu ähnlichen

Ergebnissen: In 1 m Tiefe war die Bodenfeuchte 5 bis 10 % höher als auf der Referenzfläche. Dieser Trend war in 60 cm Tiefe bereits weniger ausgeprägt und in 20 cm waren die Unterschiede nur noch gering.

Verdunstung, ein für die oberflächennahe Bodenfeuchte maßgeblicher Prozess, der von der Beschattung mit PV-Modulen beeinflusst wird, war der Gegenstand von Untersuchungen auf einer Testfläche nahe der Mu Us Wüste in China. Liu et al. (2019) fanden, dass die Verdunstung auf der Referenzfläche doppelt so hoch war wie unter den Modulen und auch höher (1,5-fach) als zwischen den Modulreihen. Diese Ergebnisse wurden auch durch Modelle zur Bestimmung der potentiellen Verdunstung unter Solarmodulen für verschiedene Klimazonen von Makaronidou (2020) bestätigt. Die Modelle zeigen für aride Gebiete eine doppelt so hohe und in äquatorialen Gebieten eine dreifach höhere potentielle Verdunstung auf der Referenzfläche im Vergleich zu unter den Modulen, wohingegen keine signifikanten Unterschiede für die gemäßigte Klimazone gefunden wurden. An einem Untersuchungsstandort in Großbritannien fand der Autor höhere Bodenfeuchtwerte unter den Modulen im Vergleich zu zwischen den Reihen während der Wachstumsperiode; jedoch ein umgekehrtes Bild außerhalb dieser Periode.

Yue et al. (2021) fanden bei ihren Untersuchungen an einer PV-Anlage in einer Wüstenregion Chinas ebenfalls saisonale Unterschiede in der Verteilung der Bodenfeuchte. Die Unterschiede waren während der Regenzeit am ausgeprägtesten, wohingegen die Bodenfeuchte in 40 cm während der Trockenzeit auf der Referenzfläche und unter den Modulen gleichermaßen niedrig war. Yue et al. (2021) führten außerdem vergleichende Betrachtungen unter starren Modulen und unter einachsigen verstellbaren Modulen durch, wobei sie eine höhere Bodenfeuchte unter den starren Modulen beobachteten. Elamri et al. (2018) haben die Umverteilung des Niederschlags durch Solarmodule modelliert und darauf aufbauend Szenarien mit dem Ziel entwickelt, die räumliche Heterogenität der Bodenfeuchte zu minimieren. Luo (2019) konzentrierte sich bei ihren Untersuchungen auf die Bodenfeuchteverteilung und im Speziellen auf den konzentrierten Abfluss von Niederschlag an der Tropfkante der Module. Messungen und Modellergebnisse zeigen lediglich eine leicht erhöhte Perkolation entlang des Abtropfstreifens im Vergleich zur Fläche zwischen den Modulreihen. Cook and McCuen (2013) modellierten die hydrologische Gebietsantwort einer Fläche mit Solarmodulen und fanden nur geringfügige Veränderungen im Abflussvolumen und Scheitelabfluss unter der Voraussetzung, dass die Landnutzung unverändert blieb.

Als Antwort auf die Diskrepanz zwischen der weltweit steigenden Anzahl großer Photovoltaik-Freiflächenanlagen (PV-FFA) und dem immer noch geringen Wissenstand, was deren Einfluss auf die Umwelt und im Besonderen das System Wasser-Boden-Pflanze betrifft, begann das Team Ingenieurhydrologie der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (HTWD) 2017 mit seinen Untersuchungen.

Voruntersuchungen zum Verständnis und zur Eingrenzung der dominanten Prozesse sowie zur Ableitung eines Messkonzeptes wurden an einer mittelgroßen PV-FFA, einer APV-Forschungsanlage sowie an zwei Lysimetern in Deutschland und einer APV-Forschungsanlage in Kenia durchgeführt.

Aktuelle Untersuchungen mit dem entwickelten Messkonzept werden seit August 2020 an der derzeit größten PV-FFA des Energieversorgers EnBW in Weesow-Wilmersdorf durchgeführt. Die ersten Ergebnisse werden im Kontext der Voruntersuchungen diskutiert.

2. Material und Methoden

2.1 Voruntersuchungen

2.1.1 Hypothesen

Die Umverteilung des Niederschlages durch Überdeckung und die Veränderung der Verdunstung durch Beschattung von Bodenflächen bewirken entsprechende Veränderungen in Quantität und Verteilung von Bodenfeuchte, Infiltration und Versickerung sowie Grundwasserneubildung. Die zwei folgenden Hypothesen (H) wurden im Vorfeld der Voruntersuchungen formuliert:

H1: Durch Teilbeschattung kommt es zu einer Verringerung der Verdunstung, ein in den Sommermonaten dominanter Prozess.

H2: Durch an der Tropfkante konzentrierten Niederschlag kommt es zu einer erhöhten Infiltration, Versickerung und Grundwasserneubildung, ein in den Wintermonaten dominanter Prozess.

2.1.2 Messkonzept

Zur Überprüfung der Hypothesen sowie deren Weiterentwicklung wurde ein entsprechendes Messkonzept entwickelt. Die Bodenfeuchte dient dabei als zuverlässig zu messender Indikator, der Veränderungen in den Komponenten der lokalen Wasserbilanz integrativ erfasst. Änderungen von Niederschlag und Verdunstung aber auch von Infiltration und Versickerung spiegeln sich in der Bodenfeuchte wider, wobei die räumliche Verteilung innerhalb einer Fläche mit Modulreihen je nach Position und Anlagendesign stark variieren kann.

Die Voruntersuchungen an den PV-FFA und APV-Forschungsanlagen sowie die Messungen in Weesow-Wilmersdorf konzentrieren sich auf die Erfassung der zeitlichen und räumlichen Verteilung der Bodenfeuchte. Hierzu werden Bodenfeuchteprofile bis zu 1 m Tiefe entlang von Transekten senkrecht zu den Modulreihen an der untersten Tropfkante, unter den Modulen und zwischen den Modulreihen sowie auf einer Referenzfläche durchgeführt. Diese werden je nach Schwerpunkt der Untersuchungen durch weitere Parameter wie Bodentemperatur, Luftfeuchte und -temperatur sowie Globalstrahlung ergänzt.

2.1.3 Standorte und Messungen

Die Voruntersuchungen wurden zwischen 2017 und 2021 in Sachsen durchgeführt; Informationen zur Lage der Standorte, deren Beschreibung sowie ein Überblick über die Messungen sind in Abbildung 1 zu finden. Erste Messungen begannen auf der 2009 auf einer Deponie in Boxberg errichteten PV-FFA. Zusätzlich wurde in Zusammenarbeit mit der Staatlichen Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft des Freistaates Sachsen auf der Lysimeterstation in Brandis bei Leipzig ein Lysimeter mit einem Solarmodul beschattet. Der Versuchsaufbau ist so konstruiert, dass der Niederschlag analog einer Modulkante mittig auf das Lysimeter fällt. Auf einer Versuchsfläche der HTW Dresden in Pillnitz wurde eine kleine höher aufgeständerte PV-Versuchsanlage aufgebaut, unter welcher zu den Untersuchungen zum

Bodenwasserhaushalt erste Untersuchungen zum Pflanzenwachstum unter Solarmodulen durchgeführt wurden.

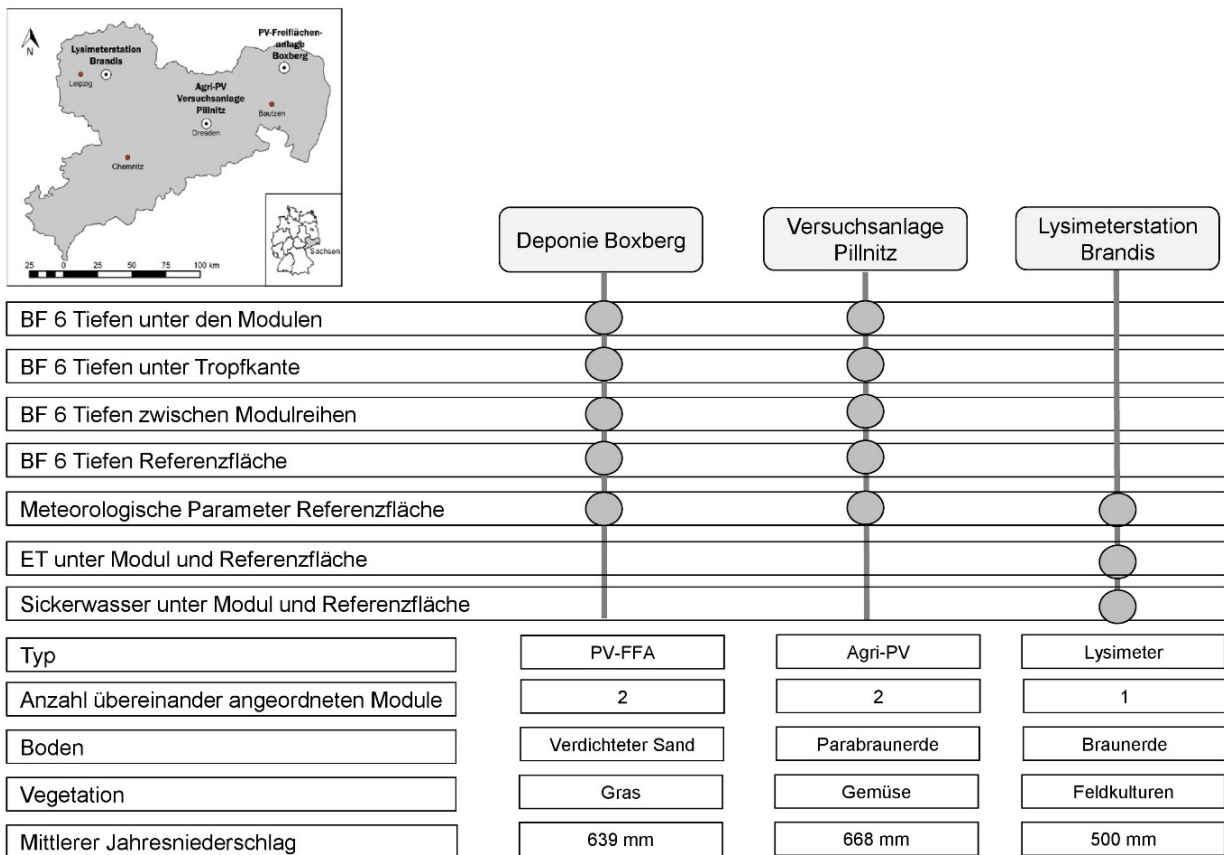


Abb. 1: Lage- und Standortbeschreibung sowie Überblick über die durchgeführten Messungen der Voruntersuchungen

2.2 Untersuchungen im Solarpark Weesow-Wilmersdorf

Die PV-FFA der Firma EnBW nordöstlich von Berlin (Abbildung 2) wurde 2020 gebaut und ist seit 2021 in Betrieb. Mit einer Gesamtfläche von 164 ha ist sie die derzeit größte Anlage in Deutschland. Die HTWD begleitet den Betrieb der Anlage mit einer Langzeitstudie zum Einfluss solcher Anlagen auf den Wasserhaushalt. Informationen zum Standort und den derzeitigen Messungen sind in Tabelle 1 (Reibetanz et al., 2010) zusammengefasst.

3. Ergebnisse und Diskussion

Es wird im Folgenden lediglich auf die Auswirkung der Bedeckung und Beschattung von Flächen, d.h. den Vergleich von Referenzfläche mit den Flächen unter den Modulen und zwischen den Modulreihen, eingegangen.

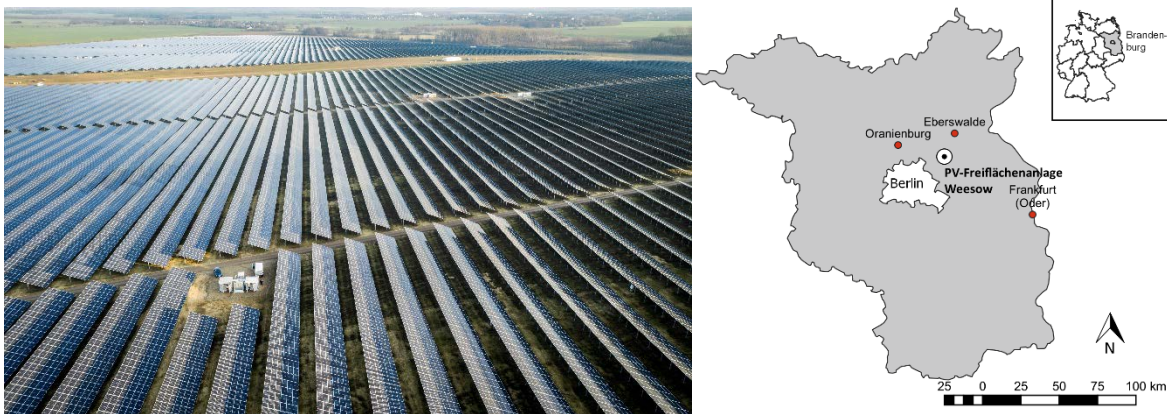


Abb. 2: Lage und Luftaufnahme des EnBW-Solarparks Weesow-Wilmersdorf

Tab. 1: Informationen zu PV-FFA und Messungen in Weesow-Wilmersdorf

Information	Details
Boden	Sand-Geschiebelehm-Mosaik auf Moräneneinsenkungen
Bewuchs	Standortgerechte Kräuter-Grasmischung
Mittlerer Jahresniederschlag	575 mm
Fläche	164 ha
Anzahl der übereinander angeordneten Module	6
Höhe Aufständering oben/unten	0,80 m / 2,15 m
Typ Bodenfeuchtemesssonden (BF)	TDR Sonden PR2/6 der Fa. Delta-T Devices
Messpunkte BF	3x Freifläche, 3x unter den Modulen 10, 20, 30, 40, 60 und 100 cm
Niederschlagsmesser (NM)	Kalyx der Firma EML Ltd.
Messpunkt NM	Freifläche
Beginn der BF-Messungen/NM Freifläche	09.06.2020
Beginn der BF-Messungen unter den Modulen	15.10.2021
Messintervall	10 min

3.1 Voruntersuchungen am Standort Boxberg

Die Voruntersuchungen in Boxberg und Pillnitz zeigen, dass in Trockenperioden der Rückgang der Bodenfeuchte in den obersten Bodenschichten unter den Modulen (BF_{UM}) im Vergleich zur Referenzfläche (BF_{Ref}) reduziert ist. Beispielfhaft werden hier Ergebnisse vom Standort Boxberg diskutiert.

Im Mittel von acht Trockenperioden zwischen April 2019 und April 2020 betrug der prozentuale Rückgang der Bodenfeuchte in 10 cm Tiefe 18,6 % \pm 11,5 % unter den Modulen und 42,4 % \pm 10,0 % auf der Referenzfläche.

Abbildung 3 zeigt den Verlauf der Bodenfeuchte in 10 cm Tiefe unter den Modulen (blau) und auf der Referenzfläche (schwarz) vom 29.05.19 bis 04.07.2019. Nach Niederschlägen im April und Mai kam es zu einer Aufwechtung auf beiden Flächen ($BF_{Ref}=28,6\%$, $BF_{UM}=20,6\%$). Nach einer Periode mit geringem Niederschlag ist die Bodenfeuchte am 04.07.2019 auf der Referenzfläche auf $BF_{Ref}=2,7\%$ gesunken und unter den Modulen auf $BF_{UM}=4,1\%$. Dies entspricht mittleren Gradienten von 2,6 %BF/Tag (Referenzfläche) und 1,6 %BF/Tag (unter den

Modulen) über den Gesamtzeitraum, wobei zu Beginn der Trockenperiode der Unterschied deutlicher ausgeprägt ist und mit abnehmender Bodenfeuchte geringer wird.

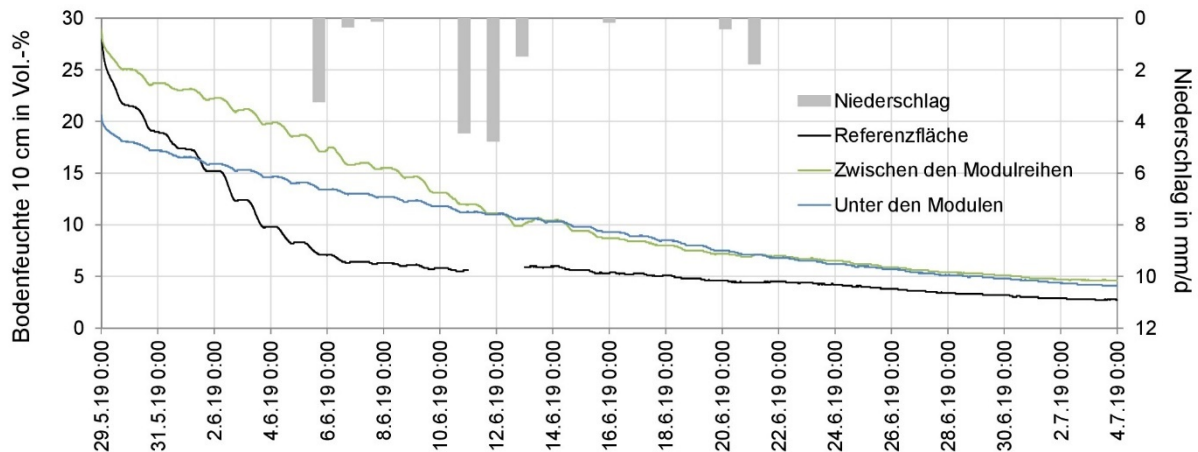


Abb. 3: Bodenfeuchteverlauf in 10 cm unter den Modulen, zwischen den Modulreihen und auf der Referenzfläche am Standort Boxberg, 29.05.2019 – 04.07.2019

In Trockenperioden ist der Rückgang der Bodenfeuchte im Wesentlichen auf Verdunstung zurückzuführen, was sich in den ausgeprägten Tagesgängen der Bodenfeuchte widerspiegelt. Entsprechend erlauben die Ergebnisse den Rückschluss, dass auf den Flächen unter den Modulen die sommerlichen Verdunstungsverluste geringer sind. Dies wird auch durch die Ergebnisse der Untersuchungen auf der Lysimeterstation Brandis bestätigt, wo die Verdunstung von Lysimetern mit und ohne Solarmodul gemessen wird (Feistel et al., 2022).

Neben dem geringeren Verdunstungsverlust ist die Bodenfeuchte unter den Modulen durch ein geringeres Niederschlagsdargebot im Vergleich zur Referenzfläche charakterisiert. Dies spiegelt sich in der Differenz der Ausgangsbodenfeuchte am 29.05.2022 wider.

Vergleicht man den Verlauf der Bodenfeuchte auf Referenzfläche mit der Fläche zwischen den Modulreihen (schwarze und grüne Linie in Abbildung 3), so ist diese Differenz geringer, d.h. zwischen den Modulreihen ist das Niederschlagsdargebot mit dem der Referenzfläche vergleichbar. Der Rückgangsgradient ist auf Grund der geringeren Beschattung und damit höheren Evapotranspiration im Vergleich zu den Flächen unter den Modulen mit 2,0 %BF/Tag etwas höher als auf diesen Flächen.

Für die betrachtete Periode ist die mittlere Bodenfeuchte auf der Referenzfläche mit $BF_{Ref}=7,0\%$ am geringsten. Der aus dem Anlageneinfluss resultierende geringere Verdunstungsverlust unter den Modulen (UM) und zwischen den Modulreihen (ZMR) spiegelt sich in höheren mittleren Bodenfeuchtwerten $BF_{UM}=9,8\%$ und $BF_{ZMR}=11,5\%$ wieder.

Die niedrigere Verdunstung unter den Modulen und eine daraus resultierende höhere Bodenfeuchte im Vergleich zur Referenzfläche entspricht den Ergebnissen von Hassanpour Adeh et al. (2018), Bartholomäus (2013) und Liu et al. (2019).

3.2 Erweiterte Hypothesen

Dennoch wäre eine Verallgemeinerung verfrüht, da die Dynamik von Niederschlagsdargebot und Verdunstung insbesondere unter den Modulen komplex ist. Das Niederschlagsdargebot hängt stark von Windrichtung und Windgeschwindigkeit ab (Erpul et al., 2003), während die Verdunstung selbst auch eine Funktion der Bodenfeuchte ist.

Zusätzlich können je nach Standortbedingungen die Einflüsse von PV-Anlagen auf die Prozesse des Wasserhaushaltes unterschiedlich ausfallen. Dabei spielen Boden, Hangneigung, lokales Klima aber auch das Design der Anlage ebenso eine Rolle wie die räumliche Skala der Untersuchungen. Die Erfassung der kleinräumigen Differenzen erfordert dabei ein anderes Vorgehen als die Betrachtung möglicher Veränderungen im Einzugsgebiet.

Die aufgestellten Hypothesen wurden entsprechend erweitert (s. Abbildung 4).

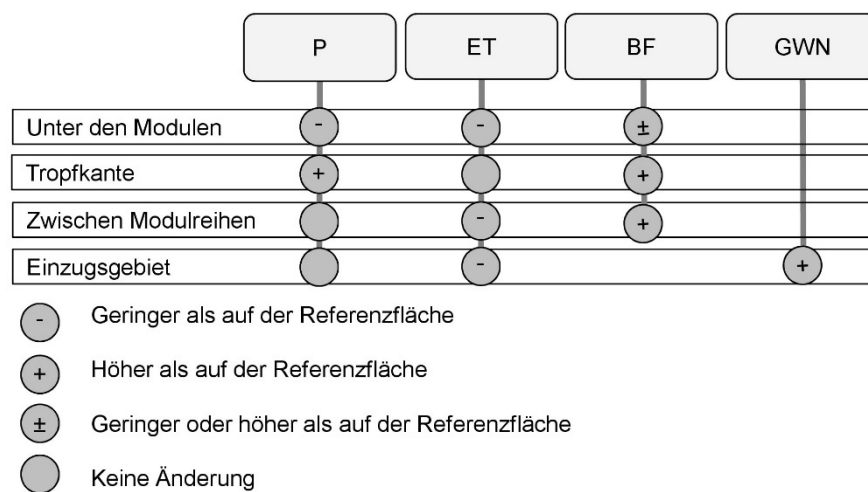


Abb. 4: Erweiterte Hypothesen zum Einfluss von PV-Anlagen auf Niederschlag (P), der Evapotranspiration (ET), der Bodenfeuchte (BF) und Grundwasserneubildung (GWN)

3.3 Solarpark Weesow-Wilmersdorf

Ab 15.10.2021 liegen gleichzeitige Messungen der Bodenfeuchte unter den Modulen (BF_{UM}) und auf der Referenzfläche (BF_{Ref}) vor, wobei nunmehr jede Messung dreifach wiederholt wird. Die ersten Ergebnisse bestätigen die Erkenntnisse aus den Voruntersuchungen zur verringerten Verdunstung unter den Modulen.

Abbildung 5 zeigt den Verlauf der Bodenfeuchte in 10 cm Tiefe unter den Modulen und auf der Referenzfläche vom 23.10.2021 bis 02.11.2021. Hier sind die Ausgangsbedingungen bezüglich der Bodenfeuchte unterschiedlich ($BF_{Ref}=13,5\%$, $BF_{UM}=10,9\%$). Während der folgenden niederschlagsfreien und noch warmen Periode sinkt die Bodenfeuchte in 10 cm Tiefe auf der Referenzfläche auf $BF_{Ref}=10,8\%$, die Bodenfeuchte unter den Modulen zeigt nur eine geringe Veränderung auf $BF_{UM}=10,8\%$. Dies entspricht täglichen Rückgangsgradienten von $0,27\%BF/Tag$ und $0,02\%BF/Tag$. Während auf der Referenzfläche weiterhin Verdunstung stattfindet, kommt diese in den beschatteten Bereich unter den Modulen bereits zum Erliegen.

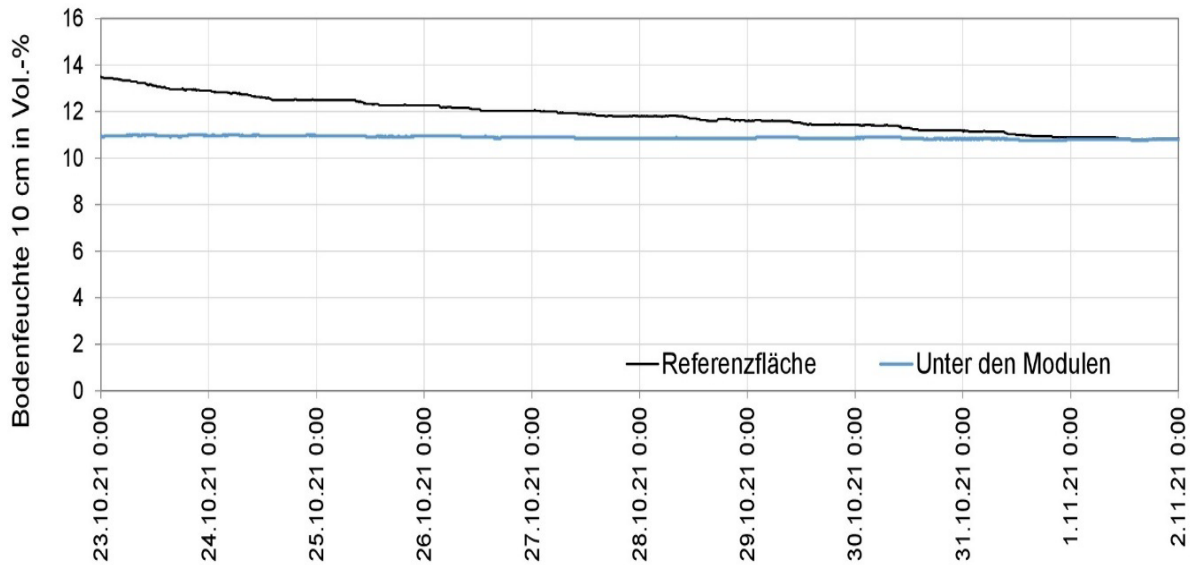


Abb. 5: Bodenfeuchteverlauf in 10 cm unter den Modulen und auf der Referenzfläche am Standort Weesow-Wilmersdorf, 23.10.2021 – 02.11.2021

Während der sich anschließenden feuchteren Wintermonate November 2021 bis Januar 2022 (Abbildung 6) spielt die Verdunstung keine signifikante Rolle mehr, vielmehr dominiert das unterschiedliche Niederschlagsangebot auf den Flächen den Verlauf der Bodenfeuchte. Ausgehend von gleicher BF auf beiden Flächen (10,8 %) steigt diese auf der Referenzfläche als Reaktion auf den Niederschlag bis auf 20,8 % an, während die BF unter den Modulen sich kaum verändert, d.h. der Niederschlag diese Flächen nicht erreicht. Hier spielen Windrichtung und Windgeschwindigkeit, wie in Erpul et al. (2003) beschreiben, eine Rolle; Verallgemeinerungen bedürfen einer gründlichen Analyse. Der starke Rückgang der Bodenfeuchte im Dezember 2021 ist auf den gefrorenen Boden zurückzuführen; diese Messwerte repräsentieren lediglich den Anteil an Wasser, der nicht gefroren ist.

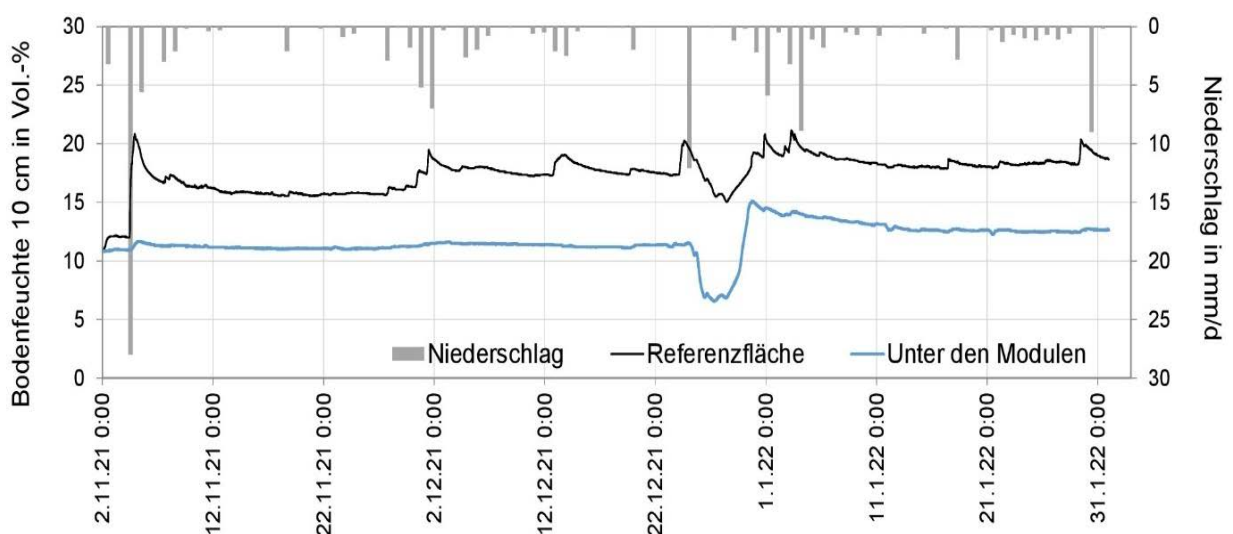


Abb. 6: Mittlerer Bodenfeuchteverlauf in 10 cm Tiefe unter den Modulen und auf der Referenzfläche am Standort Weesow-Wilmersdorf, 02.11.2021 – 31.01.2022

4 Zusammenfassung und Ausblick

Voruntersuchen und erste Ergebnisse einer begleitenden Langzeitstudie zum Einfluss von PV-Anlagen auf den Bodenwasserhaushalt zeigen, dass es durch Beschattung und Bedeckung (unter den Modulen) und Teilbeschattung (zwischen den Modulreihen) zu räumlichen und quantitativen Veränderungen von Niederschlag und Evapotranspiration kommt. Die Bodenfeuchte ist ein wichtiger Indikator zum Prozessverständnis.

In Trockenperioden kann die Evapotranspiration über den Bodenfeuchterückgang quantifiziert werden (Hess et al., 2021). Die Untersuchungen an der PV-FFA Weesow-Wilmersdorf werden nunmehr durch weiterführende Messungen u.a. mit Lysimetern sowie Modellierung der ungesättigten Bodenzone ergänzt, um die überarbeiteten Hypothesen nachzuverfolgen und die Verteilungsmuster auf die Fläche der Anlage zu skalieren. Da die Veränderungen von Standortfaktoren wie Klima, Boden, Vegetation aber auch dem Typ der Anlage abhängen, sind Untersuchungen auf weiteren Flächen geplant, die dem Rechnung tragen.

Danksagung

Die Voruntersuchungen wurden durch das Sächsische Ministerium für Wissenschaft und Kunst (Fördernummern 100316917 und 100333268) gefördert. Das Ingenieurbüro Maus gewährte die Erlaubnis zu den Untersuchungen auf der PV-FFA in Boxberg. EnBW erlaubt und unterstützt die Langzeitstudie auf der PV-FFA in Weesow-Wilmersdorf.

Literatur

- Bartholomäus, U., 2013. Bodenwasserhaushalt einer Rekultivierungsschicht unter dem Einfluss einer Photovoltaikanlage: Zusammenfassung zum Vortrag auf dem Statusseminar am 07.06.2013.
- Bundesrat, 2020. Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften: Gesetzentwurf der Bundesregierung, 569/20.
- Delta-T Devices, 2016. User manual for the SDI-12 Profile Probes. Version 4.1, Cambridge.
- Elamri, Y., Cheviron, B., Mange, A., Dejean, C., Liron, F., Belaud, G., 2018. Rain concentration and shelter-ing effect of solar panels on cultivated plots. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(2), 1285-1298.
- Erpul, G., Norton, L. D., Gabriels, D., 2003. The effect of wind on raindrop impact and rainsplash de-tachment. *Transactions of the ASAE*. 46. 10.13031/2013.12548.
- European Commission, 2019. The European Green Deal: Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, Brussels, 640.
- Feistel, U., Werisch, S., Marx, P., Kettner, S., Ebermann, J., Wagner, L., in preparation. Assessing the Impact of Shading by Solar Panels on Evapotranspiration and Plant Growth Using Lysimeters. *AIP Conference Proceedings*.
- Hassanpour Adeg, E., Selker, J. S., Higgins, C., 2018. Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency, in: *PloS one* 13, 11.
- Hess, A., Wadzuk, B., Welker, A., 2021. Evapotranspiration estimation in rain gardens using soil moisture sensors. *Vadose Zone Journal*. 20. 10.1002/vzj2.20100.

- Liu, Y., Zhang, R., Huang, Z., Cheng, Z., López-Vincente, M., Ma, X., Wu, G., 2019. Solar photovoltaic panels significantly promote vegetation recovery by modifying the soil surface microhabitats in an arid sandy ecosystem, *Land Degradation & Development* 30, 18, 2177–2186.
- Luo, Y., 2019. Moisture dynamics of a near-surface desert soil. UNLV Theses, Dissertations, Professional Papers and Capstones. 3822.
- Makaronidou, M., 2020. Assessment on the Local Climate Effects of Solar Photovoltaic Parks. Lancaster, Lancaster University, Lancaster Environment Centre. Dissertation submitted for the degree of Doctor of Philosophy.
- Reibetanz, S., Böhm, I., Schuch, C., Günnewig, D., Püschel, M., Rohr, A., de Beer, H., Herzog, F., Becker, C., Gausling, T., Kubal, C., Stoefer, M., 2010. Bebauungsplan „Energiepark Weesow-Willmersdorf“, Begründung einschl. Umweltbericht.
- Tajima, M., Aida, T., 2020, 14.-16. Oktober. Evolution of Agrivoltaic Farms in Japan. Conference paper, AgriVoltaics 2020 - the 1st world congress on agrivoltaic systems, Perpignan, France.
- Umweltbundesamt, 2021. Erneuerbare Energien in Deutschland. Daten zur Entwicklung im Jahr 2020.
- Weselek, A., Ehmann, A., Zikeli, S., Lewandowski, I., Schindele, S., Högy, P., 2019. Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities. A review. In: *Agronomy for Sustainable Development* 39, Nr. 4, 35.
- Wirth, H., 2021. Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland.
- Yue, S., Guo, M., Zou, P., Wu, W., Zhou, X., 2021. Effects of photovoltaic panels on soil temperature and moisture in desert areas. *Environmental science and pollution research international*.