

Regenwassermanagement in Photovoltaik- und Agri-Photovoltaikanlagen

**Freie wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des akademischen
Grades**

Bachelor of Science (Ba.Sc.)

**in der Studienfachrichtung
Gärtnerischer Pflanzenbau**

Vorgelegt bei:	Erstgutachterin:	Kerstin Wydra, Prof. Dr. sc. agr. habil. (Fachhochschule Erfurt)
	Zweitgutachter:	Axel Klapka, Prof. (Fachhochschule Erfurt)
Vorgelegt von:		Hannes Frömchen
	Adresse:	Hohenwindenstraße 3, 99086 Erfurt
	Matrikel-Nr.:	120092316
Vorgelegt am:		25. März 2025

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit gibt einen Überblick über die Einflüsse von Agri-Photovoltaik und Photovoltaik auf mikroklimatische Bedingungen sowie den Wasserkreislauf. Zudem zeigt sie auf, wie mithilfe von Wassermanagement Herausforderungen begegnet werden kann, die einerseits durch den Aufbau der Agri-Photovoltaik- und Photovoltaik-Anlagen, andererseits durch sich verändernde, klimatische Bedingungen entstehen. Dazu wird der derzeitige Stand der Forschung und Technik dargestellt.

Die Literaturrecherche zeigt, dass die Anlagen positive Einflüsse auf diverse mikroklimatische Bedingungen haben können. Durch die Verschattung kann eine Abkühlung unter Solarmodulen erreicht werden. Die Temperatur kann durchschnittlich $1,2^{\circ}\text{C}$ am Tag abgesenkt werden. Im Sommer können sogar Peaks von $3,8^{\circ}$ geringerer Lufttemperatur erreicht werden. Die Arbeit zeigt außerdem, dass Temperaturschwankungen von Winter und Sommer, aber auch von Tag und Nacht unter PV- und APV-Anlagen abgemildert werden können.

Weiterhin kann durch APV- und PV-Anlagen eine Erhöhung der relativen Luftfeuchtigkeit herbeigeführt werden. Hier wird eine hohe Abhängigkeit von der Jahreszeit angegeben, wobei in einer Untersuchung im Sommer eine Steigerung von 14 % beobachtet werden konnte.

Zudem können positive Einflüsse auf die Evapotranspiration und die Bodenfeuchte erwartet werden. Die Verschattung kann die tägliche Evapotranspiration, vor allem im Sommer, um bis zu ca. 70 % im Vergleich zur Referenzfläche senken. Die Bodenfeuchte kann, vor allem im Sommer, unter verschatteten Flächen, deutlich höher gehalten werden. Dies ist auch in Tiefen von bis zu 60 cm noch erkennbar.

Die Arbeit zeigt, dass APV-Anlagen für günstigere mikroklimatische Bedingungen für die Kulturen sorgen können und so landwirtschaftliche Vorteile bringen.

Der Niederschlag in APV- und PV-Anlagen zeigt eine inhomogene Verteilung. Unter der Abtropfkante der Module konnte teilweise mehr als doppelt so viel Niederschlag gemessen werden, wie zwischen den Modulen oder auf freiem Feld. Dies kann zu erhöhter Bodenerosion, der Beschädigung von Saat und Pflanzen und Wasserverlust durch erhöhten Run-Off führen. Durch die Montage einer Regenrinne kann es jedoch gelingen, die Niederschlagsmenge unter der Modulkante beinahe auf das Niveau der Referenzfläche abzusenken und so den negativen Erscheinungen vorzubeugen.

In der Arbeit wird weiterhin aufgezeigt, dass in diversen PV- und APV-Anlagen weltweit Rainwater-Harvesting Systeme etabliert und erforscht wurden. Das Wasser kann verschiedenen Zwecken zugeführt werden: Der (zusätzlichen) Bewässerung der Pflanzen, der Modulreinigung oder Modulkühlung. Die sammelbare Menge ist hauptsächlich abhängig von der Fläche der Module und der Menge des Niederschlags.

Die Literaturrecherche ergab von Anlage zu Anlage stark unterschiedliche Mengen von gesammeltem Wasser im Bezug auf die Modulfläche.

Unter praktischen Bedingungen konnten jährlich $0,92 \text{ m}^3$ Wasser pro m^2 Modulfläche gesammelt werden.

Die Arbeit zeigt, dass in hochaufgeständerten und bodennahen APV- und PV- Anlagen gleichermaßen RWH möglich ist. Viele der betriebenen RWH-Systeme in APV- und PV- Anlagen sind mit handelsüblichen Rinnensystemen ausgestattet, was im Verhältnis zur Anlage selbst für günstige Anschaffungskosten sorgen kann.

Anhand einer Case Study wurde das RWH-Potenzial einer fiktiven hochaufgeständerten APV-Anlage in Mittelthüringen errechnet. Auf der gesamten Fläche von $0,96 \text{ ha}$ liegt eine effektive Modulfläche von ca. 2940 m^2 bei 27° Modulneigung vor. Zudem wurde das RWH-Potenzial bei 20° und 34° Modulneigung errechnet. Für die Berechnung wurde einerseits eine Effizienz der Anlage von 100% , andererseits eine Effizienz von 75% angenommen, um die idealen Bedingungen und reale Bedingungen vergleichbar zu machen.

Für die letzten zehn Jahre ergibt sich bei einer zu 75% effizienten Anlage ein Schnitt von ca. 1130 m^3 sammelbarem Wasser. Im Jahr 2023 hätten sogar 1373 m^3 Regenwasser gesammelt werden können, was ca. $0,47 \text{ m}^3$ pro m^2 Modulfläche entspricht. Nimmt man eine Modulneigung von 20° an, hätten 2023 sogar ca. 1447 m^3 gesammelt werden können, da bei geringerer Neigung eine größere effektive Sammelfläche vorliegt.

Im August 2023 hätten sich bei einem Niederschlag von ca. 166 mm ca. 367 m^3 sammeln lassen. Im darauffolgende September, der mit ca. 10 mm Niederschlag sehr trocken war, hätte man das gesammelte Wasser in diesem Monat aufwenden können. Umso inhomogener die Niederschläge über das Jahr verteilt werden, desto mehr Vorteile kann ein RWH-System mit entsprechender Speicherleistung bieten.

Somit ergeben sich folgende Erkenntnisse: APV-Anlagen können neben ihrer Schutzwirkung durch Verminderung der Evapotranspiration zu höherer Bodenfeuchte und besserer Wasserverfügbarkeit für die Pflanzen beitragen. Dies kann zur effizienten Nutzung von Regenwasser beitragen. Durch Regenrinnen und RWH-Systeme kann das Wassermanagement kostengünstig und effizient verbessert werden, was für die Landwirtschaft, die in Zukunft unter dem Einfluss immer stärkerer Wetterextreme steht, erhebliche Vorteile bedeuten kann.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	I
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	VIII
Abkürzungsverzeichnis	VIII
1. Einleitung	1
2. Grundlagen APV	2
2.1 Definition.....	2
2.2 APV-Systeme.....	2
2.3 Potenzial.....	5
3. Einfluss von APV- und PV-Anlagen auf meteorologische Variablen	6
3.1 Temperatur.....	6
3.2 Niederschlag.....	9
3.3 Luftfeuchtigkeit.....	14
3.4 potenzielle Verdunstung.....	16
3.5 Evapotranspiration	17
3.6 Bodenfeuchtigkeit	20
3.7 Bodenerosion (splash erosion)	24
4. Wassermanagement in APV- und PV-Anlagen	25
5. Rainwater-Harvesting in APV- und PV-Anlagen	28
5.1 Defintion RWH.....	28
5.2 Bedeutung.....	29
5.3 Varianten.....	29
5.4 Stand der Wissenschaft.....	32
5.5 Stand der Technik.....	38
5.5.1 Technische Eignung einer Anlage zum Rainwater-Harvesting.....	38
5.5.2 Technische Grundlagen der Anlage.....	40
5.5.2.1 Aufständering.....	40
5.5.2.2 Solarmodule.....	41
5.5.2.3 Rinnensysteme.....	43
5.5.2.4 Drainage-Systeme.....	45
5.5.2.5 Wasserspeicherung.....	45
6. Case study	48
6.1. Material und Methoden.....	48
6.1.1 Standort.....	48
6.1.2 Konstruktion.....	48
6.1.3 Konstruktion RWH.....	50
6.1.4 Kulturplanung.....	51

6.2 Methodik.....	52
6.3 Ergebnisse.....	53
6.4 Fazit.....	56
7. Fazit und Diskussion.....	56
Literaturverzeichnis.....	61
Danksagung.....	IX
Eidesstattliche Erklärung.....	X

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Klassifikation von APV-Anlagen.....	3
Abbildung 2: Darstellung APV-Anlage Kategorie I, nach DIN SPEC 91434.....	3
Abbildung 3: Darstellung APV-Anlage Kategorie II, Variante 2 nach DIN SPEC 91434.....	4
Abbildung 4: Darstellung APV-Anlage Kategorie II, Variante 1 nach DIN SPEC 91434.....	4
Abbildung 5: Technisches Potenzial der Photovoltaik in Deutschland in verschiedenen Sektoren.....	5
Abbildung 6: Stromerträge von PV-Kraftwerken und Silomais pro Hektar eingesetzter Fläche.....	6
Abbildung 7: Tägliche mittlere Bodentemperatur der APV-Fläche und der Referenzfläche in 2017 und 2018 in Heggelbach, Süddeutschland. In den Bereichen der schwarzen Balken wurden signifikante Unterschiede gemessen.....	8
Abbildung 8: Bodentemperatur in der APV-Fläche und der Referenzfläche von 2019 bis 2020 in einer Tiefe von 10 cm im Solarpark Boxberg, Sachsen.....	8
Abbildung 9: Unterschiede in Lufttemperatur (°C) und relativer Luftfeuchtigkeit (%) zwischen verschütteter Fläche und Kontrollfläche an drei sonnigen Tagen in den Jahren 2019, 2020 und 2021 in Südfrankreich.....	9
Abbildung 10: Niederschlagsverteilung in bodennahen APV-Anlagen nach Feistel.....	10
Abbildung 11: Niederschlagsverteilung unter der APV-Anlage und auf der Referenzfläche in der Anlage in Heggelbach, Süddeutschland.....	11
Abbildung 12: Niederschlagsverteilung unter den Modulen (mit und ohne Rinne) sowie auf der Referenzfläche in der APV-Anlage in Lüchow.....	12
Abbildung 13: Niederschlagsverteilung unter einem Solarmodul in der APV-Anlage in Lüchow.....	13

Abbildung 14: Durchmesser der Regentropfen, die von der Abtropfkante der Solarpanels fallen in zwei Tests. Gemessen in der APV-Anlage in Lavalette, Südfrankreich.....	13
Abbildung 15: Niederschlagsverteilung, gemessen bei verschiedenen Panelstellungen in der APV-Anlage in Lavalette, Südfrankreich.....	14
Abbildung 16: Dynamik der relativen Luftfeuchtigkeit (RH (%)) b1-b3) auf der Referenzfläche im Vergleich zu drei Flächen unter jeweils unterschiedlich lichtdurchlässigen PV-Panels (T1= 19 % Verschattung; T2= 30,4 % Beschattung; T3= 38 % Beschattung) zwischen 2018 und 2020 in Südwest-China.....	15
Abbildung 17: Mittlere relative Luftfeuchtigkeit in der APV-Fläche und der Referenzfläche mit Standardabweichung und statistischen Tests (t-Test und Kolmogorov-Smirnov-Test), gemessen in verschiedenen Höhen in Oregon, USA.....	15
Abbildung 18: Potenzielle Evapotranspiration gemessen über 160 Tage in drei verschiedenen Stadien der Verschattung in einer APV-Anlage in Montpellier, Südfrankreich.....	16
Abbildung 19: Tägliche Evapotranspiration unter Solarmodulen und der Referenzfläche im Winter 2019/ 2020 in der Lysimeterstation in Brandis.....	18
Abbildung 20: Dynamik der Evaporation und der Transpiration auf der Referenzfläche im Vergleich zu drei Flächen unter jeweils unterschiedlich lichtdurchlässigen PV-Panels (T1= 19 % Verschattung; T2= 30,4 % Beschattung; T3= 38 % Beschattung) zwischen 2018 und 2020 in einer APV-Anlage für Kiwi in Südwest-China.....	19
Abbildung 21: Entwicklung der Bodenfeuchte 10 cm unter Geländeoberkante und der Verdunstung in der APV-Anlage in Lüchow berechnet nach Penman-Monteith.....	20
Abbildung 22: Messvorrichtungen für Messung der Bodenfeuchte und der Evapotranspiration in der APV-Pilotanlage in Pillnitz.....	21
Abbildung 23: Entwicklung der Bodenfeuchte über 240 Tage unter drei verschiedenen Stadien der Verschattung und der Referenzfläche, gemessen in den Tiefen 20 cm, 40 cm und 60 cm.....	22
Abbildung 24: Tiefenprofil der Wasserverteilung in drei verschiedenen Verschattungszuständen und der Referenzfläche im Mai 2015 in einer APV-Anlage in Oregon, USA.....	23
Abbildung 25: Tiefenprofil der Wasserverteilung in drei verschiedenen Verschattungszuständen und der Referenzfläche im August 2015 in einer APV-Anlage in Oregon, USA.....	23

Abbildung 26: Entwicklung der Bodenfeuchte 10 cm unter Geländeoberkante unter Einfluss von Niederschlag und Beregnungswasser in der APV-Anlage in Lüchow.....	24
Abbildung 27: Verhalten von Niederschlag in PV-Anlagen mit Hanglage.....	25
Abbildung 28: Prinzip einer Hangerosions-PV-Anlage nach Kormann.....	26
Abbildung 29: APV-Anlage der Firma SUNfarming GmbH mit wasserverteilender Unterkonstruktion.....	27
Abbildung 30: Detail der wasserverteilenden Unterkonstruktion der Firma SUNfarming GmbH.....	27
Abbildung 31: Modellzeichnung Solarabdeckung für Wasserspeicher.....	28
Abbildung 32: Möglichkeiten des Floodwater harvesting. Oben: Hochwasser-Umleitungssystem, in dem Hochwasser auf Flutfelder geleitet wird, auf denen es dann in die grundwasserführenden Schichten sickern kann. Unten: Querschnitt des Jessour-Systems, bei dem Flutwasser Stufenweise in von Dämmen gesicherten Sedimentschichten abgelagert wird.....	30
Abbildung 33: Querschnitt eines Macrocatchment-Systems, dass die Speisung der grundwasserführenden Schicht begünstigt. Aus dieser kann dann das Wasser dann durch Pumpen nutzbar gemacht werden.....	31
Abbildung 34: Möglichkeiten des Microcatchment-Water-Harvesting. Links: Auffanggruben, in denen das Wasser versickert. Mitte: Dammsystem mit davorliegenden Ablaufgräben. Rechts: natürliche Begrenzung des Abflusses durch Grünstreifen.....	31
Abbildung 35: Rooftop- und Courtyard-Harvesting. Links: Dachabfluss wird über Rinnen und Rohre in Speicherbehälter geleitet. Rechts: Oberflächenabfluss wird über Drainage-Rinnen in den Speicherbehälter geleitet.....	31
Abbildung 36: Einfluss verschiedener Umweltfaktoren auf die sammelbare Regenmenge in einer bodennahen PV-Anlage in Jordanien.....	33
Abbildung 37: Technische Parameter dreier verschiedener von BAy.Wa.re betriebener APV-Anlagen mit RWH-Systemen.....	34
Abbildung 38: Täglich aufgefangene Wassermenge in einer bodennahen PV-Anlage in Jordanien.....	35
Abbildung 39: RWH-Versuchsaufbau mit Speichertanks und Steuerung in einer bodennahen PV-Anlage in Jordanien.....	35
Abbildung 40: Monatlich gesammelte Regenmenge in einer bodennahen PV-Anlage in der Türkei.....	36
Abbildung 41: Aufbau eines agrikulturellen Systems auf Basis eines Rainwater-Harvesting-PV-Anlage.....	37
Abbildung 42: Speicherstand, verfügbare Wassermenge und Beregnungsgaben, modelliert für zwei Feldgrößen von einem und zwei Hektar.....	37

Abbildung 43: Überkopf-APV-System mit oberliegendem RWH-System in Tansania.....	39
Abbildung 44: Detail Rainwater-Harvesting-System einer bodennahen APV-Anlage in Indien.....	39
Abbildung 45: Bau der Verrohrung in einer bodennahen APV-Anlage in Indien.....	40
Abbildung 46: Regenwassersammlungs-PV.....	40
Abbildung 47: Entwässerungs-Montageschiene für Solarpanels.....	42
Abbildung 48: Details Rainwater-Harvesting-System in der APV-Anlage in Alhéndin, Südspanien.....	43
Abbildung 49: Konstruktionsdetail Rinnen-Montage an Solarpanels.....	44
Abbildung 50: Detail RWH-System in einer bodennahen PV-Anlage in der Türkei.....	45
Abbildung 51: Speichertanks für das aufgefangene Wasser in einer bodennahen PV-Anlage in der Türkei.....	47
Abbildung 52: Detail Speichertank Rainwater-Harvesting-System in der APV-Anlage in Alhéndin, Südspanien.....	47
Abbildung 53: Draufsicht auf die modellierte APV-Anlage in Mittelthüringen. Die Modulreihen sind in grau gehalten, die Unterkonstruktion ist in schwarz gehalten.....	49
Abbildung 54: Schnitt der modellierte APV-Anlage in Mittelthüringen.....	50
Abbildung 55 : Detail Modul und Regenrinne der modellierte APV-Anlage in Mittelthüringen.....	51
Abbildung 56: Jährliches RWH-Potenzial der modellierten APV-Anlage bei einer Winkelstellung von 27° bei 75 % Effizienz von 2014 bis 2024.....	53
Abbildung 57: Monatliches RWH-Potenzial der modellierten APV-Anlage bei einer Winkelstellung von 27° bei 75 % Effizienz im Jahr 2024.....	54
Abbildung 58: Monatliches RWH-Potenzial der modellierten APV-Anlage bei einer Winkelstellung von 27° bei 75 % Effizienz im Jahr 2023.....	55

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Effektive Sammelfläche und Verdeckungsgrad der APV- Anlage in Abhängigkeit der Winkelstellung der Module.....	52
Tabelle 2: Jährliches RWH-Potenzial der modellierten APV-Anlage bei verschiedenen Winkelstellungen von 2014 bis 2024.....	53
Tabelle 3: Monatliches RWH-Potenzial der modellierten APV-Anlage bei verschiedenen Winkelstellungen im Jahr 2024.....	54
Tabelle 4: Monatliches RWH-Potenzial der modellierten APV-Anlage bei verschiedenen Winkelstellungen im Jahr 2023.....	55

Abkürzungsverzeichnis

APV.....	Agri-Photovoltaik
FFA.....	Freiflächen-Anlage
Ha.....	Hektar
KG.....	Kanalgrundrohr
PV.....	Photovoltaik
RWH.....	Rainwater-Harvesting

1. Einleitung

Die aktuelle energiepolitische Lage verdeutlicht, dass ein Umdenken bei der Energieversorgung nötig ist. Der globale Energieverbrauch steigt und die Entwicklung des Klimas und der sicherheitspolitischen Lage verlangen die Zuwendung zu erneuerbaren und sicheren Energiequellen. Die klimatischen Bedingungen betreffen jedoch nicht nur den Energiesektor: Die Landwirtschaft hat durch die steigende Anzahl von Extremwetter-Ereignissen immer häufiger Ernteaussfällen zu beklagen.

Die weltweite landwirtschaftliche Produktion muss bis 2050 um 50 % steigen, um der wachsenden Bevölkerung gerecht zu werden (UN World Water Development Report, 2024).

Gleichzeitig werden mehr Flächen für erneuerbare Energien bereitgestellt werden müssen, um die Energieziele zu erreichen. Hier entsteht ein Flächenkonflikt, der durch die Nachfrage nach Siedlungs- und Verkehrsraum noch verschärft wird. Zudem tragen die klimatischen Veränderungen in viele Teilen der Erde dazu bei, dass die Landwirtschaft durch Wasserknappheit beeinträchtigt ist und die Fruchtbarkeit der Böden leidet. Dem gegenüber steht eine, im Vergleich zu 2010, 30 % höhere Nachfrage nach Wasser bis 2050 (UN World Water Development Report, 2024) .

Die Agri-Photovoltaik könnte einen Ansatz darstellen, verschiedenen Problemen gleichzeitig zu begegnen. Die bei diesen Anlagen entscheidende Doppelnutzung von landwirtschaftlicher Fläche zur Stromerzeugung und zum Anbau kann den Flächenertrag um bis zu 60-70 % steigern (Dupraz, et al., 2011, Weselek et al., 2019), während gleichzeitig eine Schutzwirkung für Kulturen gegeben ist. Feistel et al. (2025) haben herausgefunden, dass Solarmodule eine räumliche und quantitative Veränderung des Wasserdargebots bewirken. Zudem bieten sie die Möglichkeit, in den Wasserkreislauf einzugreifen. Mittels Regenwasser-Management könnte die Resilienz der landwirtschaftlichen Produktion verbessert werden. Im Vergleich zum Anbau unter APV ist ihr Einfluss auf den Wasserkreislauf und das Potenzial in diesen einzugreifen bisher noch wenig erforscht. Wissenschaftliche Erkenntnisse zum Einfluss von APV auf den Wasserhaushalt, die technischen Möglichkeiten und das Potenzial von Wassermanagement in APV-Anlagen sollen in dieser Arbeit betrachtet werden.

2. Grundlagen APV

2.1 Definition

Agri-Photovoltaik ist die Kombination von landwirtschaftlicher und solarwirtschaftlicher Nutzung einer Fläche.

Das Deutsche Institut für Normung definiert den Begriff in der DIN-SPEC 91434:2021-05 wie folgt: „Agri-Photovoltaik / Agri-PV / APV: kombinierte Nutzung ein und derselben Landfläche für landwirtschaftliche Produktion als Hauptnutzung und für Stromproduktion mittels einer PV-Anlage als Sekundärnutzung“ (Deutsches Institut für Normung e.V., 2021).

Durch die Sekundärnutzung der landwirtschaftlichen Fläche wird die Landnutzungseffizienz erhöht. Die Energieerzeugung bleibt dabei immer die Sekundärnutzung, wobei die Primärnutzung der Landwirtschaft gilt.

2.2 APV-Systeme

APV Anlagen können nach entsprechend ihrem Standort, ihrem Einsatzzweck und weiteren Eigenschaften in verschiedene Kategorien eingeordnet werden. Als Hauptmerkmal zur Einteilung wird die Aufständertechnik herangezogen. Das Fraunhofer-Institut hat eine Klassifizierung erstellt, in der APV-Systeme zunächst in „offen“ und „geschlossen“ unterteilt werden (Fraunhofer ISE, 2022). Geschlossene Systeme sind Anlagen, die auf Gewächshäusern installiert sind (Willockx et al., 2020). Willockx unterteilt die „offenen“ Anlagen, auch Freiflächen-PV, einerseits nach ihrer Nutzung in Anlagen für Obstbau und Anlagen für Feldbau (Abbildung 1). Andererseits nach ihrem Aufbau in Überkopf-PV (Hochaufgeständerte Anlagen der Kategorie I) (Abbildung 2) und Zwischenreihen-PV (Bodennahe Anlagen der Kategorie II). In der DIN werden die bodennahen Anlagen der Kategorie II eingeteilt in Variante 1 (Abbildung 3) und Variante 2 (Abbildung 4) (Deutsches Institut für Normung e.V.). In einer anderen Veröffentlichung unterteilt Willockx die dynamischen Systeme nochmals in 1-Achsig und 2-Achsig nachgeführte Systeme (Willockx, 2020). Bei nachgeführten Systemen (trackingfähigen Systemen) sind die Solarpanels um eine oder zwei Achsen drehbar. So kann entweder mehr Strahlung aufgefangen werden oder man kann die Modulstellung auf die Lichtbedürfnisse der angebauten Kultur optimieren. Auch andere Nutzungsmöglichkeiten, z. B. PV-Anlagen auf Indoor-Farmen oder Kombination von Aquakultur und PV sind im weitesten Sinne der Agri-PV zuzuordnen, müssen jedoch aufgrund unterschiedlicher Normungen und Förderbedingungen von Freiflächenanlagen unterschieden werden (Vollmer, 2022).

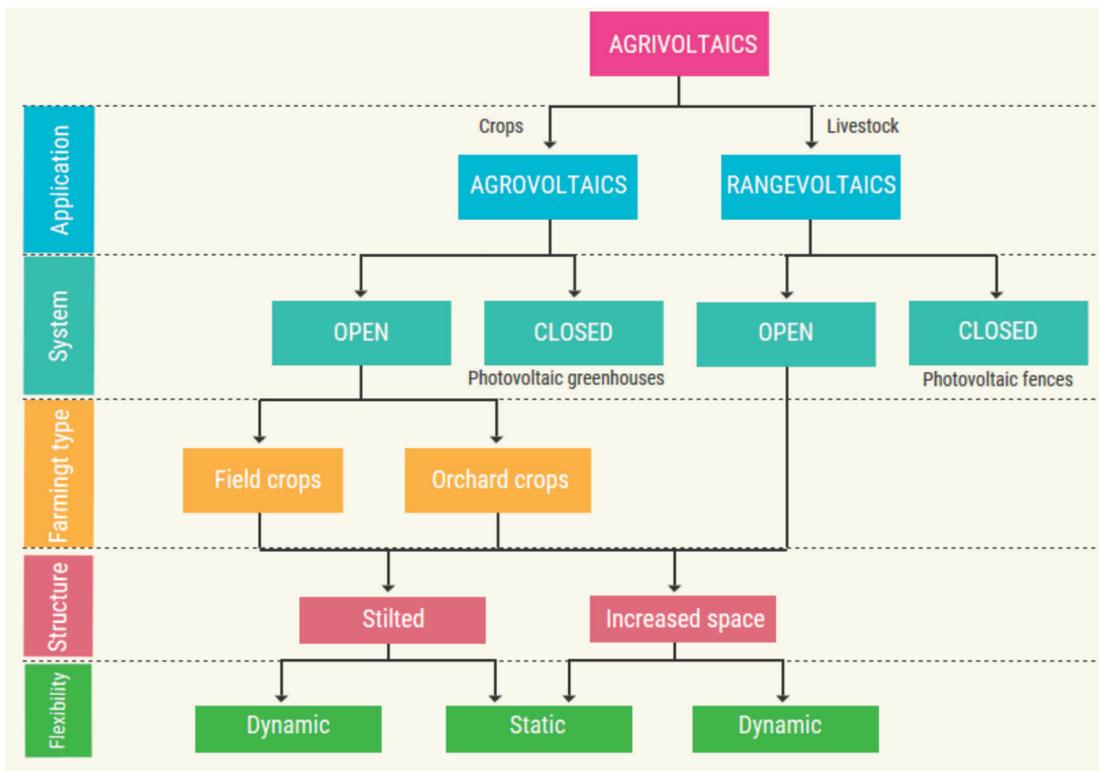


Abbildung 1: Klassifikation von APV-Anlagen (Willcockx et al., 2020).

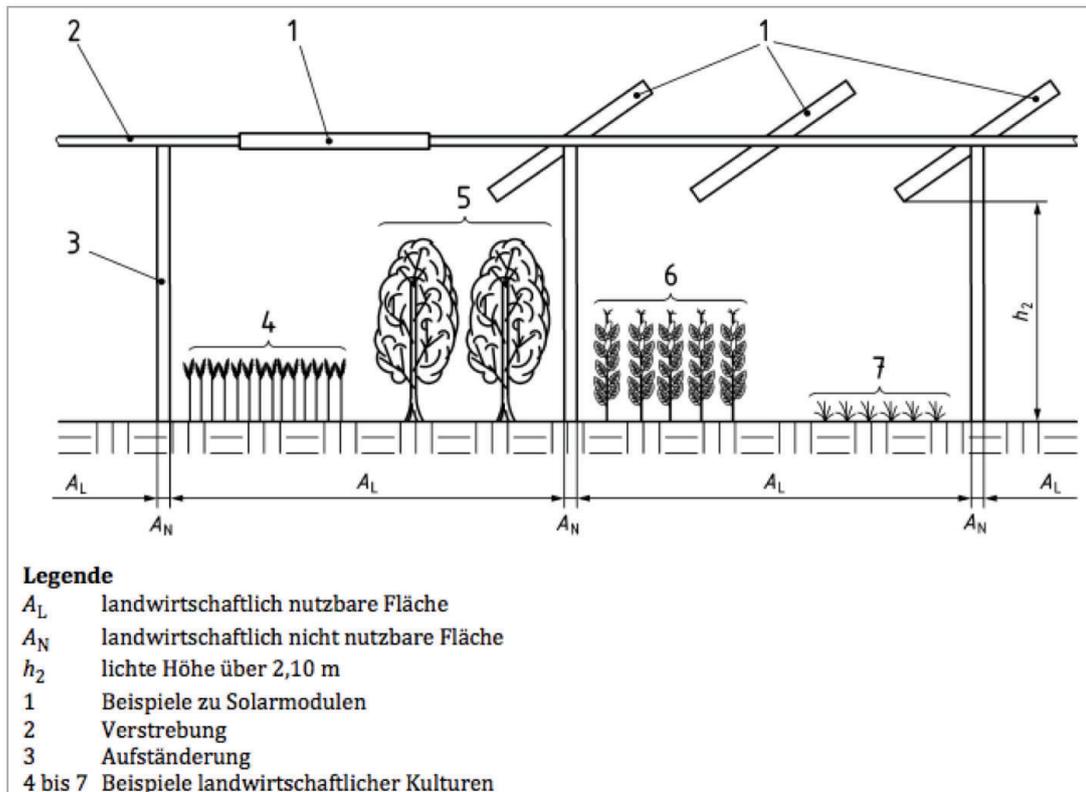


Abbildung 2: Darstellung APV-Anlage Kategorie I, nach DIN SPEC 91434 (Deutsches Institut für Normung e. V., 2021).

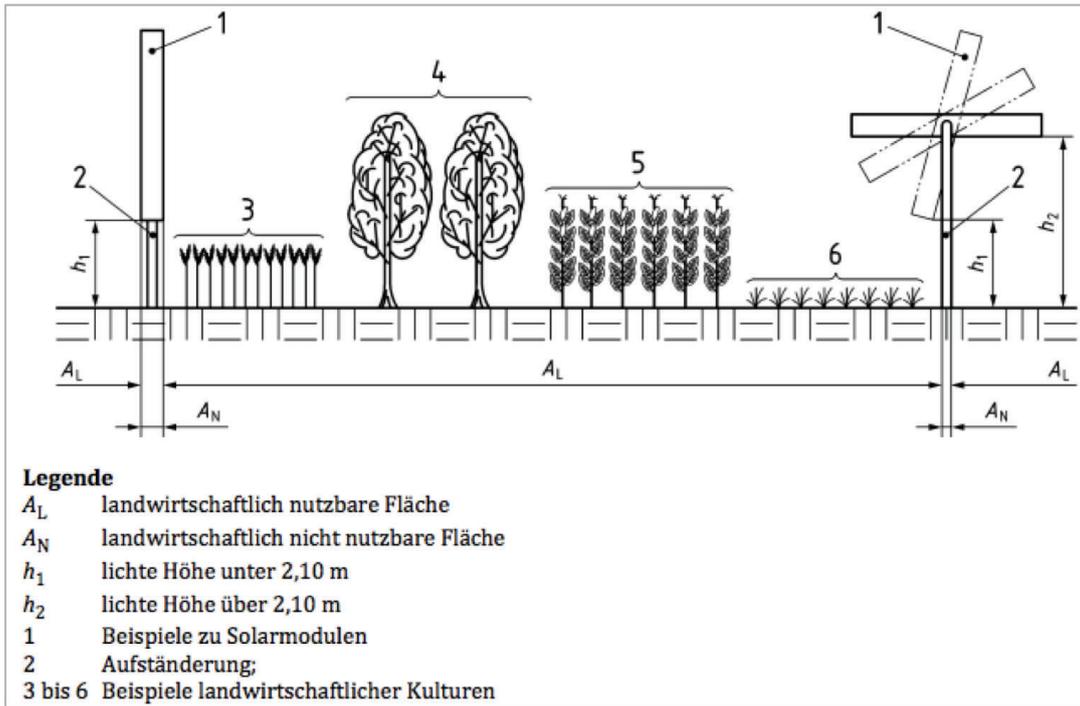


Abbildung 3: Darstellung APV-Anlage Kategorie II, Variante 2 nach DIN SPEC 91434 (Deutsches Institut für Normung e. V., 2021).

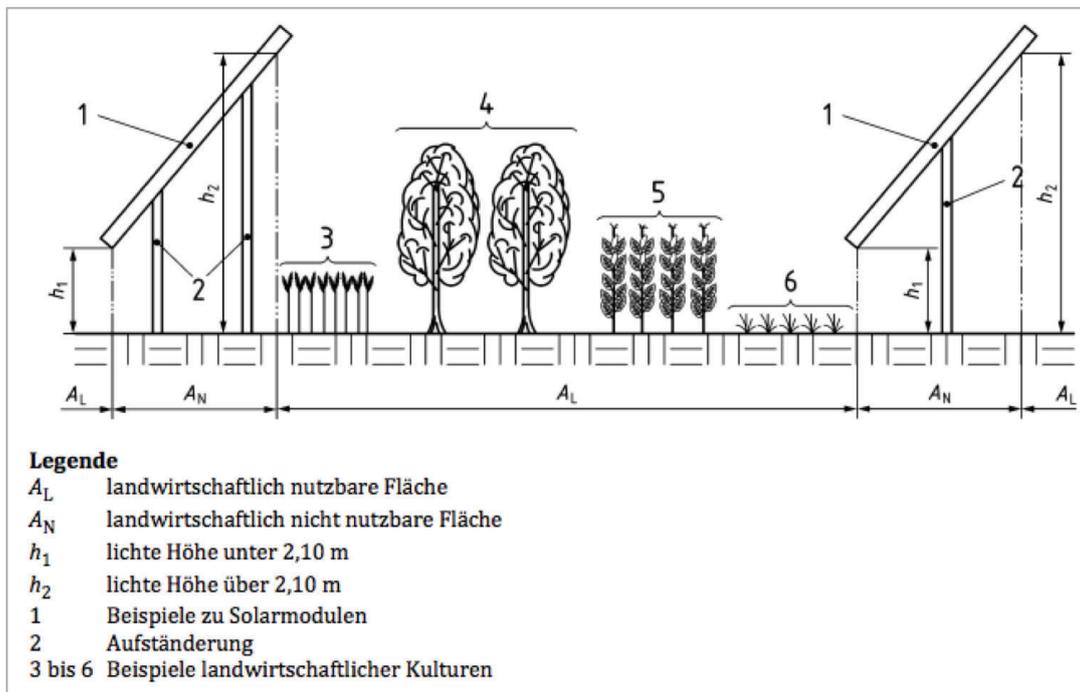


Abbildung 4: Darstellung APV-Anlage Kategorie II, Variante 1 nach DIN SPEC 91434 (Deutsches Institut für Normung e. V., 2021).

2.3 Potenzial

Energiepotenzial

Die Stromerzeugung durch APV Anlagen hat in Deutschland ein hohes Potenzial. Das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft bezifferte die landwirtschaftlich genutzte Fläche 2020 auf 16,6 mio. Hektar (BMEL, 2020). Die Stiftung Klimaneutralität gab 2021 an, dass unter Nutzung von 1 % der landwirtschaftlichen Fläche ca. 130 GW Strom erzeugt werden können, was einer Flächeneffizienz von 1,25MW/ ha entspricht (Stiftung Klimaneutralität, 2021).

Insgesamt schätzt das Fraunhofer Institut das Potenzial der Agri-PV in Deutschland auf 1700 GW (Fraunhofer ISE, 2024) (Abbildung 5).

Thüringen verfügt momentan über eine kumulierte PV-Leistung von 1,9 GW. Der Bedarf für klimafreundlichen Strom steigt bis 2030 voraussichtlich auf 6,8 GW (Wydra et al. 2022). Das Potential der Thüringer Ackerflächen, von denen 605.153 ha für die Installation von APV geeignet wären liegt bei 424 Gwp Leistung. Zusätzlich stünde durch vertikale Anlagen auf Grünland ein weiteres Potential von 67 GWp zur Verfügung. Die Nutzung des Potentials ist abhängig von politischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen.

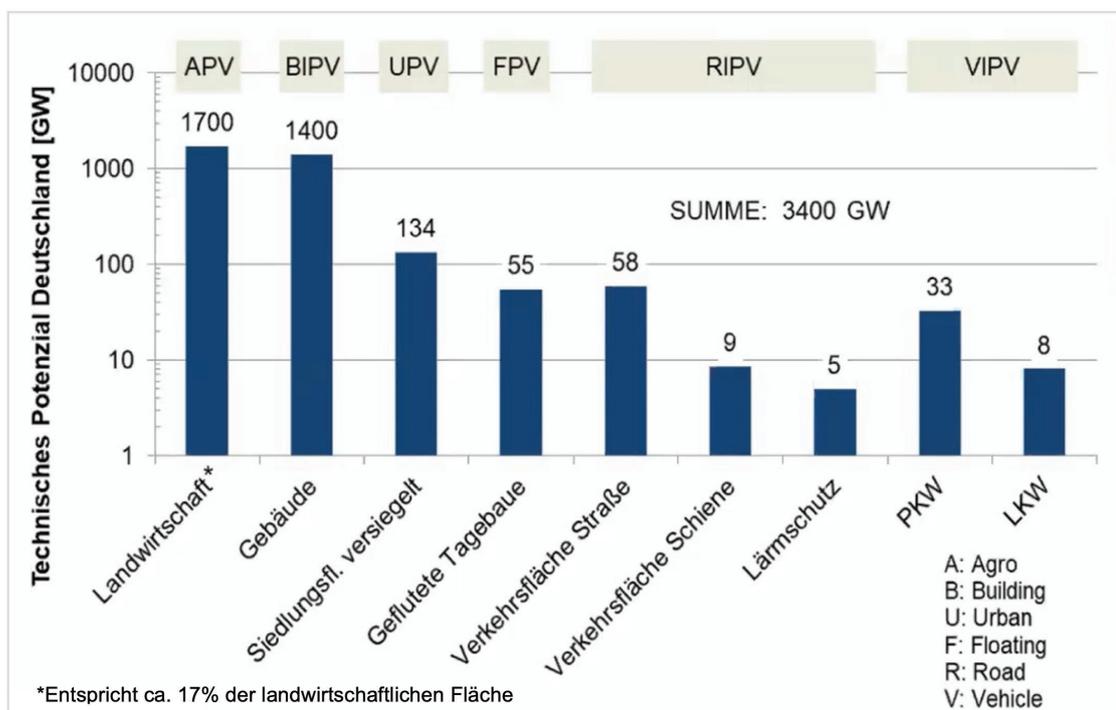


Abbildung 5: Technisches Potenzial der Photovoltaik in Deutschland in verschiedenen Sektoren (Fraunhofer ISE, 2022).

Landwirtschaftliches Potenzial

Neben dem Energieertrag ist auch das landwirtschaftliche Potenzial der APV-Anlagen zu betrachten. Die Anlagen können Kulturen vor Extremwetterereignissen wie Hitze, Starkregen oder Hagel zu schützen und somit zur Resilienz der landwirtschaftlichen Produktion beitragen (Wydra et al. 2022).

Zudem zeigen diverse Untersuchungen, dass sich durch APV-Anlagen die Wassereffizienz in der landwirtschaftlichen (Ramos-Fuentes et al. 2023) und gartenbaulichen (Al-Agele et al. 2021) Produktion steigern lässt, und das sogar bei Kulturen, die schattenempfindlich sind (Adeh et al. 2018). Mit Wassermanagement in den Anlagen entstehen weitere Potenziale für Bewässerung und Wasserspeicherung. Das Kombinierte Potenzial aus dem Ertrag aus landwirtschaftlichen Kulturen und Stromertrag liegt bei einer Produktivitätssteigerung von 60-70 % (Dupraz, et al., 2011, Weselek et al., 2019). Im extrem trockenen Sommer 2018 konnte die Produktivität im Vergleich zur Referenzfläche unter APV um 90 % gesteigert werden (Trommsdorff et al. 2021). Wirth (2025) gibt für die Stromproduktion in APV-Anlagen einen 32-fachen Ertrag im Vergleich zur Verstromung von Silomais an (Abbildung 6).

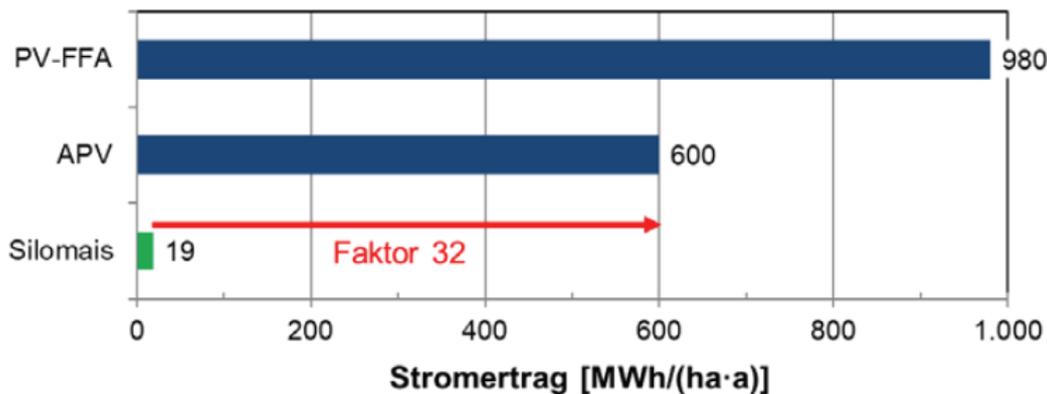


Abbildung 6: Stromerträge von PV-Kraftwerken und Silomais pro Hektar eingesetzter Fläche (Wirth, 2025).

3. Einfluss von APV- und PV-Anlagen auf meteorologische Variablen

3.1 Temperatur

Der Einfluss einer APV-Anlage auf die Luft- und Bodentemperatur im unter den Modulen liegenden Bereich wurde in diversen Feldstudien erforscht. Die Untersuchungen sind meist Teil von Tests zum Anbau unter APV, bei denen parallel

das Mikroklima erforscht wird. Die Boden- und Lufttemperatur sind ausschlaggebend für das Wachstum von Pflanzen und damit für die Wahl der anzubauenden Kultur. Jedoch gibt es auch Forschung in herkömmlichen Freiflächen-Anlagen. Hier findet die Untersuchung der Boden- und Lufttemperatur vor allem in Verbindung mit der Evapotranspiration statt. Weiterhin beeinflusst die Lufttemperatur die Temperatur der Panels und damit deren Effizienz, welche bei Hitze sinkt. Die Konstruktion der Anlage und der Standort sind Faktoren, die beim Vergleich der Ergebnisse herangezogen werden müssen.

Weselek et al. (2021) prüften die Bodentemperaturen über 2 Jahre bei Untersuchungen 2017 und 2018 in der hochaufgeständerten Anlage Heggelbach in Süddeutschland. Ab April bis Oktober wurden unter der APV-Anlage größtenteils niedrigere Bodentemperaturen gemessen (Abbildung 7). In den Wintermonaten glich sich die Bodentemperatur an und war unter der Anlage sogar teilweise größer als auf der Referenzfläche.

Feistel et al. (2022 b) beschäftigten sich 2019-2020 im Rahmen von Untersuchungen zur Evapotranspiration mit der Bodentemperatur unter bodennaher PV im Solarpark Boxberg und fand ähnliche Ergebnisse (Abbildung 8). In den Wintermonaten wurde unter den Solarpanels eine Bodentemperatur gemessen, die ca. 1,4-Fach größer war, als die Bodentemperatur der Referenzfläche. Ab April konnte eine Verschiebung der Messwerte erkannt werden. Im April war die Bodentemperatur unter den Panels im Schnitt nur 0,88 mal so groß wie auf der Referenzfläche, was sie mit der verringerten eintreffenden Strahlung begründet.

Choi et al. konnten 2023 in einer Freiflächen-Anlage keine Kühleffekte durch Verschattung feststellen. Er stellte jedoch unter den Modulen eine geringere Anfälligkeit für extreme Bodentemperaturen im Vergleich zur Referenz fest.

Barron-Gafford et al. (2016) konnten in einer bodennahen PV-FFA in einer Semi-ariden Zone eine fast permanent erhöhte Lufttemperatur über der Anlage im Vergleich zur Referenzfläche messen, wobei vor allem Nachts der Temperaturunterschied mit 3-4° C am größten war. Hierbei wirken die sich stark erheizenden Panels als Wärmespeicher. In hochaufgeständerten Anlagen wurden teils andere Ergebnisse gefunden.

Im Gegensatz dazu konnten Barron-Gafford et al. (2019) eine durchschnittlich 1,2° kühlere Temperatur am Tag unter einer POV-Anlage messen. In derselben Untersuchung wurden in der Nacht im Durchschnitt 0,5° wärmere Temperaturen unter der Anlage gemessen.

Jiang et al. (2022) konnten in einer hochaufgeständerten APV-Anlage für Kiwis in Südwest-China keine signifikanten Unterschiede in der Lufttemperatur messen. In einer anderen Untersuchung von 2018 wurde der Lufttemperatur-Unterschied zur Referenzfläche nur teilweise als signifikant befunden. Die Temperaturunterschiede direkt über dem Boden und direkt unter der Modulfläche waren nicht signifikant. Im

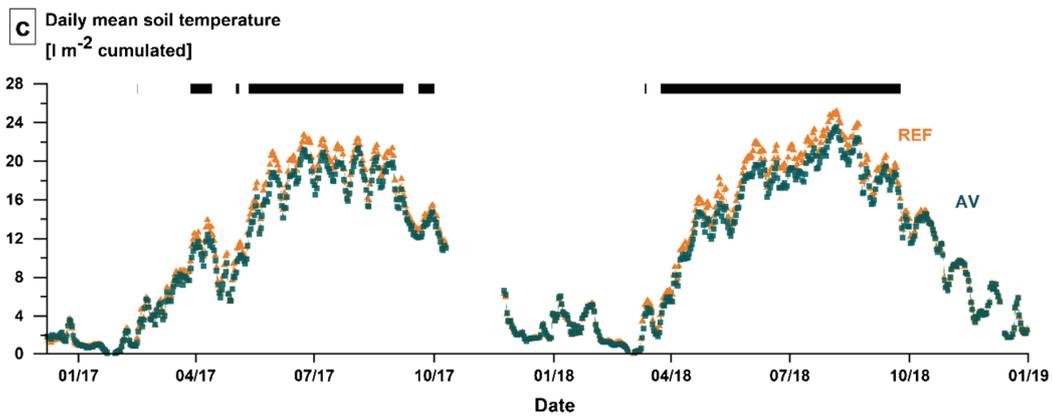


Abbildung 7: Tägliche mittlere Bodentemperatur der APV-Fläche und der Referenzfläche in 2017 und 2018 in Heggelbach, Süddeutschland. In den Bereichen der schwarzen Balken wurden signifikante Unterschiede gemessen (Weselek et al., 2021).

Bereich von 0,5 m bis 1,2 m über dem Boden war die Luft der Referenzfläche wärmer, wobei aber nur ein geringfügiger Unterschied gemessen werden konnte (Adeh et al., 2018). Juillion et al. (2022) untersuchten die Temperatur in einer hochaufgeständerten APV-Anlage im Apfelanbau in Südfrankreich über drei Jahre von 2019 bis 2021. In den Mittagsstunden der Sommermonate stellte er die größten Temperaturunterschiede zur Referenzfläche fest. Unter den Modulen konnte eine bis zu 3,8°C niedrigere Temperatur gemessen werden (Abbildung 9).

Ein weiterer Aspekt, der aber die Anlage als solches betrifft, ist die Temperatur der Panels. Selbst in Mitteleuropa kann die Temperatur der Panels bei Sonneneinstrahlung weit über 40° C steigen, was ihre Leistung hemmt (Lubón et al. 2020). Die Effizienz von Solarpanels kann durch Kühlung um bis zu 47 % erhöht werden (Bilen et al. 2023).

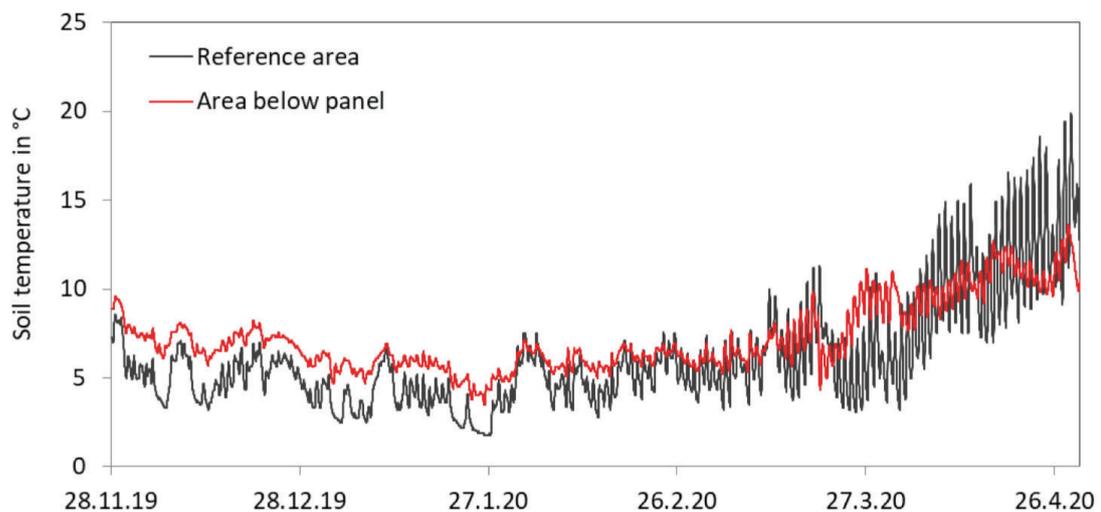


Abbildung 8: Bodentemperatur in der APV-Fläche und der Referenzfläche von 2019 bis 2020 in einer Tiefe von 10 cm im Solarpark Boxberg, Sachsen (Feistel, 2022b).

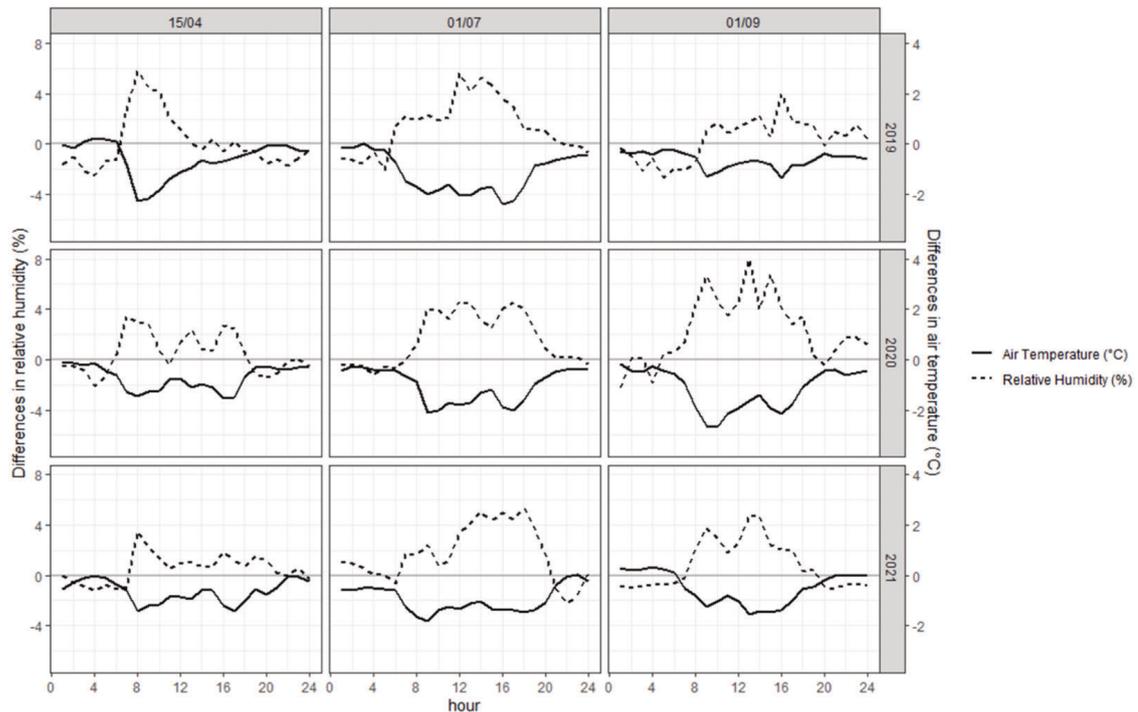


Abbildung 9: Unterschiede in Lufttemperatur (°C) und relativer Luftfeuchtigkeit (%) zwischen verschütteter Fläche und Kontrollfläche an drei sonnigen Tagen in den Jahren 2019, 2020 und 2021 in Südfrankreich (Juillion et al., 2022).

Die effizienteste Art, die Module zu kühlen, ist ein dünner Wasserfilm aus kaltem Leitungs-, Brunnen-, oder Regenwasser (Lubón et al., 2020). Im Experiment konnte die Modultemperatur damit von 45° C auf 25° C abgekühlt werden. Hier besteht Forschungspotenzial für die Kombinationen aus Rainwater-Harvesting und Modulkühlung.

3.2 Niederschlag

Agri-Photovoltaik-Systeme haben durch ihre Struktur Einfluss darauf, wie Niederschlag auf den Boden gelangt. Die Niederschlagsverteilung ist durch APV-Anlagen ungleichmäßiger, da Teile des Niederschlags zwischen den Modulreihen auftreffen und andere auf den Modulen, wodurch sie abgeleitet werden.

Das auftreffende Wasser fließt über die Module ab und gelangt, sofern keine anderen Maßnahmen wie Ableitung oder Rainwater-Harvesting mit Rinnen ergriffen werden, über die Abtropfkante auf den Boden (Abbildung 10). Der Großteil der Untersuchungen bezieht sich auf die räumliche Verteilung des Niederschlags in APV-Anlagen und insbesondere auf das Verhalten des Wassers unter der Abtropfkante.

In der Pilotanlage in Heggelbach (Süddeutschland) ist die auftreffende Wassermenge unter den Abtropfkanten der Module (750-950 l/m²) deutlich höher als die zwischen den

Modulen (200-300 l/m²), da der Regen konzentriert von der Kante abfließt (Weselek et al., 2021) (Abbildung 11). Auch zwischen den Modulreihen fand man eine ungleiche Niederschlagsverteilung: Hinter den Modulen, also entgegengesetzt ihrer Ausrichtung, ist die Niederschlagsmenge sehr klein. In Richtung des nächsten Moduls ist sie ansteigend.

Die heterogene Niederschlagsverteilung unter Solarpanels wurde auch 2017 schon erforscht. Das Verteilungsmuster des Niederschlags ist abhängig vom Aufbau und den Dimensionen der APV-Anlage und insbesondere der Anordnung der Solarpanels. Hierbei haben die Höhe der Anlage, der Abstand zwischen den Modulreihen, der Spaltenabstand zwischen den Modulen, die Länge der Solarpanels sowie ihr Neigungsgrad Einfluss auf die Niederschlagsverteilung.

Als natürliche Einflüsse sind die Windrichtung und Windstärke sowie der Tropfendurchmesser einzuordnen (Elamri et al., 2018).

In der bodennahen Forschungsanlage im Solarpark Boxberg wurde von 2017-2021 ebenfalls die Niederschlagsverteilung geprüft. Hier stellte man auf Flächen unterhalb der Module eine geringeres Niederschlagsdargebot fest, während das es zwischen den Modulreihen mit der Referenzfläche vergleichbar war. Zudem wurde auch hier befunden, dass die Niederschlagsmenge unter der Abtropfkante der Module größer ist (Feistel et al., 2022).

Auch in der Überkopf-APV-Anlage in Lüchow wurde die Niederschlagsverteilung untersucht (Meinardi et al., 2025). Vor allem unter der Abtropfkante wurde teilweise doppelt so viel Niederschlag ausgemacht wie auf der Referenzfläche. Außerdem wurde auf der gesamten Fläche eine inhomogenere Niederschlagsverteilung ersichtlich. Dieselbe Untersuchung wurde nach Installation einer Regenrinne durchgeführt. Die Wirkung der Abtropfkante konnten stark abgemildert, aber insbesondere bei Starkregen durch die zu kleine Dimensionierung der Rinne nicht beseitigt werden (Abbildung 12).

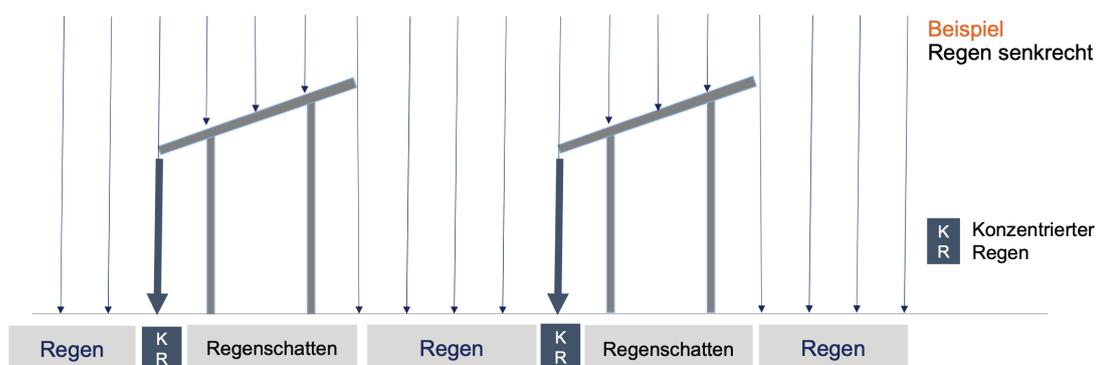


Abbildung 10: Niederschlagsverteilung in bodennahen APV-Anlagen nach Feistel (Feistel et al., 2025).

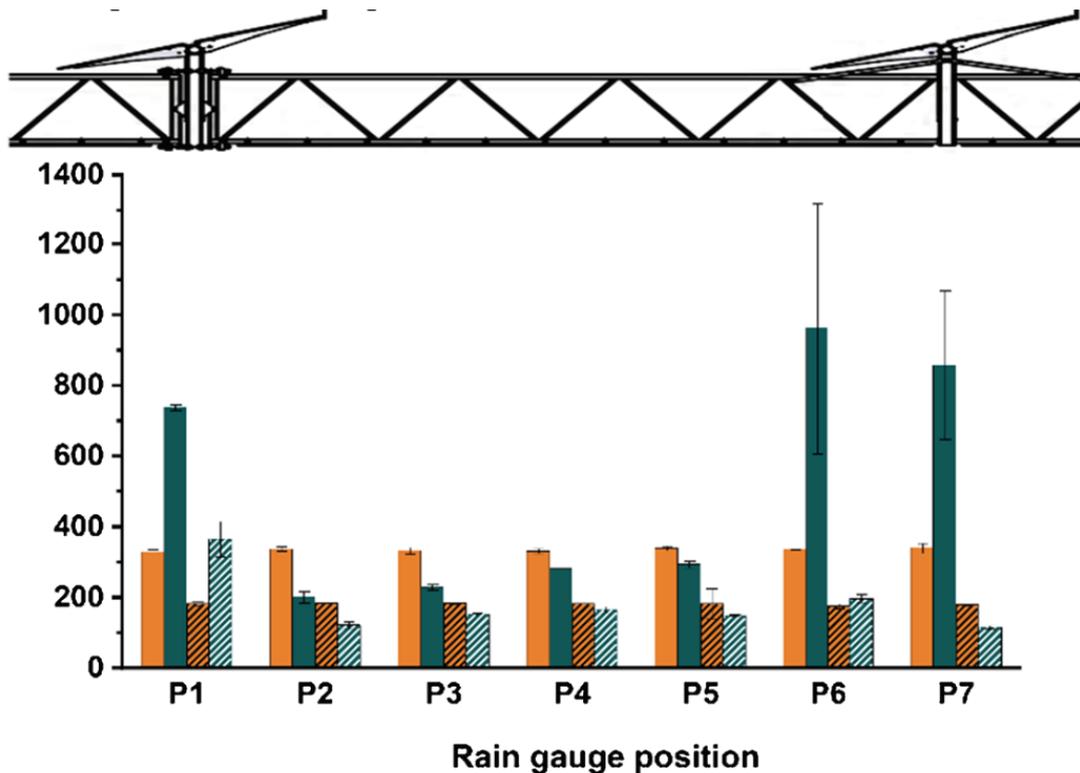


Abbildung 11: Niederschlagsverteilung unter der APV- Anlage und auf der Referenzfläche in Liter pro m² in der APV-Anlage in Heggelbach, Süddeutschland (Weselek et al., 2021).

Auch die Zwischenräume, die sich zwischen den einzelnen Modulen befinden, tragen zur Änderung der Niederschlagsverteilung bei. Meinardi et al. (2025) untersuchten die Niederschlagsverteilung unter einem einzelnen Panel. An den Zwischenräumen sammelte sich vermehrt Wasser und es gelangte an diesen Stellen mehr Niederschlag zu Boden als in der Mitte des Moduls (Abbildung 13).

Die unregelmäßige Wasserverteilung und die Effekte der Abtropfkante haben Einfluss auf Bodenqualität und die angebauten Kulturen.

Die Konzentration des Niederschlags sorgt für eine Änderung des Bodenwasserhaushalts (siehe Kapitel 3.6) und eine Wassersättigung in den betroffenen Bereichen.

Hierdurch kommt es zu einem erhöhtem Run-Off, also Abfließen des Wassers über die Oberfläche, was negative Einflüsse auf den Boden hat und zu Wasserverlust sorgt (Rößner, 2022).

Elamri et al. beobachteten außerdem, dass die Konzentration des Wassers auf den Panels zu einer, im Vergleich zur Referenzgröße, Vergrößerung des Tropfendurchmessers führt (Abbildung 14). Das größere Volumen führt zu einer Erhöhung des Tropfengewichts und damit der Plantschwirkung, die wiederum zur Verstärkung der Regentropfenerosion (Splash-Erosion) führt (Elamri, et al., 2018).

Diese kann, in Abhängigkeit von Bewuchs und Bodenart, für Verschlammung und Auswaschung von Nährstoffen und anderen Bodenbestandteilen führen und die Bildung von Mikrotopografien begünstigen. Diese beherbergen die Gefahr, für weitere Niederschläge als Ablaufrinne zu wirken und somit die heterogene Wasserverteilung noch zu verstärken (Fernandez-Raga et al., 2017).

Weiterhin kann der Niederschlag auch direkte Auswirkungen auf die Kulturen haben. Durch die verstärkte Bildung großer Tropfen besteht die Gefahr der Beschädigung von Kulturen wie z.B. Blattgemüse, wenn diese in der Nähe der Abtropfkante platziert sind (Elamri, et al., 2018). Für eine Schutzwirkung sollten die Kulturen so angebaut werden, dass sie von den Modulen vor Starkregen abgeschirmt werden.

Der Einsatz von trackingfähigen Modulen ermöglicht Einflussnahme auf das Verteilungsmuster des Niederschlags. Versuche sowie eine Simulation von Elamri et al. (2018) zeigen, dass sich die Heterogenität der Niederschlagsverteilung erhöht, wenn die Solarpanels dem Wind entgegengerichtet werden. Zudem legt er eine „Avoidance-Strategy“ vor, bei der die Verteilung des Niederschlags gesenkt werden konnte, indem die Module der Windrichtung so angepasst wurden, dass die Niederschlagsverteilung möglichst homogen erfolgte (Abbildung 15).

Trotzdem ist anzumerken, dass die Abtropfkanten der Solarpanels immer für eine gewisse Unregelmäßigkeit in der Verteilung des Niederschlags sorgen. Dieser Effekt kann durch die Installation von Rinnen, die das Wasser ableiten oder in Speichertanks führen, verhindert werden.

Weiterhin besteht Entwicklungspotenzial bei der Integration von Bewässerungsanlagen wie Sprinklern oder Anlagen, die Regenwasser direkt unter dem Modul verteilen und so

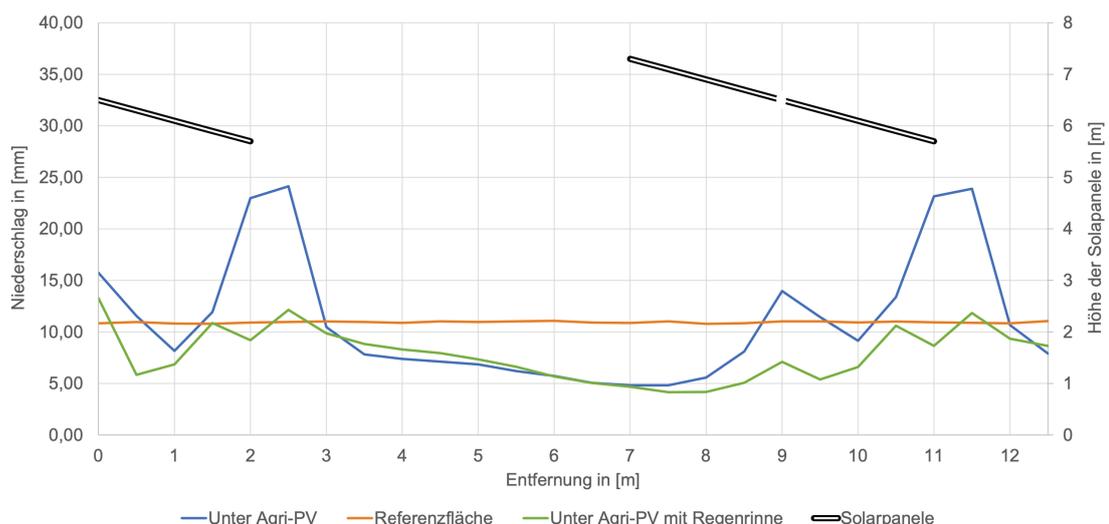


Abbildung 12: Niederschlagsverteilung unter den Modulen (mit und ohne Rinne) sowie auf der Referenzfläche in der APV-Anlage in Lüchow (Meinardi et al., 2025).

zur gleichmäßigen Wasserverteilung beitragen (Rößner, 2022) (siehe Kapitel 4). Durch die Stromproduktion der APV-Anlage und die Möglichkeit, Monitoring-Vorrichtungen zu installieren, besteht hier die Möglichkeit des autarken Betriebs von Bewässerungsanlagen.

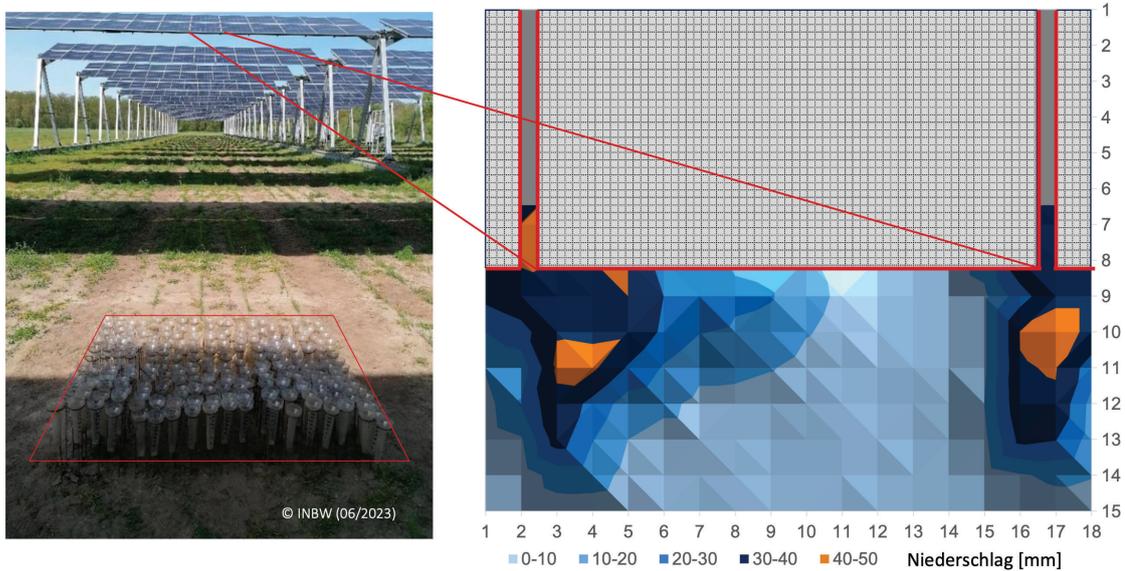


Abbildung 13: Niederschlagsverteilung unter einem Solarmodul in der APV-Anlage in Lüchow (Meinardi et al., 2025).

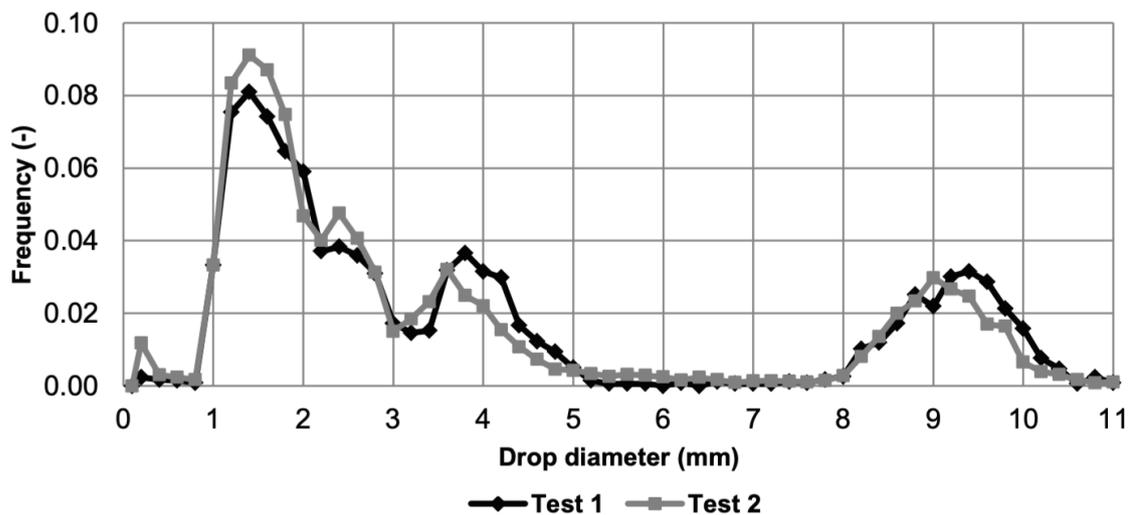


Abbildung 14: Durchmesser der Regentropfen, die von der Abtropfkante der Solarpanels fallen in zwei Tests. Gemessen in der APV-Anlage in Lavalette, Südfrankreich (Elamri et al., 2018).

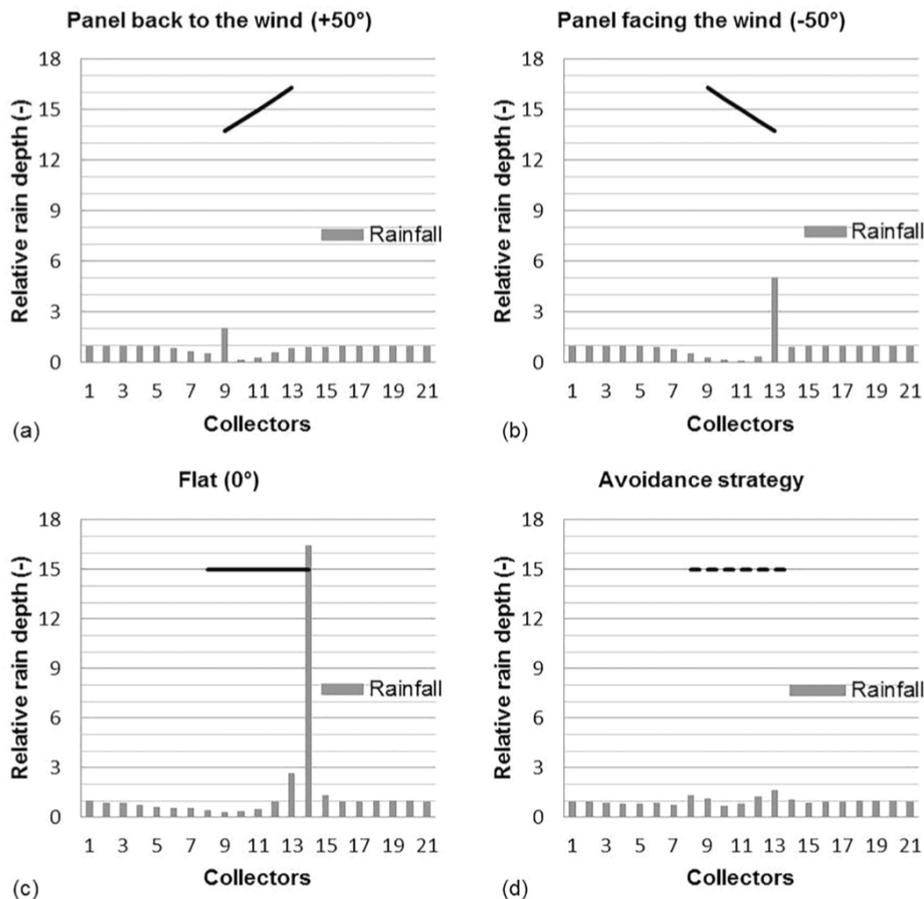


Abbildung 15: Niederschlagsverteilung, gemessen bei verschiedenen Modulstellungen in der APV-Anlage in Lavalette, Südfrankreich (Elamri et al., 2018).

3.3 Relative Luftfeuchtigkeit

Die relative Luftfeuchtigkeit ist ein wichtiger Parameter für das Wachstum von Kulturpflanzen. Sie ist abhängig von der Temperatur und wird unter anderem von der Transpiration und der Evaporation beeinflusst. In diversen Versuchen, die sich mit dem Wasserkreislauf in APV-Anlagen beschäftigen, wurde die Luftfeuchtigkeit unter der Anlage untersucht.

Jiang et al. (2022) untersuchten die Luftfeuchtigkeit unter einer Kiwi-Anlage in Jhinazou, China im Rahmen von Forschungen zur Wassereffizienz (Abbildung 16). Hierfür wurde eine APV-Anlage mit drei verschiedenen Verschattungsraten installiert, um die Untersuchungen in Abhängigkeit zu diesen führen zu können. Der Abstand zwischen den Modulreihen betrug in der Anlage ca. 1,5 m. Für die Messungen der relativen Luftfeuchtigkeit wurden Thermohygrometer in einer Höhe von 2,0 m über der Oberfläche platziert.

Obwohl die Anlage keinen signifikanten Einfluss auf die anderen gemessenen mikroklimatischen Variablen hatte, wurde bei der relativen Luftfeuchtigkeit unter der

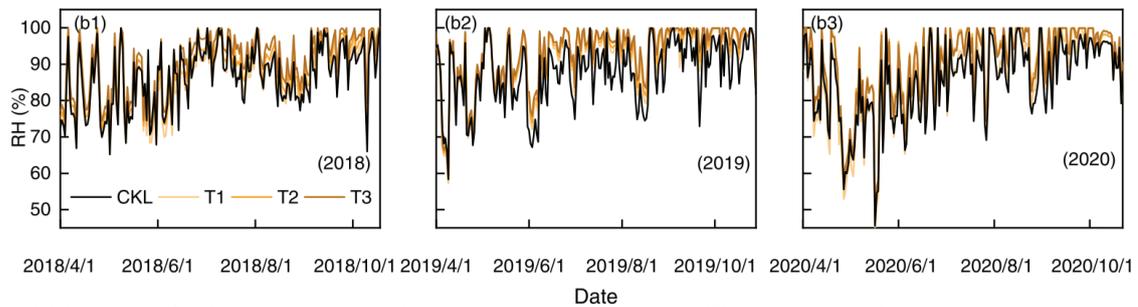


Abbildung 16: Dynamik der relativen Luftfeuchtigkeit (RH (%)) b1-b3) auf der Referenzfläche im Vergleich zu drei Flächen unter jeweils unterschiedlich lichtdurchlässigen PV-Panels (T1= 19 % Verschattung; T2= 30,4 % Beschattung; T3= 38 % Beschattung) zwischen 2018 und 2020 in Südwest-China (Jiang et al. 2022).

Anlage ein signifikanter Anstieg von bis zu 6,5 % bei dem höchsten Verschattungsgrad. (38 % Verschattung) im Vergleich zur Referenzfläche gemessen. Hierbei zeigte sich ein Zusammenhang zwischen dem Verschattungsgrad der Anlage und der steigenden Luftfeuchtigkeit.

Auch in Forschung von Adeg et al. (2018) wurde die Luftfeuchtigkeit gemessen. In dieser Anlage sind die Modulreihen 6 m voneinander entfernt. Die Variablen wurden in diesem Versuch im Zentrum der Anlage auf vier verschiedenen Höhen gemessen. In allen vier Höhen wurden für Luftfeuchtigkeit im Vergleich zur Referenzfläche signifikant kleinere Werte gemessen (Abbildung 17).

In La Pugère in Südfrankreich wurde die relative Luftfeuchtigkeit in einer Apfelplantage mit APV-Anlage untersucht (Juillion et al., 2022). Die PV-Module sind in 5 m Höhe installiert und der Reihenzwischenraum ist ca. 2,3 m breit. In diesem Fall wurden die Werte in 2 m Höhe mit zwei Hygrometern in der APV-Fläche gemessen. Während in der Nacht keine Unterschiede zwischen Versuchs- und Referenzflächen entdeckt werden konnten, wurde herausgefunden, dass die Luftfeuchtigkeit am Tag höher ist als auf der Referenzfläche. Juillion et al. beschreiben außerdem eine hohe Varianz in den Jahreszeiten. Die größten Unterschiede wurden im Juli gemessen, wobei ein Maximum von 14 % mehr Luftfeuchtigkeit im Vergleich zur Referenzfläche gemessen werden konnte.

Table 1. Mean/Std and p-values from solar panel and control area Two-sample Kolmogorov-Smirnov, t tests and William Watson test.

Elevation (m)		0.5	1.2	2.0	2.7
Relative humidity (%)	Mean/Std (solar panel area)	65.62/0.226	64.17/0.252	64.29/0.209	64.92/0.230
	Mean/Std (control area)	66.23/0.234	66.38/0.242	64.89/0.222	65.37/0.223
	p-values (KS test)	0.0004	0.3611	0.7014	0.6703
	p-values (t test)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0118

Abbildung 17: Mittlere relative Luftfeuchtigkeit in der APV-Fläche und der Referenzfläche mit Standardabweichung und statistischen Tests (t-Test und Kolmogorov-Smirnov-Test), gemessen in verschiedenen Höhen in Oregon, USA (Adeg et al., 2018).

3.4 Potenzielle Evapotranspiration (klimatisches Potenzial)

Die potenzielle Evapotranspiration (ET_0) ist eine Variable, die von verschiedenen Faktoren beeinflusst wird, und die sich auf die tatsächliche Evapotranspiration auswirkt.

„Die potentielle Verdunstung ist als das Wasservolumen definiert, das eine ganz oder teilweise mit Vegetation bedeckte, unter optimaler Wasser- und Nährstoffversorgung stehende Fläche bei ungehindertem Wassernachschub unter den gegebenen meteorologischen, bodenphysikalischen und vegetationspezifischen pflanzenbaulichen Randbedingungen pro Zeiteinheit maximal an die Atmosphäre abgibt“ (Baumgartner et al., 1990).

Das klimatische Potenzial wird unter anderem von der Windgeschwindigkeit, der Lufttemperatur, dem Dampfdruckdefizit und der auftreffenden Nettostrahlung beeinflusst. Diese Werte werden auf Höhe der Bodenoberfläche gemessen. Durch die Verschattung der APV-Anlage wird der Anteil der auftreffenden Strahlung reduziert, was den größten Einfluss auf das klimatische Potenzial in Bodenhöhe hat. Im Gegensatz dazu befanden Marrou et. al (2013 b) jedoch, dass sich die Anlage kaum auf Temperatur, Dampfdruckdefizit sowie Windgeschwindigkeit auswirkt.

Marrou et al. (2013) untersuchten die potenzielle Evapotranspiration in einer APV-Anlage in Marseille in der über 160 Tage in zwei verschiedenen Graden der Verschattung sowie unter der vollen Sonne (Abbildung 18). Am Anfang der Saison wurde Salat angebaut. Zum Ende der Saison wurden Gurken angebaut.

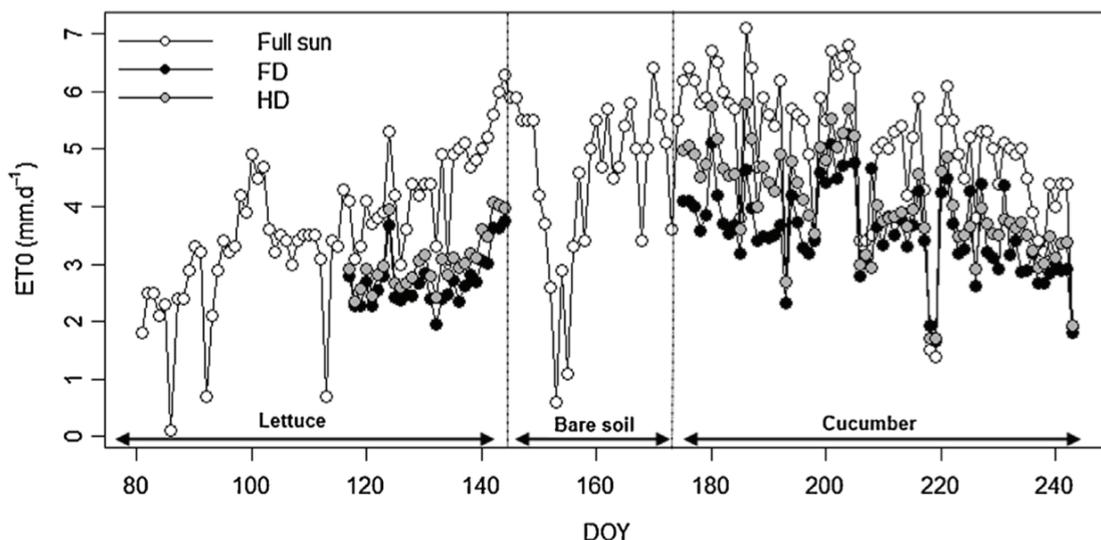


Abbildung 18: Potenzielle Evapotranspiration gemessen über 160 Tage in drei verschiedenen Stadien der Verschattung in einer APV-Anlage in Montpellier, Südfrankreich (Marrou et al., 2013)

Durch die Reduktion der Sonneneinstrahlung verringerte sich die potenzielle Verdunstung im Experiment auf 70 % unter einer vollbedeckten Anlage (auf 78 % in einer teilbedeckten Anlage) im Vergleich zum Referenzfeld unter voller Sonne.

3.5 Evapotranspiration

Durch den Einfluss ihrer Struktur auf die einfallende Sonnenstrahlung geht man davon aus, dass Agri-PV-Anlagen Einfluss auf die Evapotranspiration sowie deren räumliche Verteilung hat.

Die Evapotranspiration wird in die Transpiration der Pflanzen und die Evaporation durch den Boden eingeteilt. Sie hat vier Haupttreiber: die potenzielle Verdunstung in Bodenhöhe, der von den Pflanzen aufgenommene Anteil der Strahlung (Bodenbedeckungsgrad), die Stomata-Leitfähigkeit der Pflanzen und die hydraulischen Leitfähigkeit der Bodenoberfläche. (Marrou et al., 2013)

Diese vier Haupttreiber der Evapotranspiration werden von der APV-Anlage mehr oder weniger beeinflusst. Die Evapotranspiration kann mithilfe von Lysimetern oder Atmometern gemessen werden. Außerdem kann die Evapotranspiration berechnet werden (z.B. nach Penman-Monteith) (Zotarelli et al., 2010).

In Versuchen von 2013 konnten Marrou et al. zeigen, dass der Wasserverlust durch Evapotranspiration im Bereich unter einer APV-Anlage auf 86 %- 71 % im Vergleich zur Referenzfläche sinkt. Dabei spielen der Flächenanteil der Verschattung und die Art der angebauten Feldfrucht eine Rolle. Die stärkste Eindämmung der Evapotranspiration konnte unter voller Verschattung beim Anbau von Salat erreicht werden.

Während sie bei der Pflanzentranspiration ausschließlich Verringerungen feststellten, wurde die Evaporation durch die Bodenoberfläche beim Anbau von Gurken gar auf 113 % zur Referenzfläche erhöht. Das zeigt, dass die Wahl der Feldfrüchte, vor allem wegen ihres unterschiedlichen Bodenbedeckungsgrades, wichtig ist.

Marrou et al. führten die Reduzierung der Evapotranspiration vor allem auf die Reduktion der potentiellen Verdunstung zurück, die wiederum durch die Reduktion der auftreffenden Sonneneinstrahlung verringert wird. (Marrou et al., 2013)

In einem weiteren Versuch von Feistel et al. (2022 b) wurde die Evaporation gemessen (Abbildung 19). Diese wurde täglich mit Lysimetern aufgezeichnet. Die Evapotranspiration unter der APV-Anlage überschritt die der Referenzanlage in den Wintermonaten bis zum Beginn der Vegetationszeit. Mit dem Beginn der Vegetationszeit stieg die Evapotranspiration auf der Referenzfläche stärker an und überschritt die der APV-Anlage ab Anfang März konstant. Die Evapotranspiration unter der APV-Anlage erhöhte sich weitaus langsamer. Auch Feistel et al. (2022 b) gehen davon aus, dass die Reduktion der auftreffenden Strahlung durch die Verschattung

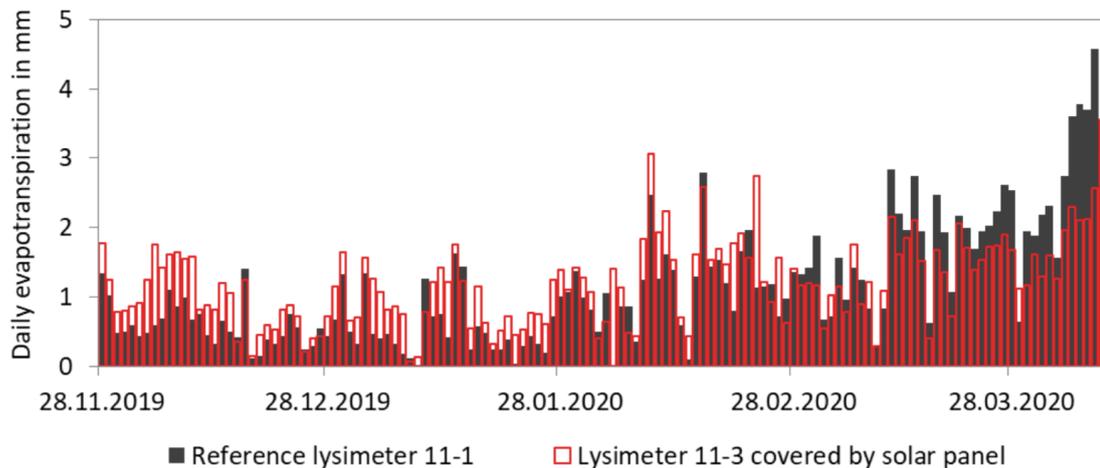


Abbildung 19: Tägliche Evapotranspiration unter Solarmodulen und der Referenzfläche im Winter 2019/ 2020 in der Lysimeterstation in Brandis (Feistel, 2022).

maßgeblich für die Reduktion der Evapotranspiration ist, da sie die Bodentemperatur niedrig hält. (Ebd.)

Omer beschränkte sich 2022 auf die Untersuchung der Bodenevaporation unter speziell konstruierten APV-Anlagen, die für eine bessere Lichtverteilung unter den Anlagen sorgen sollen. Hier konnte eine Reduktion der Evaporation von 14 % - 33 % erreicht werden (Omer, 2022).

Auch Liu et al. (2019) stellten eine Reduktion der Evapotranspiration in einer PV-Anlage in der ariden Zone Chinas fest. Auf der Referenzfläche beobachteten sie eine doppelt so hohe Evapotranspiration im Vergleich zur Fläche unter den Modulen. Sie war auch 1,5-Fach höher als im Modulzwischenraum.

Von 2018 bis 2021 wurden auch an der HTW Dresden Versuche zur Evapotranspiration unter APV-Modulen durchgeführt. In der Pilotanlage Pillnitz war in 13 Trockenperioden, in denen gemessen wurde, die Evapotranspiration unter der APV-Anlage geringer. Der Maximalunterschied betrug ca. 2 mm Verdunstung pro Tag, die unter der APV-Anlage eingespart werden konnte (Feistel et al., 2023).

Bei Untersuchungen im Solarpark Weesow wurde im Zeitraum vom 25. April bis zum 04. Mai 2022 die Verdunstung unter APV-Anlage untersucht. Auf der Referenzfläche verdunsteten im untersuchten Zeitraum 8 mm mehr Grundwasser. (Feistel et al., 2023)

Auch Forschung aus China widmete sich der Messung der Evapotranspiration unter APV-Anlagen über zwei Jahre hinweg (Jiang et al., 2022). Die Transpiration der Kiwibäume und die Evaporation des Bodens wurden getrennt gemessen (Abbildung 20). Es wurden drei verschiedene Module mit unterschiedlich großer Transluzenz verwendet, wobei das am wenigsten transluzente Modul die größten Evapotransparationsersparnisse ermöglichte. Es konnten Einsparungen bei der

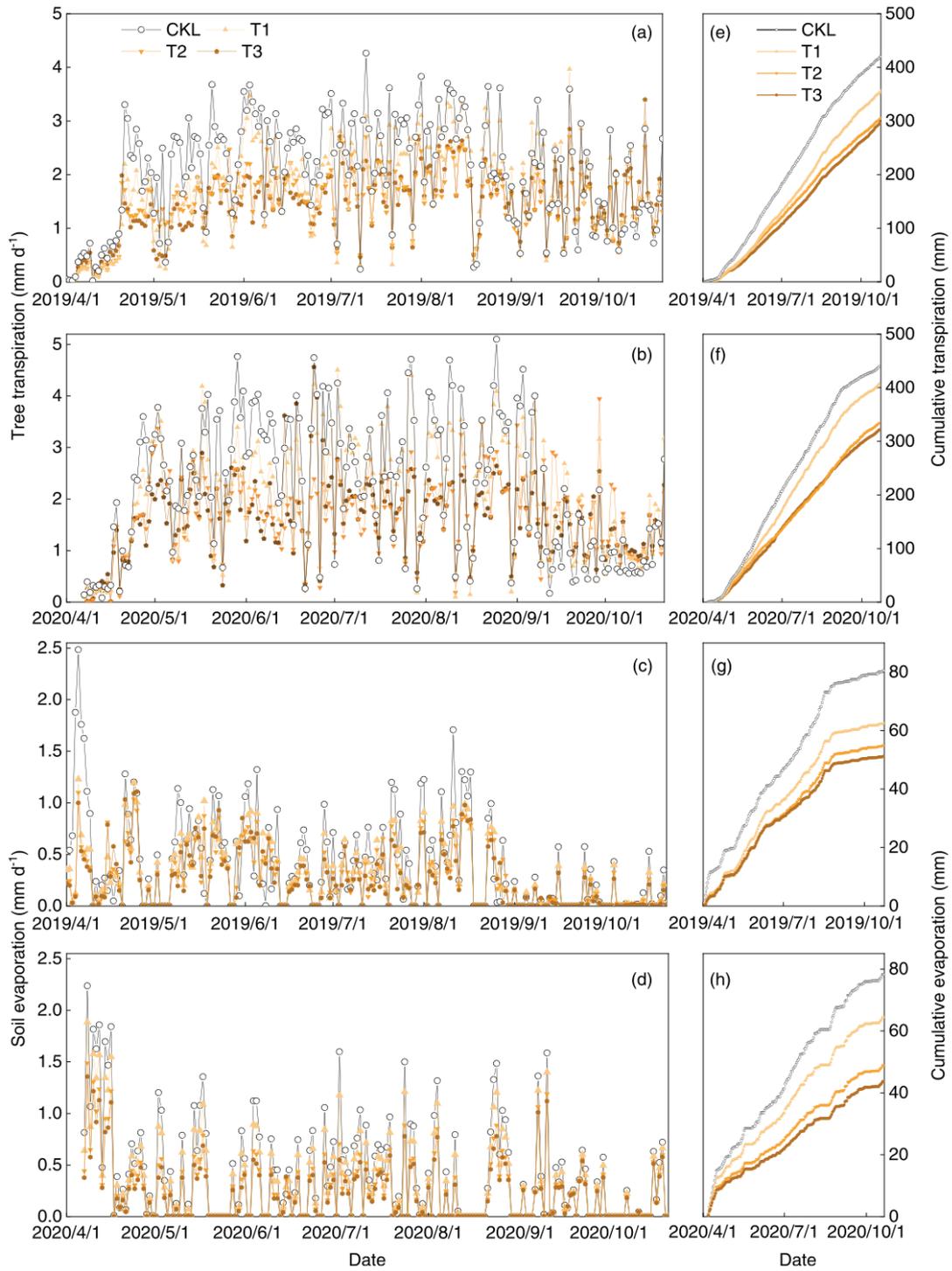


Abbildung 20: Dynamik der Evaporation und der Transpiration auf der Referenzfläche im Vergleich zu drei Flächen unter jeweils unterschiedlich lichtdurchlässigen PV-Panels (T1= 19 % Verschattung; T2= 30,4 % Beschattung; T3= 38 % Beschattung) zwischen 2018 und 2020 in einer APV-Anlage für Kiwi in Südwest-China (Jiang et al. 2022).

Evapotranspiration von 46 mm - 153 mm Wasser pro Vegetationssaison ausgemacht werden.

Keinath (2021) stellte eine Verminderung der Evapotranspiration in Abhängigkeit von der angebauten Feldfrucht fest. Die Untersuchungen in humidem Klima in der Überkopf-Pilotanlage in Heggelbach (Süddeutschland) zeigten, dass beim Kartoffelanbau eine Verminderung der Evapotranspiration von über 23 % möglich ist. Der Anbau von Klee gras (ca. 15 %) und Sellerie (ca. 14 %) ermöglicht kleinere Einsparungen. Beim Anbau von Winterweizen wurde lediglich eine Reduktion von ca. 9 % im Vergleich zur Referenzfläche gemessen.

Meinardi et al. (2025) bestätigen eine drastische mögliche Verminderung der Evapotranspiration unter APV im Vergleich zur Referenzfläche möglich ist (Abbildung 21). Diese wurden mittels Penman-Monteith für die APV-Anlage in Lüchow berechnet.

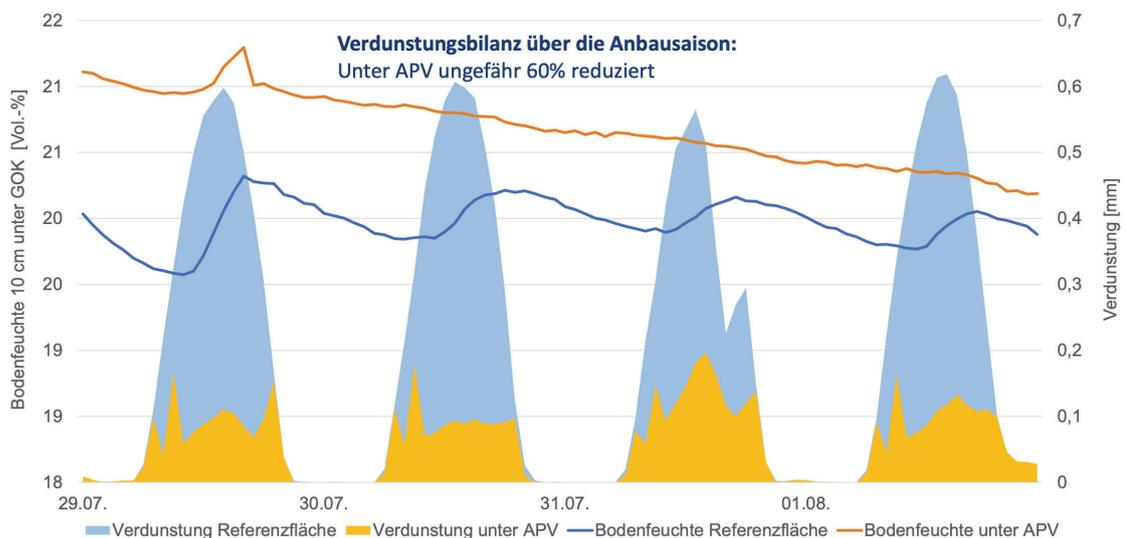


Abbildung 21: Entwicklung der Bodenfeuchte 10 cm unter Geländeoberkante und der Verdunstung in der APV-Anlage in Lüchow berechnet nach Penman-Monteith (Meinardi et al., 2025).

3.6 Bodenfeuchtigkeit

Die Bodenfeuchtigkeit wirkt als Indikator für Veränderungen der anderen mikroklimatischen Variablen (Feistel et al., 2025). Auch für die räumliche Verteilung von Niederschlag ist die Bodenfeuchte ein geeigneter Anzeiger. Sie „dient dabei als zuverlässig zu messender Indikator, der Veränderungen in den Komponenten der lokalen Wasserbilanz integrativ erfasst.“ (Feistel et al., 2022). Sie kann, unter anderem,

mit Bodensensoren gemessen werden, die an der beobachteten Stelle in der gewünschten Tiefe verlegt werden (Abbildung 22). Die Bodenfeuchte wird in vielen Untersuchungen ermittelt, die sich mit dem Wasserkreislauf in Agri-PV Anlagen auseinandersetzen, vor allem mit der räumlichen Verteilung. Die meisten Veröffentlichungen beziehen sich jedoch auf PV-Freiflächenanlagen und nicht auf Agri-PV. Für aussagekräftige Ergebnisse bietet sich der Vergleich der Bodenfeuchte unter den Modulen mit der Bodenfeuchte zwischen den Modulreihen, in verschiedenen Tiefen, an. Zur Bodenfeuchte und deren Verteilung gibt es mittlerweile diverse Untersuchungen. In der von Adeg et al. (2018) in Oregon untersuchten Anlage konnten räumliche Bodenfeuchteunterschiede ausgemacht werden. Sie wurde in drei verschiedenen Tiefen (20 cm, 40 cm und 60 cm) über 240 Tage geprüft (Abbildung 23). In den Modulzwischenräumen war sie geringer als auf der Referenzfläche. In den Bereichen die ganz oder teilweise verschattet waren, war sie jedoch höher. Die Unterschiede waren zum Ende des Sommers größer als zum Sommeranfang. In tieferen Schichten gemessen war die Temperatur am Sommeranfang annähernd gleich im beschatteten Bereich und auf der Referenzfläche. Das Tiefenprofil der Bodenfeuchtigkeit zeigt, dass die voll verschattete Fläche bis in tiefere Schichten eine größere Bodenfeuchte aufweist. Die größte Bodenfeuchtigkeit ließ sich im voll verschatteten Bereich messen (Abbildungen 24 und 25). Feistel et al. (2022) untersuchten die Bodenfeuchteverteilung in einer PV-Freiflächenanlage in Weesow. Im Untersuchungszeitraum war die mittlere Bodenfeuchte der Referenzfläche mit 7 % am geringsten. Unter den Modulen (9,8 %) und zwischen den Modulen (11,5 %) war sie höher. Die Ergebnisse zeigen, dass in Trockenperioden vor allem die Verdunstung auf die Bodenfeuchte einwirkt, welche unter den Modulen geringer ist. In Perioden mit Niederschlag stellen sich jedoch noch größere Unterschiede zwischen den

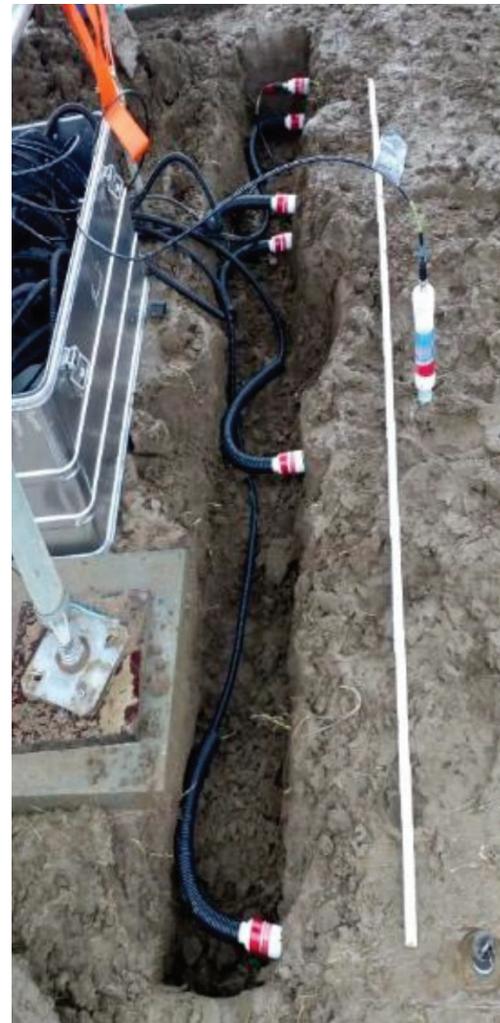


Abbildung 22: Messvorrichtungen für Messung der Bodenfeuchte und der Evapotranspiration in der APV-Pilotanlage in Pillnitz (Feistel et al., 2025).

Modulreihen und den Modulzwischenräumen ein, da das Regendargebot unter den Modulen stark eingeschränkt ist, in den Zwischenräumen jedoch mit dem der Referenzfläche vergleichbar ist. Liu et al. (2019) untersuchte die Bodenfeuchte in einer PV-Anlage in der ariden Zone Chinas. Hier wurde für die Fläche unter den Modulen eine doppelt so hohe Bodenfeuchte im Vergleich zur Referenzfläche und zwischen den Modulreihen eine 1,5 mal höhere Bodenfeuchte ermittelt. Bei Untersuchungen in der APV-Anlage in Lüchow wurde die Bodenfeuchtigkeit unter der Abtropfkante der Module, zwischen den Modulen und unterhalb der Module getrennt voneinander in Abhängigkeit von Niederschlag und Beregnung gemessen (Meinardi et al., 2025). Der Bereich unter der Tropfkante unterlag weitaus größeren Bodenfeuchteschwankungen als die anderen Flächen unter den Modulen. Dies bestätigt eine ungleichmäßigere Bodenfeuchte durch den Einfluss der Tropfkante (Abbildung 26). Über den gesamten Zeitraum war die Bodenfeuchte unter den Modulen größer als im Modulzwischenraum.

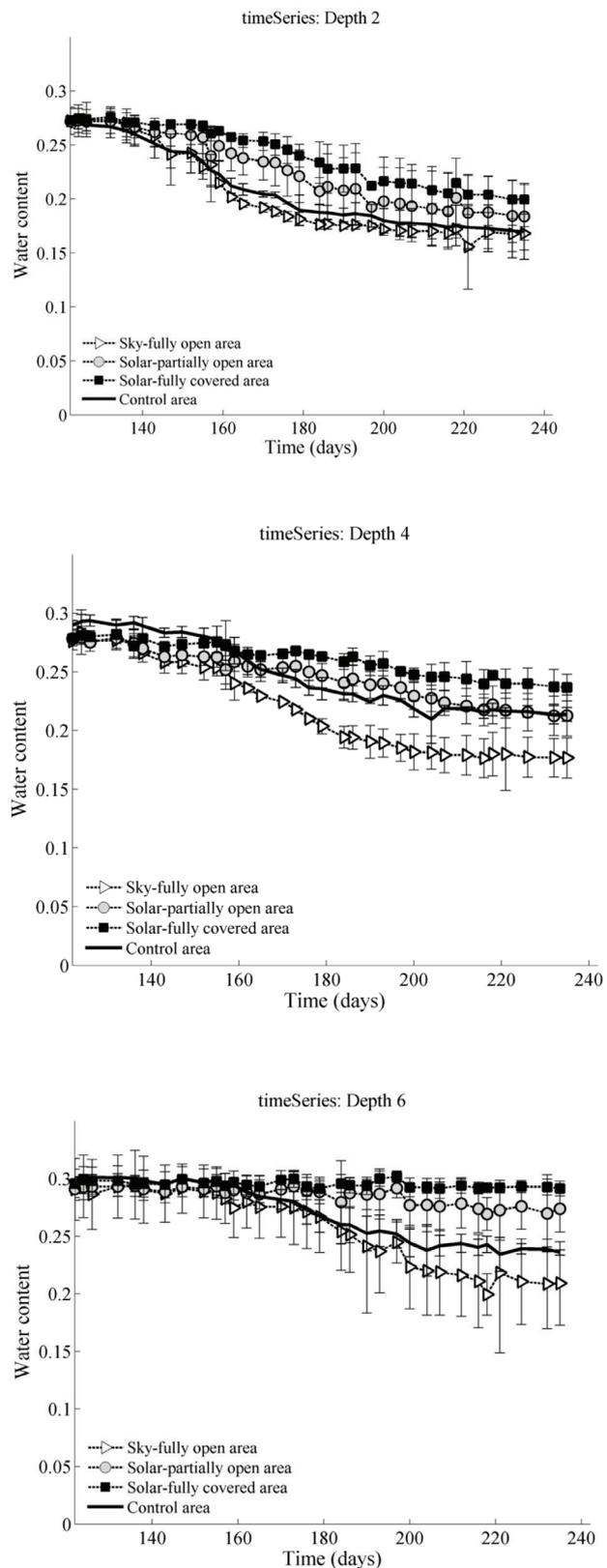


Abbildung 23: Entwicklung der Bodenfeuchte über 240 Tage unter drei verschiedenen Stadien der Verschattung und der Referenzfläche, gemessen in den Tiefen 20 cm, 40 cm und 60 cm (Adeh et al., 2018).

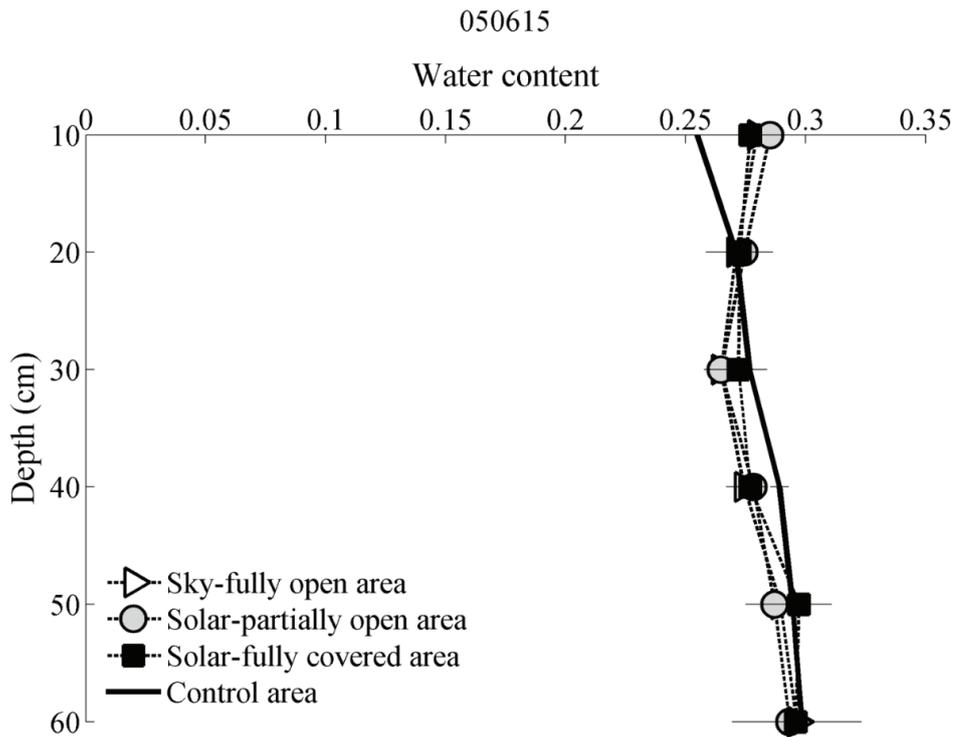


Abbildung 24: Tiefenprofil der Wasserverteilung in drei verschiedenen Verschattungszuständen und der Referenzfläche im Mai 2015 in einer APV-Anlage in Oregon, USA (Adeh et al., 2018).

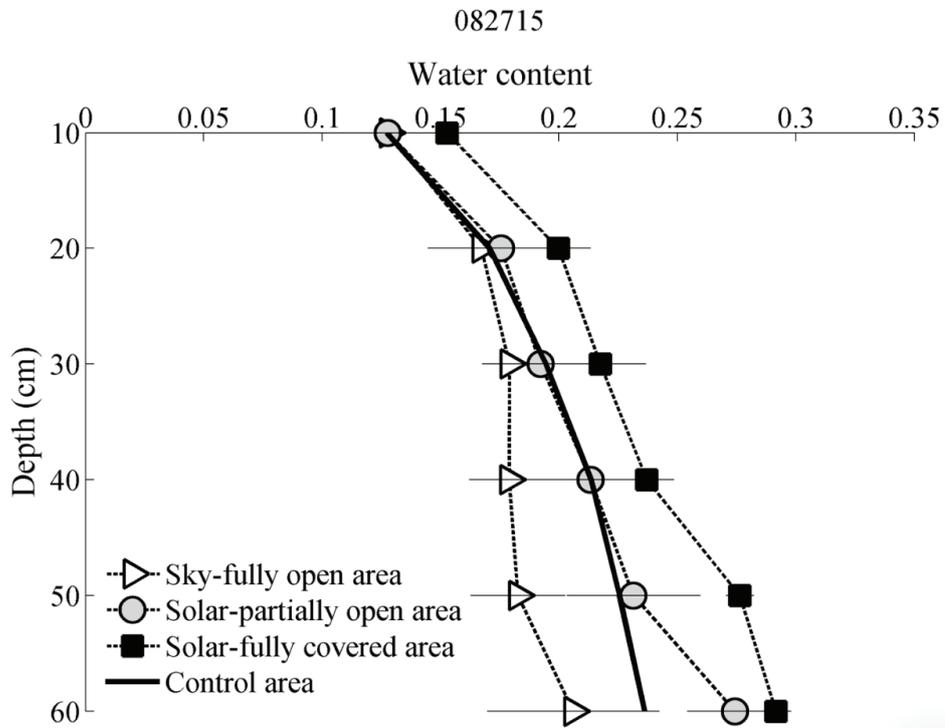


Abbildung 25: Tiefenprofil der Wasserverteilung in drei verschiedenen Verschattungszuständen und der Referenzfläche im August 2015 in einer APV-Anlage in Oregon, USA (Adeh et al., 2018).

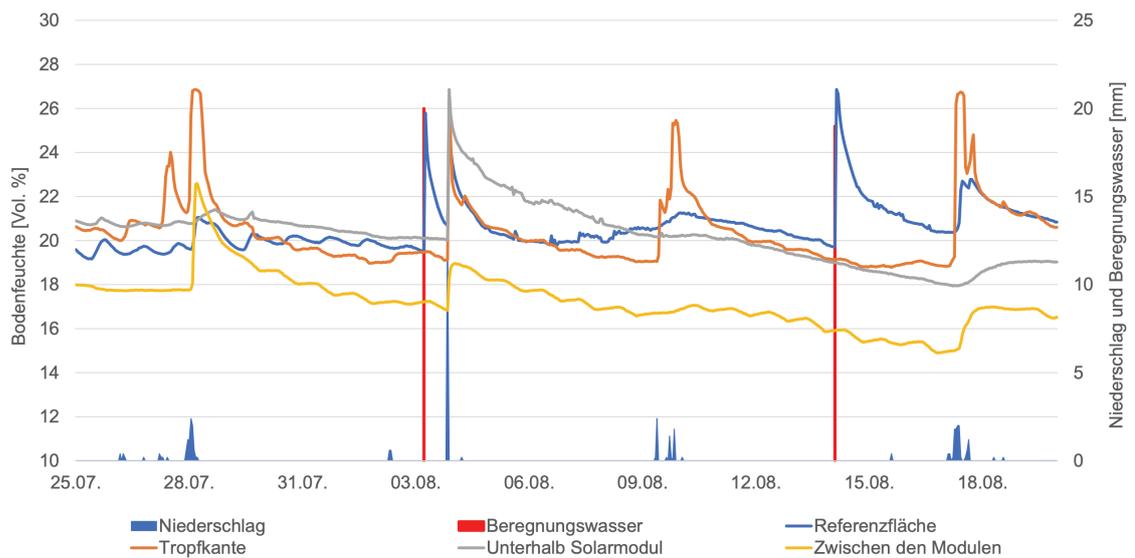


Abbildung 26: Entwicklung der Bodenfeuchte 10 cm unter Geländeoberkante unter Einfluss von Niederschlag und Beregnungswasser in der APV-Anlage in Lüchow (Meinardi et al., 2025).

3.7 Bodenerosion

Durch die ungleichmäßige räumliche Verteilung des Niederschlags in PV- und APV-Anlagen ist anzunehmen, dass auch die Erosionserscheinungen des Bodens mit unterschiedlich starker Intensität auftreten (Abbildung 27).

Ein Phänomen, das besonders in APV-Anlagen auftritt, ist die Bodenerosion durch Splash-Erosion. Sie hat ihren Ursprung an den Abtropfkanten der Module, wobei diese das Wasser konzentriert an den darunter liegenden Boden abgibt. Wird das Wasser unter der Abtropfkante aufgefangen und abgeleitet, kann die Spalsh-Erosion stark reduziert werden. Zudem gibt es die Möglichkeit, den Boden an anfälligen Stellen mit Erosionsmatten zu versehen. Diese lassen Vegetation (z.B. Blühstreifen) durchwachsen und stabilisieren die Bodenstruktur (insta-turf.com, 2025). Ein Boden, auf dem eine gesunde Vegetation vorhanden ist, ist auch weniger anfällig für Erosionserscheinungen.

Splash-Erosion bezeichnet die Erosion, also die Ablösung und Auswaschung von Bodenteilchen, durch den Aufprall von Wassertropfen (Nearing et al., 1987). An den Unterkanten der Panels einer APV-Anlage ohne Regenwasserableitung entstehen bei Regenereignissen Abtropfkanten, die das Regenwasser gebündelt auf den Boden ableiten (Weselek et al., 2021). Die Menge des Regendargebots und damit der auftreffenden Wassermenge kann unter der Abtropfkante mehr als doppelt so groß sein als im offenen Raum zwischen den Modulreihen.

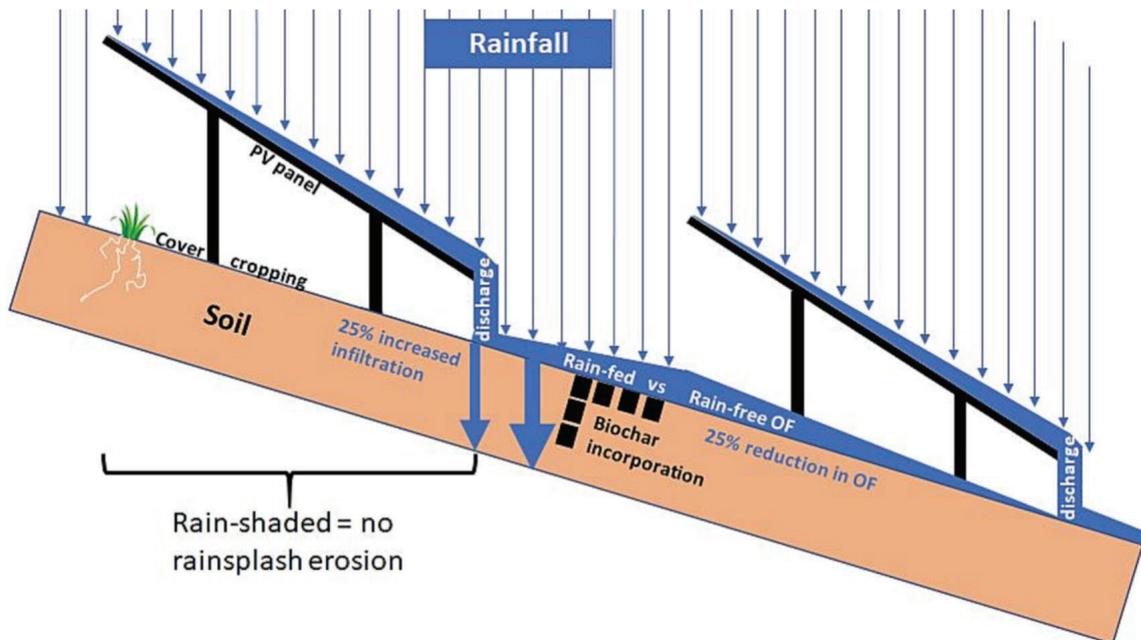


Abbildung 27: Verhalten von Niederschlag in PV-Anlagen mit Hanglage (Verheijen et al., 2023).

Zudem sorgt der Abtropfvorgang für eine erhöhte Varianz im Durchmesser der auftreffenden Tropfen (Elamr et al., 2018). Die Fähigkeit der Wassertropfen, Bodenteile loszulösen, hängt linear mit ihrer kinetischen Energie beim Auftreffen zusammen (Nearing et al., 1987), weswegen, vor allem hochaufgeständerte Agri-PV-Systeme einem hohen Risiko für Auswaschung durch Wassertropfen unter den Panelkanten unterliegen. Neben der Auswaschung der Teilchen besteht außerdem die Gefahr der Rinnenbildung und des Abschwemmend von Saatgut. Außerdem kann der konzentrierte Niederschlag zur Beschädigung von Pflanzenteilen führen. Elamri et al. (2018) und Weselek et al. (2021) beobachteten das Problem der Splash-Erosion vor allem im Keim- und Jungpflanzenstadium der Kulturen. Mit dem Wachstum der Kulturen und einem größeren Bodenbedeckungsgrad verschwanden die Erosionserscheinungen (Weselek et al., 2021).

4. Wassermanagement in APV- und PV-Anlagen

Es gibt diverse Möglichkeiten, PV-Anlagen und APV-Anlagen als Werkzeug für Wassermanagement zu nutzen oder sie, im Sinne der multiplen Flächennutzung, mit anderen Ansätzen des Wassermanagement zu kombinieren. Der Aspekt Rainwater-Harvesting wird im nächsten Kapitel ausführlich erläutert.

Die Verhinderung von Hangerosion und die Flutprävention sind Bereiche des Wassermanagements, in denen die Nutzung von PV etabliert werden könnte

(Sturzflut.com, 2025). Die Firma ewind GmbH legte eine Konzept vor, mit dem die Erosionserscheinungen und die Flutgefahr gemindert werden könnten. Dazu werden in erosionsgefährdeten Hanglagen niedrige Dämme errichtet, die quer zum Hang ausgerichtet sind (Abbildung 28). Durch diese Unterteilung soll sich die Ansammlung von größeren, ableitenden Wassermengen verhindern lassen, da auftreffendes Wasser nur bis zum nächsten Damm fließt und dort versickern kann. Im Sinne der multiplen Nutzung können in den Dämmen Fundamente für die Aufständigung von PV-Anlagen untergebracht werden. Wird diese Methode auf landwirtschaftlichen Flächen angelegt, kann die Bodenqualität erhalten werden und der Ertragsverlust auf den Dammfleichen durch den Stromertrag ausgeglichen werden.

Ein weiterer Aspekt, bei dem APV- und PV-Anlagen eingesetzt werden könnten, ist die Managed Aquifer Recharge (MAR) (Rößner, 2022). MAR ist eine Methode, die Grundwasser leitenden Schichten mit Wasser wiederzuversorgen. Hierfür werden z. B. Gräben oder Becken mit Wasser gefüllt, welches dann langsam durch die Versickerungszone in die Grundwasser leitenden Schichten gelangt. Dadurch können saisonale Veränderungen des Grundwasserspiegels abgemildert werden. PV- oder APV-Anlagen, in denen Rainwater-Harvesting betrieben wird (siehe nächstes Kapitel) könnten das Wasser für diese Methode liefern. Somit könnte auch der teilweise negative Einfluss von PV-Anlagen auf die Bodenfeuchteverteilung ausgeglichen werden.

Rößner (2022) bestätigt APV- und PV-Systemen weiterhin ein hohes Entwicklungspotenzial, was die Direktverregnung von Niederschlag unter den Modulen betrifft. Dies könnte Effekte wie eine inhomogene Verteilung von Niederschlag und Bodenfeuchte abmildern. Die Firma SUNfarming GmbH entwickelte dafür eine Unterkonstruktion für PV- und APV, die zu einer gleichmäßigen Wasserverteilung beiträgt (Abbildung 29 und 30). Auch als Energielieferant für Bewässerungsanlagen und Pumpensysteme kann eine PV-Anlage als wichtiges Werkzeug im

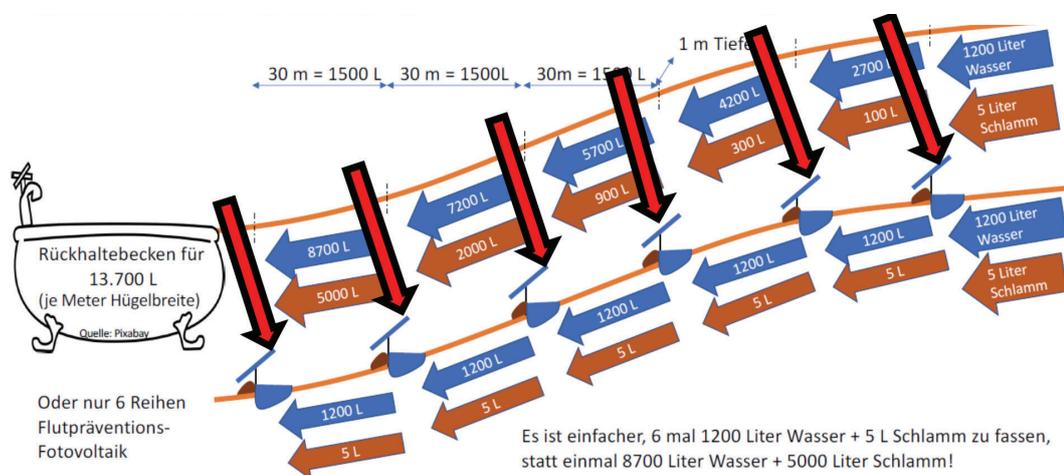


Abbildung 28: Prinzip einer Hangerosions-PV-Anlage nach Kormann (ewind GmbH).



Abbildung 29: APV-Anlage der Firma SUNfarming GmbH mit wasserverteilender Unterkonstruktion (sunfarming.de).



Abbildung 30: Detail der wasserverteilenden Unterkonstruktion der Firma SUNfarming GmbH (sunfarming.de).

Wassermanagement agieren (Rumbayan et al., 2025). Eine Etablierung von autarken Systemen in denen eine APV-Anlage als Energie- und Wasserlieferant mit eigens gesteuerter Bewässerung dient, wäre möglich. Dies hat vor allem in Gebieten, die steigendem Risiko für Dürren und Wasserknappheit ausgesetzt sind Potenzial. Hier könnten APV-Anlagen die Energie für Grundwasserpumpen liefern und für eine erhöhte Klimaresilienz der Landwirtschaft sorgen. In Verbindung mit dem Monitoring

verschiedener, klimatischer Daten und programmierbarer Bewässerung könnte so ein ressourcensparendes und nahezu autarkes Wassermanagement ermöglicht werden. Eine weitere Kombination von Wassermanagement und PV stellt die Abdeckung von Wasserspeichern mit PV dar. Auch hier steht die doppelte Flächennutzung im Vordergrund. Wasserspeicherbecken nehmen oft große Flächen in Anspruch. Die Abdeckung dieser Flächen mit PV hat einerseits den Vorteil der Energieerzeugung. Andererseits sorgt die Abdeckung des Wasserspeichers für eine Verschattung des Wassers und vermindert die Verdunstung (Feldraine Wasserspeicher) (Abbildung 31).

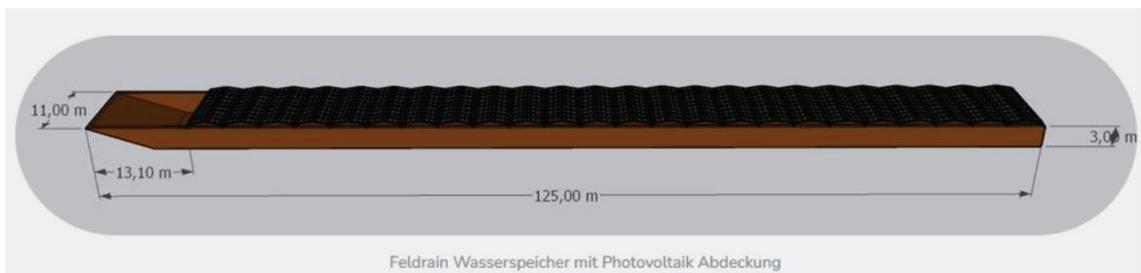


Abbildung 31: Modellzeichnung Solarabdeckung für Wasserspeicher (feldraine.de)

5. Rainwater-Harvesting in APV- und PV-Anlagen

5.1 Definition

Die erste Definition von Rainwater-Harvesting wurde bereits 1975 von Myers zitiert als „die Sammlung und Speicherung von auf landwirtschaftlichen Flächen anfallendem Wasser, z.B. Run-Off oder Bachwasser, und seine Nutzung zur Bewässerung“.

Weiterhin zitiert Myers auch Curriers Definition: „Rainwater-Harvesting ist der Prozess der Sammlung natürlichen Niederschlags mit Auffangvorrichtungen für landwirtschaftliche Zwecke.“ (Myers, 1975)

In der Publikation „Water Harvesting - A guideline to good Practice“ von Mekdaschi et al. (2013) wurde aus diversen wissenschaftlichen Definitionen folgender Kontext zu Begriffsdefinition geliefert: „Rainwater-Harvesting ist die Sammlung und Speicherung von Flutwasser oder Niederschlags-Abfluss, um die Wasserverfügbarkeit für Haushalte und landwirtschaftliche Nutzung sowie für die Erhaltung des Ökosystems, zu erhöhen.“ Der Zweck von Rainwater-Harvesting ist die Sammlung von abfließendem Wasser (Run-Off) oder Grundwasser in Überschussgebieten kombiniert mit der Speicherung und Verfügbarmachung bei Wasserknappheit.

5.2 Bedeutung

Rainwater-Harvesting wird schon seit Jahrtausenden vom Menschen genutzt, um Gebiete, die unter Wasserknappheit leiden, besiedelbar zu machen und um die Lebensbedingungen in bestimmten Regionen der Erde zu verbessern. (Boers et al., 1982)

Rainwater-Harvesting schließt die Regenwassergewinnung für landwirtschaftliche Zwecke und Haushaltszwecke zusammen und kann mit verschiedenen Methoden praktiziert werden. (Helmreich et al., 2009) Besonders in trockenen Gebieten, in denen die potenzielle Evapotranspiration (in mm) die Niederschlagsmenge übertrifft, hat RWH ein hohes Potenzial zur Ertragserhöhung in landwirtschaftlichen Kulturen (Falkenmark et al., 2001).

Die Wasserverbräuche von Haushalten, Industrie und Landwirtschaft sind global gestiegen. Die Ressource Wasser ist aber immernoch ein Gut, das weder gleichmäßig verteilt noch regelmäßig verfügbar ist. Vor allem in Anbetracht des Klimawandels, der die Intensität von Wetterereignissen wie Starkregen oder Dürren verstärkt, sieht die Forschung ein steigendes Potenzial der Regenwassergewinnung.

5.3 Varianten

Laut Mekdaschi et al. (2013) kann Rainwater-Harvesting durch verschiedene Auffangtechniken des Wassers klassifiziert werden.

1. Floodwater Harvesting (Abbildung 32)

Sammlung von Flutwasser aus übersteigenden Fluss- oder Bachläufen oder Sammlung von durch Überflutung anfallendem Run-Off.

2. Macro WH (Abbildung 33)

Sammlung von Run-Off, der außerhalb des Feldes anfällt.

3. Micro WH (Abbildung 34)

Sammlung von Run-Off, der direkt auf dem Feld anfällt.

4. Rooftop and Courtyard WH (Abbildung 35)

Sammlung von Run-Off von Dächern oder befestigten Flächen.

Die Anwendung von RWH in Kombination mit Agri-PV lässt sich in Kategorie 4 einordnen.

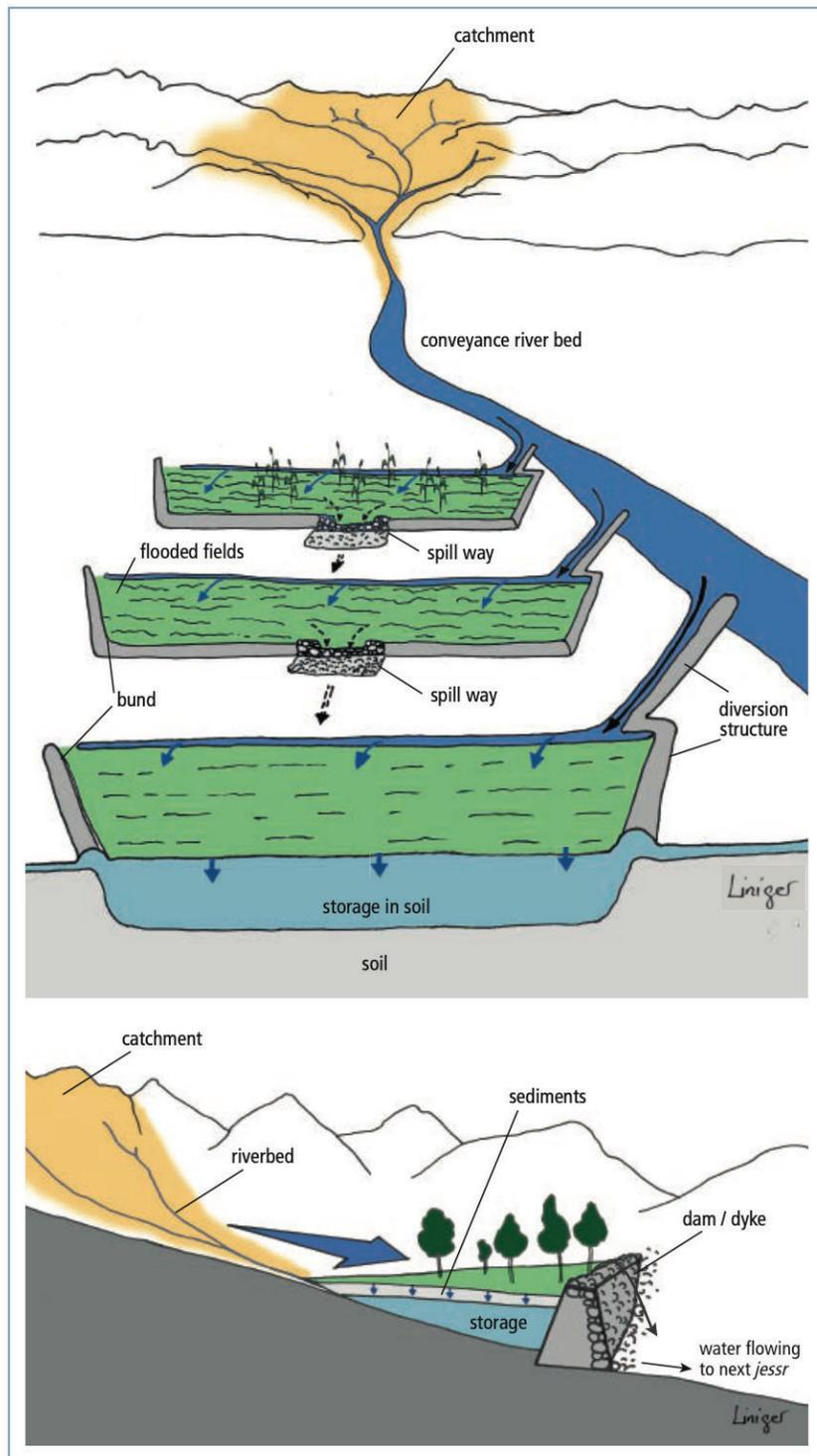


Abbildung 32: Möglichkeiten des Floodwater harvesting. Oben: Hochwasser- Umleitungssystem, in dem Hochwasser auf Flutfelder geleitet wird, auf denen es dann in die grundwasserführenden Schichten sickern kann. Unten: Querschnitt des Jessour- Systems, bei dem Flutwasser Stufenweise in von Dämmen gesicherten Sedimentschichten abgelagert wird (Mekdaschi et al., 2013).

Im Gegensatz zu den anderen Auffangarten sorgt das Rooftop-WH nicht für eine Rückführung von Teilen des Regenwassers in das Grundwasser, da es direkt von der auftreffenden Fläche in die Sammelvorrichtungen geleitet wird. Hierdurch ergibt sich eine im Vergleich hohe Flächeneffizienz in Bezug auf aufgefangenes Wasser.

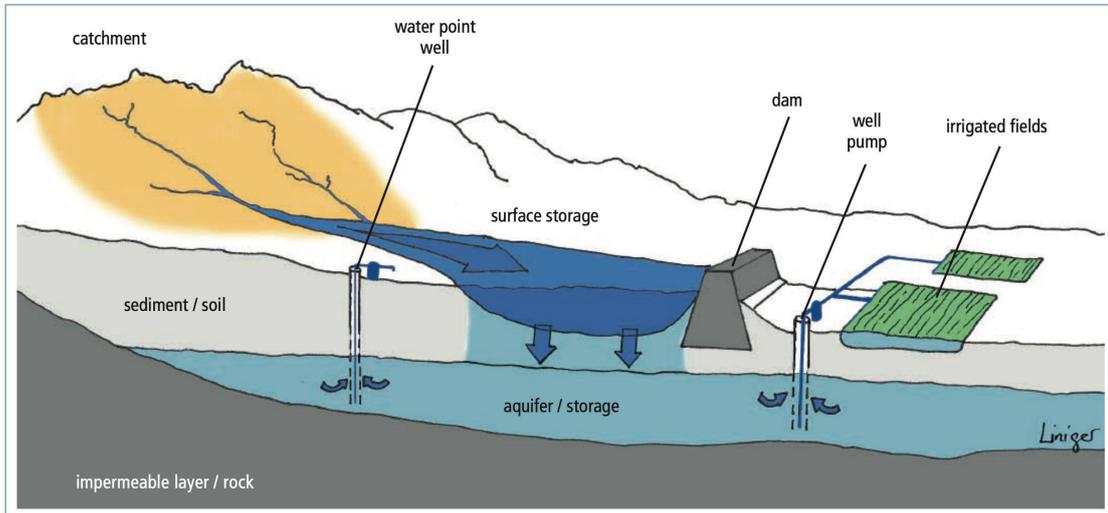


Abbildung 33: Querschnitt eines Macrocatchment-Systems, dass die Speisung der grundwasserführenden Schicht begünstigt. Aus dieser kann dann das Wasser dann durch Pumpen nutzbar gemacht werden (Mekdaschi et al., 2013).

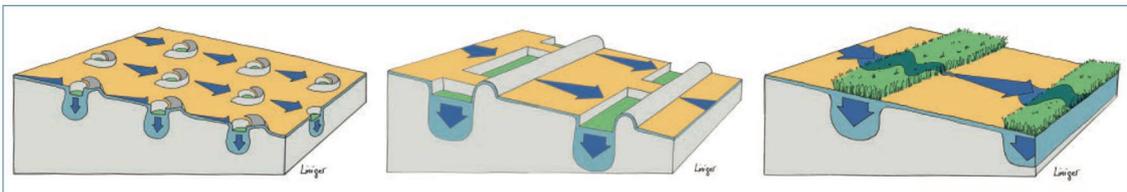


Abbildung 34: Möglichkeiten des Microcatchment-Water-Harvesting. Links: Auffanggruben, in denen das Wasser versickert. Mitte: Dammsystem mit davorliegenden Ablaufgräben. Rechts: natürliche Begrenzung des Abflusses durch Grünstreifen (Mekdaschi et al., 2013).

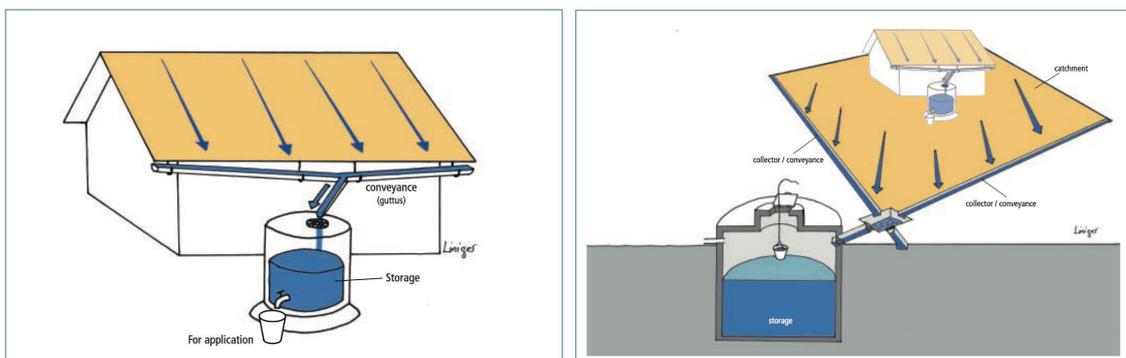


Abbildung 35: Rooftop- und Courtyard-Harvesting. Links: Dachabfluss wird über Rinnen und Rohre in Speicherbehälter geleitet. Rechts: Oberflächenabfluss wird über Drainage-Rinnen in den Speicherbehälter geleitet (Mekdaschi et al., 2013).

5.4 Stand der Wissenschaft

Die Verwendung von RWH-Systemen in Agri-Photovoltaik-Anlagen und in Photovoltaik-Anlagen wird in diversen Publikationen als Thema behandelt, dem großes Forschungspotential zugeschrieben wird (Al Mamun et al., 2022). Die Publikationen beschäftigen sich fast ausschließlich mit Rainwater-Harvesting als zusätzliche Option, die Panelflächen der Anlagen zusätzlich zu nutzen. Die Publikationen betrachten neben dem Rainwater-Harvesting zumeist auch die mikroklimatischen Bedingungen unter der APV-Anlage oder den Ertrag verschiedener Kulturen. Daher gilt in vielen Fällen die Hauptforschung nicht dem Rainwater-Harvesting in APV-Anlagen, weshalb diesbezüglich oft wenig vergleichbare Daten aus den Publikationen entnommen werden können. Um mehr Daten auswerten zu können, wurde das Rainwater-Harvesting auch in gewöhnlichen Freiflächen-PV betrachtet.

Noch sind installierte RWH-Systeme in APV-Forschungsanlagen recht selten. Außerdem gibt es einige Feldversuche, bei denen zwar ein Rainwater-Harvesting System installiert wurde, dies aber nicht näher beschrieben ist und auch keine Daten in Hinsicht Rainwater-Harvesting erstellt wurden. Weiterhin wurden bisher, auch da viele Anlagen noch neu sind, noch nicht über alle Anlagen in denen RWH-Systeme installiert sind, Veröffentlichungen geschrieben

In dieser Arbeit werden 6 Publikationen betrachtet, in denen das Rainwater-Harvesting in verschiedenen APV-Anlagen betrachtet wurde und Daten erhoben wurden. Weitere Publikationen erwähnen zwar das Rainwater-Harvesting in einer APV-Anlage, liefern aber keine auswertbaren Daten dazu. Oft fehlt die Dimensionierung der Systeme und die aufgefangene Regenmenge wird schlicht nicht untersucht.

Die aussagekräftigste Größe bei der Erforschung des Potenzials von Regenwasser-Management in PV-Anlagen ist die in einem Zeitraum potenziell sammelbare Regenmenge. Der Umweltfaktor mit dem größten Einfluss hierauf ist die Menge des Niederschlages (Abbildung 36) (Alazzam et al., 2024)

Diese ergibt sich aus der Fläche der Anlage, also der addierten Fläche der Panels, dem mittleren jährlichen Niederschlag und dem Run-Off-Koeffizienten (siehe Material und Methoden) (Zambrano et al., 2021).

Die Panelfläche ergibt sich aus den Ausmaßen der einzelnen Panels, welche senkrecht auf den Boden projiziert wird (Ye et al., 2023). Das heißt stärker geneigte Panels bieten weniger Fläche. Der Run-Off-Koeffizient ist ein Wert, der durch das Verhältnis von auftreffendem Niederschlag zu abgeleitetem, also gesammeltem Regenwasser definiert ist. Verluste können durch Versickerung, Verdunstung, Spritzwasser oder Undichtigkeiten entstehen (Singh, 1992). Je glatter und geneigter die Oberfläche des Materials, desto größer ist der Runoff-Koeffizient (Zambrano et al., 2021). Der Runoff-

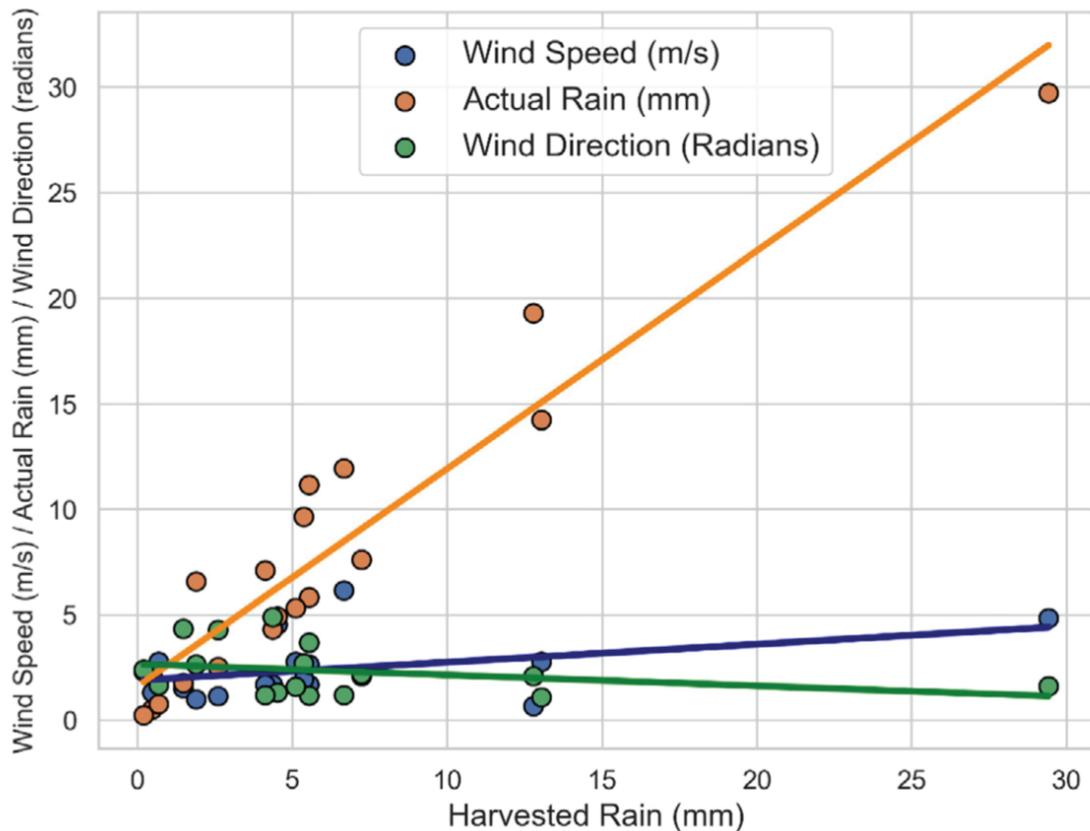


Abbildung 36: Einfluss verschiedener Umweltfaktoren auf die sammelbare Regenmenge in einer bodennahen PV-Anlage in Jordanien (Alazzam et al., 2024).

Koeffizient von Solar Panels liegt bei einer Neigung von 26 Grad zwischen 70 % und 80 %. (Santra et al., 2018)

Ein Einfluss der Windrichtung auf den Runoff-Koeffizienten konnte nicht belegt werden. (Zambrano et al., 2021).

Die erste, kommerziell genutzte Anlage, bei der ein Rainwater-Harvesting in einem Teil der Anlage realisiert wurde, ist die FFA-Anlage von Bay.Wa.re im Südspanischen Alhendin (ca. 371 mm Niederschlag jährlich), bei der auch ein Teil als APV ausgebaut ist (Bousi, 2024). Ein Anteil von 0,6% der 85.140 Module ist mit Regenrinnen versehen. Hierbei wird das aufgefangene Wasser in einem Tank von 385 m³ gespeichert und bei Bedarf zur Reinigung der Module genutzt. Der Wasserbedarf wird mit ca. 300 m³ angegeben (Abbildung 37).

In den Niederlanden wird für eine Beerenanlage, die auch von Bay.Wa.re betrieben wird, mit einer Leistung von 1,8 MWp eine potenzielle Sammelleistung von ca. 8050 m³ Regenwasser in einem Jahr mit durchschnittlichem Niederschlag attestiert (Bousi, 2024). Die Besonderheit dieser Anlage ist der Einsatz von Drainage-Rinnen. So wird das aufgefangene Wasser, ohne es zu speichern, dem Boden und damit den Pflanzen zugeführt. In einem Jahr mit durchschnittlichem Niederschlag kann damit 70 % des Bedarfs gedeckt werden.

Demand Type (Country)	Installed Capacity (MWp)	Water Demand (m³/year)	Storage (m³)	Installed Gutters (m)	Modules with gutter (%)	CAPEX (10³ €)
Module Cleaning (Spain)	54	300	385	600	0,6%	60 - 75
Sheep Watering (France)	7,6	73	10	180	1%	16 – 22
Irrigation (Netherlands)	1,8	11.500	-	6.400	100%	100 – 120*

Abbildung 37: Technische Parameter dreier verschiedener von BAy.Wa.re betriebener APV-Anlagen mit RWH-Systemen (Bousi, 2024).

Im Jahr 2018 wurde RWH als Bestandteil einer Versuchsanlage mit starren, bodennahen PV-Modulen in den trockenen Zonen Westindiens erforscht. Die Modulfläche betrug 651 m². Hierbei wurde die jährlich sammelbare Niederschlagsmenge ermittelt. Bei einer Effizienz des RWH-Systems von 70- 80 % konnte eine jährlich sammelbare Menge von 1,5 mio. l Regenwasser pro Hektar Anlage ermittelt werden. Zudem wurde das gesammelte Wasser zur Säuberung der Module genutzt (Santra et al., 2018).

Auch im ostafrikanischen Morogoro (Tansania, 972 mm mittlerer jährlicher Niederschlag) finden Untersuchungen zu Kulturen unter einer APV-Anlage (442 m²) statt, bei der die installierte Rainwater-Harvesting Anlage Teil der Forschungen ist (Randle-Boggis et al., 2024). Hier wurde festgestellt, dass es nur wenige Tage starken Regens benötigt, um den bereitgestellten 10.000 l Tank zu füllen. Dieses Wasser ist ausreichend für acht Tage der Bewässerung der Anlage. Als Voraussetzung für eine erfolgreiche Speicherung in diesem Gebiet wurde ein geschlossener Tank genannt, da durch Verdunstung sonst zu viel des aufgefangenen Wassers verloren gehen würde. Auch in PV Anlagen, die nicht agrikulturell genutzt wurden, wurden RWH-Systeme installiert. Die PV Anlagen sind in ihrer Gestalt zwar unterschiedlich zu den APV-Anlagen, da ihre Reihenabstände niedriger sind und allgemein ein höherer Flächenanteil bedeckt ist. Trotzdem werden die aufgefangenen Regenmengen hier betrachtet, da diese aufgrund der wenigen Daten in agrikulturell genutzten Anlagen gute Referenzwerte sind.

Ein Projekt in Jordanien erforschte die auffangbare Regenmenge in einer kleinen Versuchsanlage mit 4 m² Modulfläche über 60 Tage (Abbildung 38) (Alazzam et al., 2024). Der Aufbau der Anlage besteht aus zwei Zwischentanks, von denen das Wasser in einen 1000 l Tank gepumpt wird (Abbildung 39). Der mittlere Niederschlag in diesem

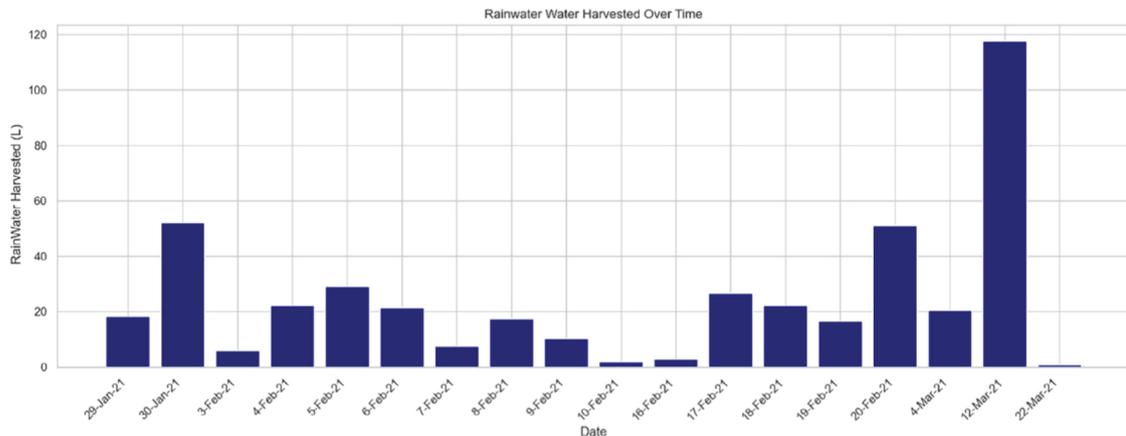


Abbildung 38: Täglich aufgefangene Wassermenge in einer bodennahen PV-Anlage in Jordanien (nach Alazzam et al., 2024).

Gebiet beträgt ca. 245 mm jährlich. Unter diesen Umständen konnten im genannten Zeitraum 444 l Regenwasser entnommen werden.

Sevik et al. (2022) haben Rainwater-Harvesting in einer 600 kW-Anlage in Corum (Türkei) untersucht, die ebenfalls nicht agrokulturell genutzt wird. Das Rainwater Harvesting System wurde auf einem 288 m² großen Teilstück der Anlage installiert. Die gesamte Modulfläche, von der gesammelt wird, betrug 128 m². Es konnten herausgefunden werden, dass jährlich 118 m³ Regenwasser in der Versuchsanlage gesammelt werden können (Abbildung 40). Das bedeutet, hochgerechnet auf die gesamte Anlage von 4022 m² könnten sogar 1646 m³ Regenwasser gesammelt werden. Der durchschnittliche jährliche Niederschlag in Corum beträgt 431 mm.

Neben praktischen Feldversuchen wurde Rainwater-Harvesting auch in theoretischen Modellen erforscht. Modellberechnungen sind eine wichtige Planungsgrundlage für RWH-Systeme. Einerseits stellen sie den Nutzen der Anlage vor ihrem Bau dar und geben Auskunft über die nötige Dimensionierung der Anlage.

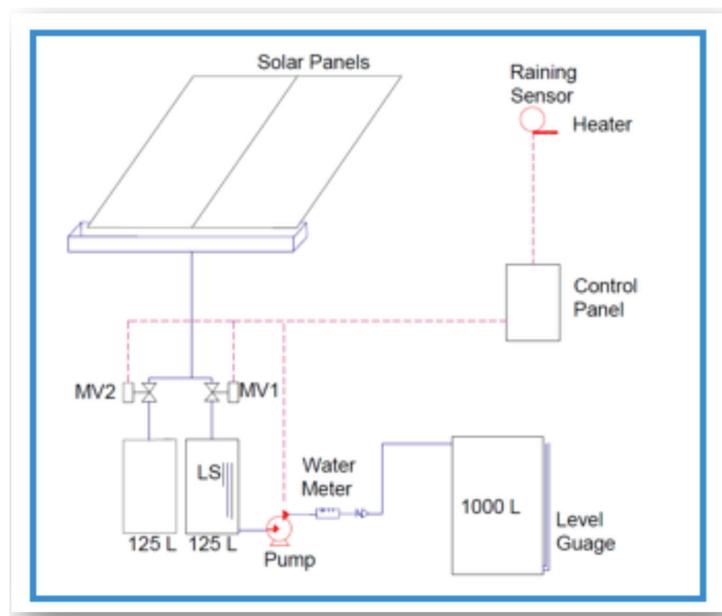


Abbildung 39: RWH-Versuchsaufbau mit Speichertanks und Steuerung in einer bodennahen PV-Anlage in Jordanien (Alazzam et al., 2024).

Die Berechnungen mit Modellen sind weitaus günstiger als Feldversuche. Ye et al. (2023) erstellten ein umfangreiches Modell einer bodennahen PV-Anlage. Hierbei wurde ein komplettes System von 468.237,32 m² Modulfläche modelliert. Neben dem Rainwater-Harvesting wurden die Zusammenhänge von Energieproduktion, landwirtschaftlichem Output, und Fruchtfolge erarbeitet, wobei auch deren Einflüsse auf die Umwelt einbezogen werden (Abbildung 41). Die potenziell sammelbare Regenmenge wurde mit der Formel von Zambrano et al. (2021) berechnet, wozu die Modulfläche, die Niederschlagsdaten sowie der Run-Off-Koeffizient herangezogen wurden. Es wird für dieses System eine jährlich sammelbare Wassermenge von 196.880,34 m³ Regenwasser veranschlagt. Das entspricht jährlich 1,07 m³ Regenwasser pro einzeltem Panel (2,56 m² Fläche). Hierbei hat sich eine Neigung der Panels von 34 Grad als optimal herausgestellt. Der jährliche Niederschlag in der gewählten semi-ariden Zone in China beträgt 507,18 mm jährlich. Für die Planung einer APV-Anlage mit RWH-System in Burglauer (Rhön) erstellte die Firma Agrokraft GmbH eine Modellrechnung für das RWH-Potenzial der Anlage (Seifert, 2025). Unter anderem wurde die Speicherfüllung in Abhängigkeit des Niederschlags und der Bewässerungsgaben modelliert (Abbildung 42). In der APV-Anlage steht eine Netto-Modulfläche von 1,05 ha zur Verfügung und es sollen große Brennesseln angebaut werden, welche einen Wasserbedarf von ca. 2000 m³ pro Jahr und Hektar haben. Als Speicher wurde ein Retentionsbecken von ca. 3000 m³ Speichervolumen vorgesehen. Die Niederschläge von 2017 bis 2024 wurden vom Deutschen Wetterdienst bezogen. Die Ergebnisse zeigen, dass ausschließlich das RWH-Potenzial von einem ha APV ausreicht, um ca. 1,3 ha der Kultur ausreichend bewässern zu können. Ein weiteres Modell bezieht zusätzliche Wassererträge aus

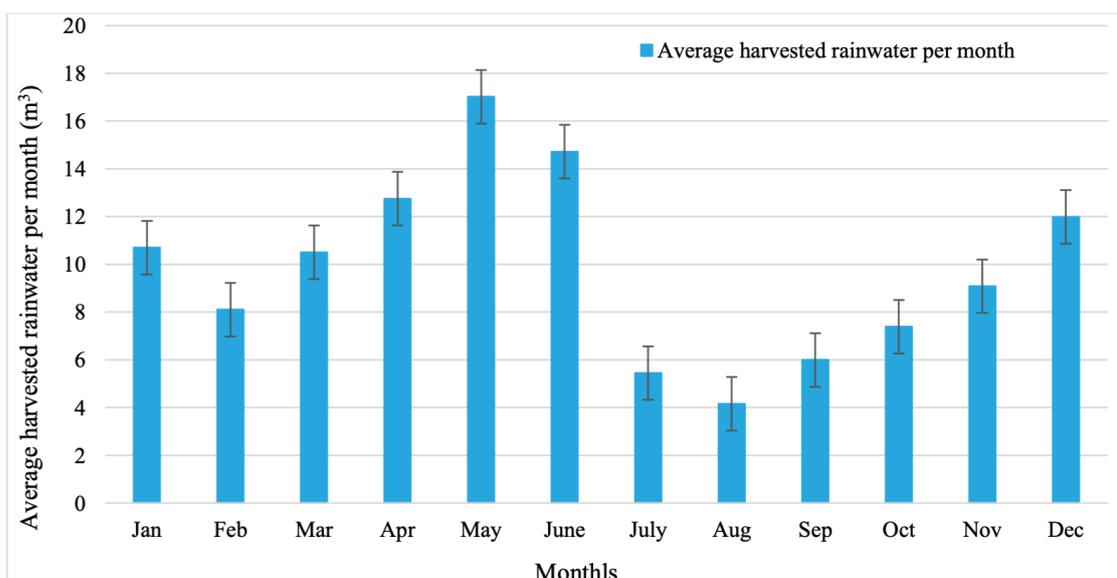


Abbildung 40: Monatlich gesammelte Regenmenge in einer bodennahen PV-Anlage in der Türkei (Sevik et al., 2022).

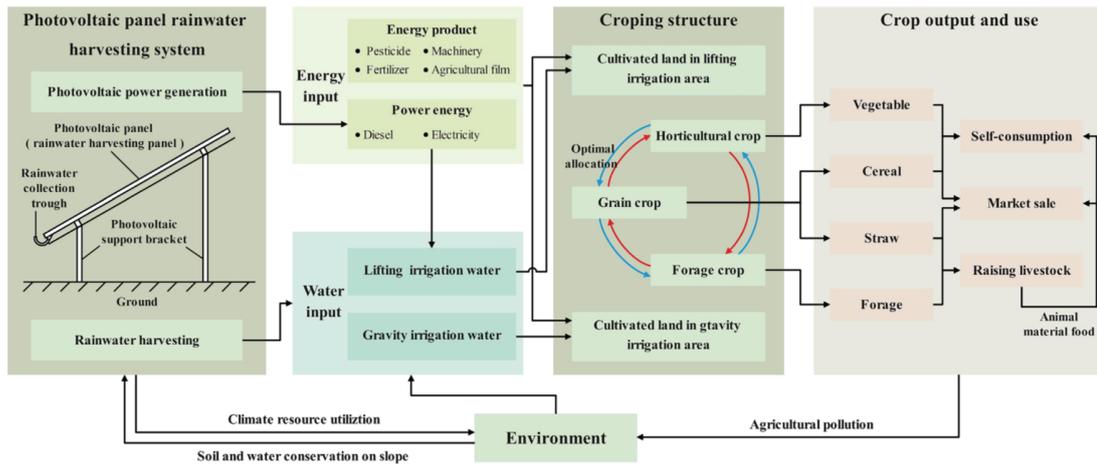


Abbildung 41: Aufbau eines agrikulturellen Systems auf Basis eines Rainwater-Harvesting-PV-Anlage (Ye et al., 2023).

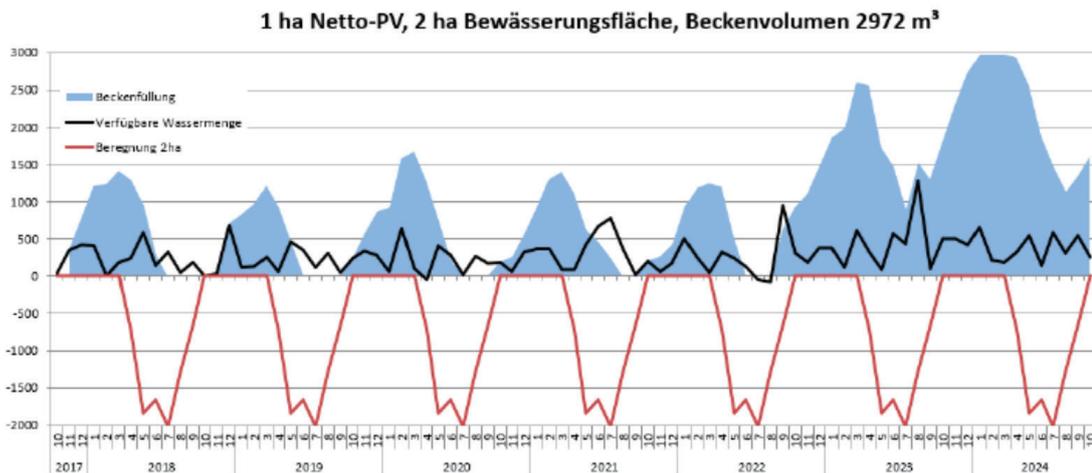


Schaubild 1: Simulation 1 ha PV - 2 ha Bewässerung

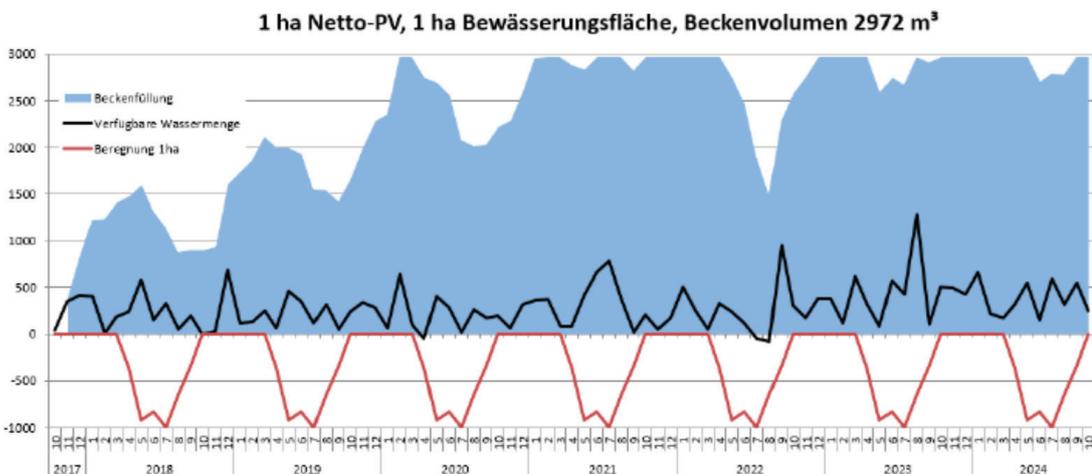


Abbildung 42: Speicherstand, verfügbare Wassermenge und Beregnungsgaben, modelliert für zwei Feldgrößen von einem und zwei Hektar (Seifert, 2025).

einem nahen Entwässerungsgraben ein. Damit könnten sogar 4,5 ha mit 2000 m³ pro Jahr und ha bewässert werden.

Auch für die APV-Anlage in Lüchow wurde das RWH-Potenzial rechnerisch ermittelt (Meinardi et al., 2025). Der mittlere jährliche Niederschlag in Lüchow beträgt 561 mm. Es wird bei einer Modulfläche von 3.888 m² eine speicherbare Wassermenge von 2.181 m³ angegeben. Hierbei wurde mit einer Systemeffizienz von 100 % gerechnet. Der Wasserbedarf der APV-Fläche beträgt 530 m³. Auch bei einer niedrigeren Effizienz des RWH-System ist davon auszugehen, dass das Bewässerungspotenzial der Anlage gedeckt werden kann.

5.5 Rainwater-Harvesting in APV Anlagen - Stand der Technik

5.5.1 Technische Eignung der Anlage zum Rainwater-Harvesting

Rainwater-Harvesting in APV-Anlagen ist ein recht junger Ansatz, Wasser aus dem Kreislauf zu entziehen und nutzbar zu machen. Die Kombination der Panelfläche als Wasser bündelndes Element mit einer Rinne als abführendes Element ist aber im Prinzip dieselbe, wie auf jeder herkömmlichen, geneigten Dachfläche. Die Möglichkeit des Rainwater-Harvestings hängt stark mit dem Aufbau der Anlage zusammen. Der einfachste Ansatz ist der Wassertransport mit Rohr- und Rinnensystemen.

Hochaufgeständerte Anlagen ohne Tracking-System eignen sich zur Anbringung von Rainwater-Harvesting-Systemen. Die Konstruktion eignet sich durch ihre Tragfähigkeit zur Anbringung von Rinnensystemen und durch ihre Höhe wird der Arbeitsraum nicht beeinträchtigt (Abbildung 43).

Auch in bodennahen Anlagen können die Rinnen einfach unter den Modulreihen an der Unterkonstruktion montiert werden, um das Wasser zur Stirnseite der Anlage zu leiten (Abbildung 44). Die Sammlung des Wassers der einzelnen Modulreihen sollte hier jedoch unterirdisch erfolgen, um einen einfachen Zugang zu den bewirtschafteten Modulzwischenreihen zu ermöglichen und die Zufahrt für Maschinen nicht zu beeinträchtigen (Abbildung 45).

Vertikal angebrachte Agri-PV-Anlagen eignen sich nicht zur Installation von Rain-Harvesting-Systemen. Durch ihre Ausrichtung bieten sie keine Fläche, auf die der Regen aufprallen könnte.

Trackingfähige Anlagen eignen sich auch nur bedingt zur Regenwassersammlung. Hier gibt es verschiedene Ansätze, z.B. Drainagen, die aber oft höheren, technischen Aufwand bedeuten.

Eine weitere Kategorie ist die Regensammelungs-PV (Abbildung 46). Hierbei liegt die Priorität der Anlage auf der Energieproduktion und der Wassersammlung. Es sind völlig geschlossene, bodennahe Anlagen möglich, die nahezu 100 % des Regenwassers

auffangen können, wobei nur 5 % der Fläche dauerhaft versiegelt werden. In diesen Anlagen ist jedoch keine landwirtschaftliche Doppelnutzung möglich (Feldraine.de).

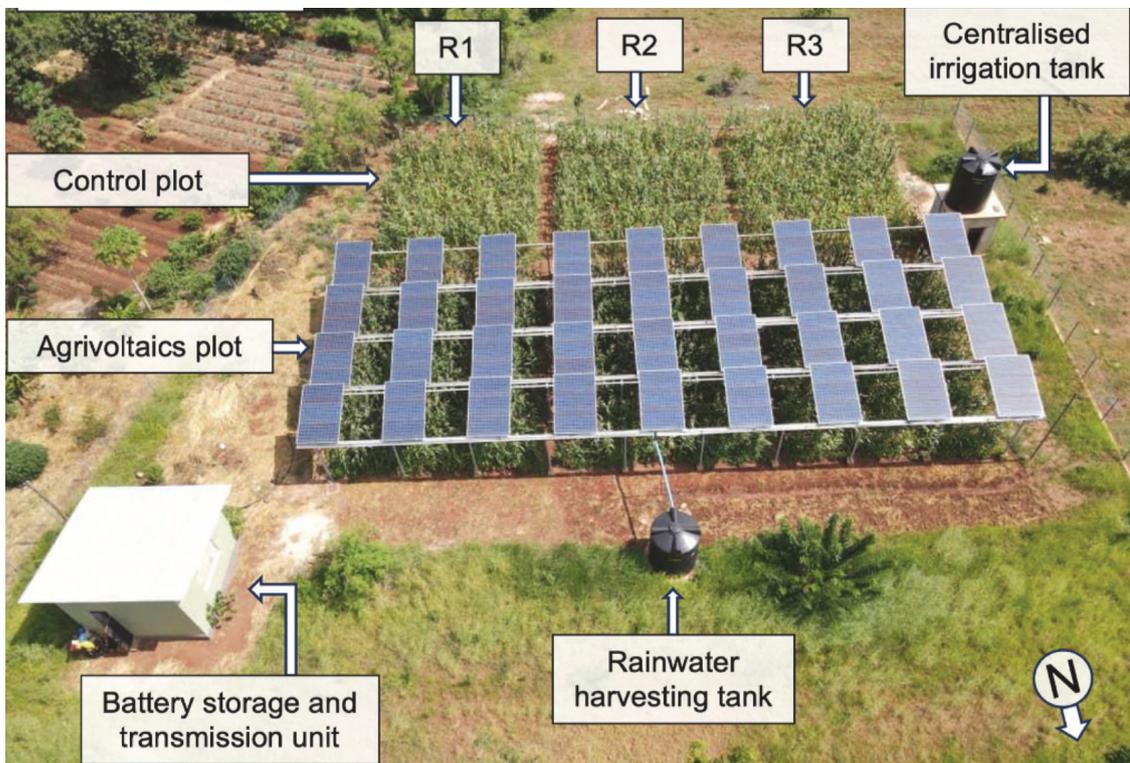


Abbildung 43: Überkopf-APV-System mit oberliegendem RWH-System in Tansania (Randle-Boggis et al., 2025).



Abbildung 44: Detail RWH-System einer bodennahen APV-Anlage in Indien (Santra et al., 2018).

5.5.2 Technische Grundlagen der Anlage

5.5.2.1 Aufständering

Die Aufständering umfasst die Pfeiler und die Verstrebung der Anlage (Vollmer, 2022). Sie ist die bauliche Komponente, die die Last der Solarpanels aufnimmt und diese in ihrer Position hält. Dieselbe Funktion kann sie für die strukturellen Anbauten zum Wassermanagement haben. Vor allem geeignet für eine Aufnahme von Rinnensystemen zur Wassersammlung sind Anlagen der Kategorie I (hochaufgeständerte Anlagen) und Anlagen der Kategorie II Variante 1



Abbildung 45: Bau der Verrohrung in einer bodennahen APV-Anlage in Indien (Santra et al., 2018).

(bodennahe Anlagen) (siehe Kapitel 2.2). An diesen ist die Montage der Auffangrinnen und Sammlerinnen am einfachsten und günstigsten möglich. Für Trackinganlagen bestehen bis jetzt kaum Ansätze, Rainwater-Harvesting-Systeme zu erproben. Ein bestehendes System ist eine Anlage in Nordrhein-Westfalen, in dem die Sammelrinne mittig zwischen zwei Panelreihen, die in V-förmiger Bewegungsweise trackingfähig sind, platziert ist (Meier-Grüll et al., 2024).

Zudem gibt es den Ansatz, die Auffangrinne direkt in die Aufständering zu integrieren (Chekired et al., 2022). Dies wurde in einer hochaufgeständerten Anlage in Themis Miliana in Algerien realisiert, in der die Module fest und V-förmig angeordnet sind.

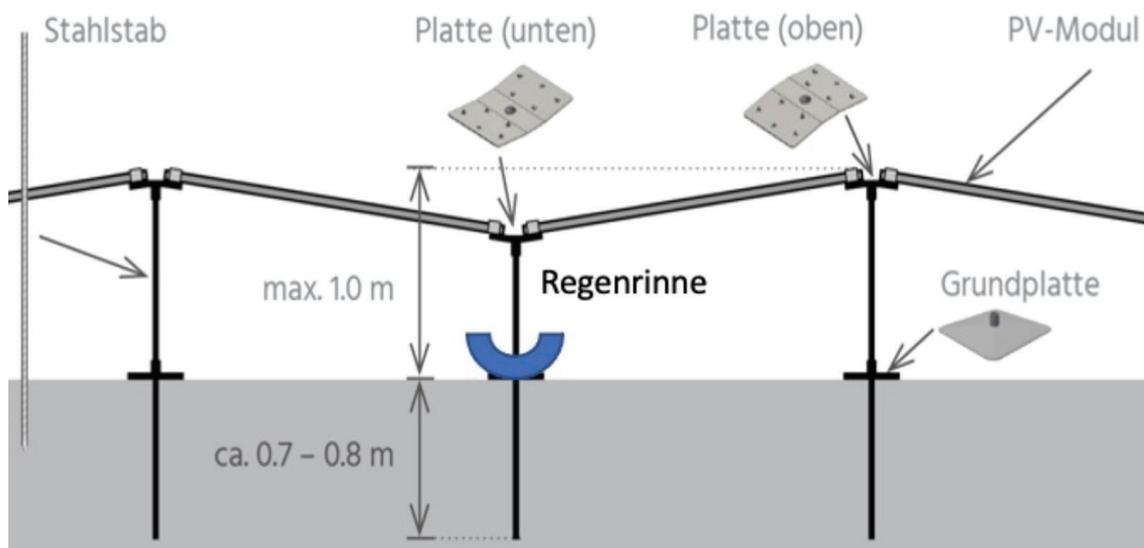


Abbildung 46: Regenwassersammlungs-PV (feldrain.de).

Sofern das gesammelte Wasser nicht unterirdisch gesammelt und weitergeleitet wird, muss die Aufständerung auch die konstruktiven Aufbauten der Wasserleitungen bis zum Speicherbehälter aufnehmen.

Es besteht außerdem großes Entwicklungspotenzial für die Montage von Beregnungssystemen an der Aufständerung der Module (Rößner, 2022).

Die Art der Befestigung der Rain-Water-Harvesting Komponenten hängt von der Konstruktionsweise und dem Material der Aufständerung ab.

In aufgeständerten Konstruktionen können die Rinnen mit Dachrinnenhalter für die passende Rinnenform hängend im Holz oder Metall verschraubt werden. So wurde es zum Beispiel in der bodennahen Anlage in Alhendín, Südspanien, realisiert (Bousi, 2024).

In Fachwerkstrukturen, in denen die Module oberhalb der Aufständerung angeordnet sind, z.B. in der Pilotanlage in Heggelbach, könnte eine Rinne auch liegend auf der Konstruktion befestigt werden, was günstig und schnell nachrüstbar wäre.

Weiterhin besteht bei kleinen Kastenrinnen die Möglichkeit, diese an ihrer Falz direkt an der Auflagekonstruktion der Panels zu verschrauben. In bodennahen Anlagen kann die Rinne auch unabhängig von der Unterkonstruktion der Panels aufgeständert werden (Sevik et al., 2022).

5.5.2.2 Moduleigenschaft- und -stellung

Technisch gesehen beginnt der Sammelvorgang des Wassers beim Auftreffen auf die Oberfläche des Panels. Der Winkel der Panels hat signifikanten Einfluss auf das Ablaufverhalten des auftreffenden Wassers (Elamri et al., 2018). Bei starr montierten Panels ist der Winkel der Panels unveränderlich und wird nach der bestmöglichen Energieausbeute (Stand zur Sonne) ausgewählt. Er liegt in den untersuchten Agri-PV Anlagen zwischen $19,6^\circ$ (Santra et al., 2018) und 34° (Ye et al., 2023). Da die senkrecht auf die horizontale Ebene projizierte Fläche die Auffangfläche für den Regen darstellt, sind weniger geneigte Module besser zum Auffangen von Niederschlag geeignet, da sie mehr Fläche bieten. Zudem ermöglicht eine größere Neigung eine schnellere Abfließgeschwindigkeit des Wassers. Nachzuforschen wäre, ob dies die prozentual aufgefangene Regenmenge beeinflusst.

Durch ihre Glattheit und die wasserabweisende Oberflächenstruktur der Panels eignen sich diese sehr gut zum Ableiten von Regenwasser (Tsutsumi et al., 2004). Sie besitzen einen hohen Runoff-Koeffizienten. Dieser Wert gibt Auskunft über das Verhältnis von aufgetroffenem Wasser (Regenmenge) zu abgeleitetem Wasser. Das heißt fast 100 % des auftreffenden Regenwassers werden vollständig vom Panel heruntergeleitet. Hierdurch entsteht die ungewollte Abtropfkante unterhalb der Panels.

Der Zwischenraum längs der Panelkanten ist ein Faktor, der in der Forschung bis jetzt wenig ins Auge gefasst wurde. Die Fläche dieser Spalten ist durchlässig für Regen. Sie trägt damit zur Niederschlagsverteilung bei. Es gibt jedoch Lösungen, um die Spalten zu entwässern und damit die Sammeleffizienz des Systems nochmals zu erhöhen. Die Firma solarpartscomponents.com bietet Entwässerungs-Montageschienen, die zur Verbindung der Module dienen und gleichzeitig eine Rinne unter deren Stoß bilden, die durchfließendes Wasser ableitet (solarpartscomponents.com) (Abbildung 47). Auch andere Verbindungsprofile, die eine Möglichkeit der Wasserableitung bieten, sind erhältlich (Seifert, 2025).

Trackingfähigen Modulen ist es möglich, die Bewegung der Panels mit dem sogenannten „Antitracking“ so zu steuern, dass entweder die maximale Regenmenge gesammelt (bzw. abgefangen) wird oder so viel Regen wie möglich auf die Bodenoberfläche durchgelassen wird (Elamri et al., 2018).

Für technisch innovative Anlagen wie zum Beispiel Konstruktionen mit hängenden Panels, faltbaren Panels oder Panels die aus Röhren bestehen, gab es bisher noch keine Ansätze, in den Wasserkreislauf einzugreifen oder ein Wassermanagement-System zu integrieren (Hörnle et al., 2021).

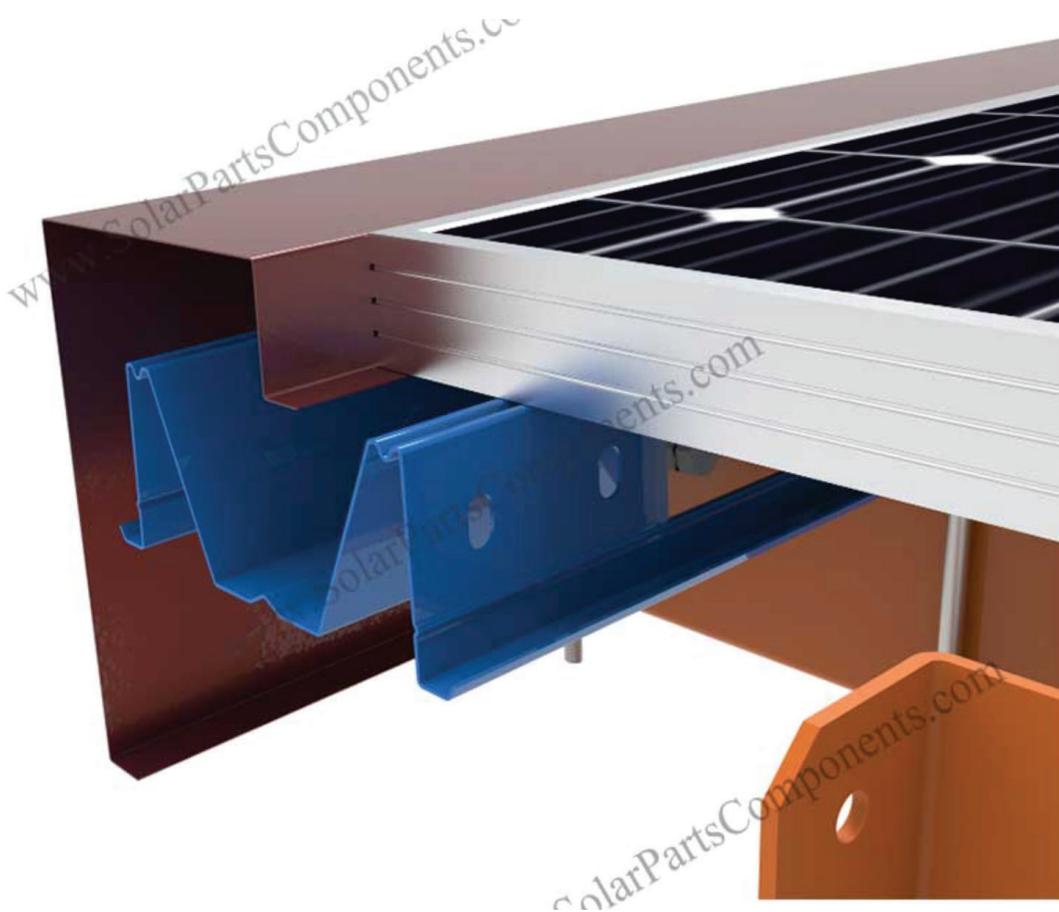


Abbildung 47: Entwässerungs-Montageschiene für Solarpanels (solarpartscomponents.com).

5.5.2.3 Rinnensysteme

Die bisher am weitesten verbreitete Methode das Regenwasser abzuleiten, ist die Verwendung von Rinnensystemen. Die einfachsten Systeme verwenden halbrunde, verzinkte Rinnen aus Stahlblech mit 153 mm Innendurchmesser, welche auch als handelsübliche Regenrinnen bekannt sind (z.B. Alhendin, Spanien, Bay.Wa.re) (Abbildung 48). Diese sind haltbar, korrosionsbeständig, günstig und allgemein gut verfügbar. Sie werden hängend unter der Abtropfkante der Solarmodule montiert. Dies wird teilweise mit starren, verzinkten Stahlblechaufhängern realisiert, die in der Unterkonstruktion der Module verschraubt sind. Es gibt auch die Möglichkeit, die Rinnen direkt an der Unterseite der Module zu verschrauben (Seifert, 2025) (Abbildung 49). In anderen Systemen werden Kastenrinnen verwendet (Abbildung 50). Diese sind durch ihre Falz flexibel am Trägermaterial oder den Panels zu befestigen (z.B. durch Verschraubung) und benötigen so mitunter keine weitere Aufhängekonstruktion. Geeignet zur Installation in APV Anlagen sind Rinnen aus Materialien wie Aluminium, Kupfer, PVC, Zink oder faserverstärktem Kunststoff (fibre-reinforced plastic), wobei Unterschiede in Anschaffungskosten und Haltbarkeit zu erwarten sind (Chaitanyaproducts).

Weiterhin gibt es RWH-Systeme, bei denen die Ablaufrinnen direkt in die Aufständerung der Solarmodule integriert ist (Chekired, 2022). Dies ist bei V-förmig angeordneten Panels besonders sinnvoll, da das Wasser hier mittig im System abfließt und die Rinne hier am Schwerpunkt des Systems installiert werden muss, wo für eine externe Rinne oft wenig Platz vorhanden ist. Die Rinne ist so vor äußeren Einflüssen geschützt. Die Wartung und Säuberung der Rinne kann sich jedoch hierdurch vergrößern.

Die Neigung der Rinnen muss groß genug sein, um einen zuverlässigen Abfluss des Regenwassers zu ermöglichen. Durch höhere Abflussgeschwindigkeiten wird der Verschmutzung und Verstopfung der Rinne vorgesorgt.



Abbildung 48: Details Rainwater-Harvesting-System in der APV-Anlage in Alhendin, Südspanien (Bousi, 2024).

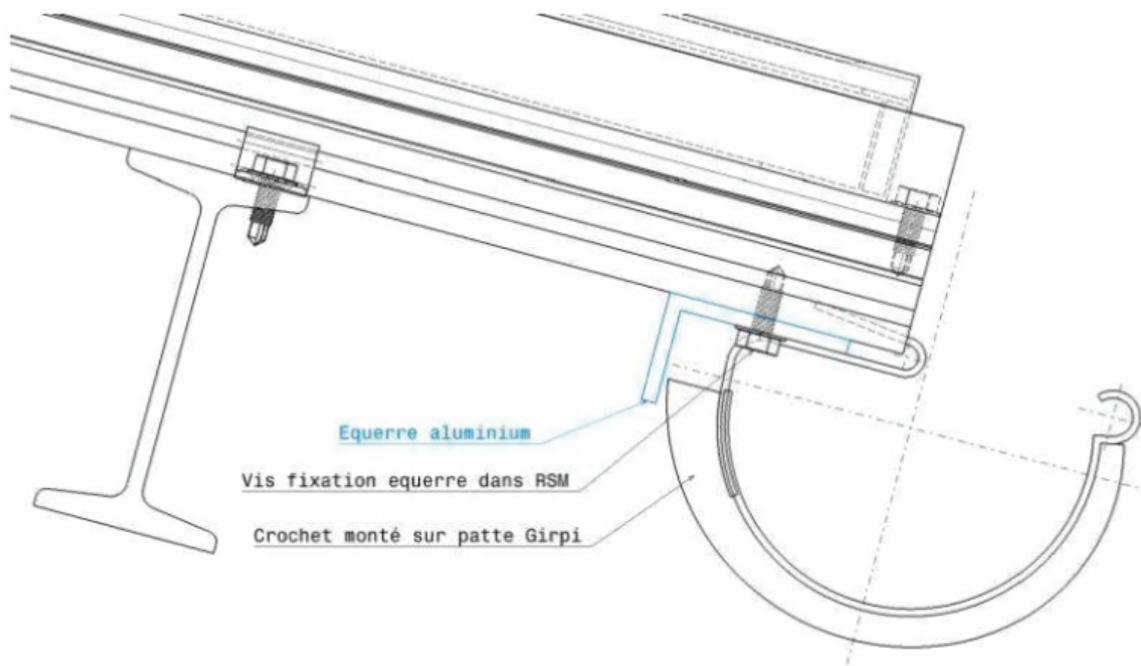


Abbildung 49: Konstruktionsdetail Rinnen-Montage an Solarpanels (Seifert, 2025).

Die Rinnen können mit Schutzgittern vor Verunreinigung geschützt werden. Vor allem bei hochaufgeständerten Anlagen ist dies von großem Vorteil, weil der Reinigungsaufwand der Rinnen mit der Höhe zunimmt.

Von der eigentlichen Regenrinne wird das Wasser entweder direkt abgeleitet, oder durch Sammelrohre in das Speichersystem geleitet. Die Sammelrohre befinden sich in den meisten Fällen, vor allem bei kleinen bis mittelgroßen Anlagen, an einer Stirnseite der Anlage (meist Ost- oder Westseite). Die Nutzung von mehreren Sammelrohren ermöglicht einen größeren Abfluss und eine größere Neigung der Rinnenstücke. Der Auslauf von der Rinne in das Sammelrohr muss immer am niedrigsten Punkt der Rinne liegen.

Teilweise sind die Sammelrohre als Fallrohre ausgebildet und führen unterirdisch zum Tank, teilweise liegen sie aber auch knapp unter der Höhe der Regenrinnen und sind, genau wie diese, an der Unterkonstruktion der Solarpanels befestigt. Dies hängt ganz vom Aufbau der Anlage und vom Standort des Sammelbehälters ab.

Für die unterirdische Weiterleitung des Wassers sollten KG-Rohre verwendet werden. Das sind handelsübliche Kanalrohre, die druckstabil sind und für die unterirdische Verlegung ausgelegt sind. Die Rohre müssen unterhalb der Bearbeitungstiefe verlegt werden, sodass eine Beschädigung der Rohre ausgeschlossen wird. Zudem müssen auch sie mit einem ausreichenden Gefälle verlegt werden.

Die Rinnensysteme sind an die Abflussmenge des Regenwassers angepasst. Sind die Systeme überlastet oder verstopft, kommt es zum Überlauf der Rinnen und das

herabtropfende Wasser kann für Splash-Erosion oder das Abschwemmen von Saatgut sorgen.

5.5.2.4 Drainage Systeme

Auch Drainage-Systeme können für das Rainwater-Harvesting genutzt werden. Hierbei fließt das Wasser ungehindert von den Solar-Panels ab, tropft auf den Boden und wird dort vom Drainage-System aufgenommen. Solche Systeme werden vor allem in Obst- oder Beerenanlagen genutzt, da diese mit weniger Sonneneinstrahlung auskommen und so direkt unter den Panels platziert werden können. Zudem gewährt ihnen die Anlage so maximalen Schutz vor Regenschäden oder Hagelschlag (Vollmer, 2022). Somit kann der Panel-Zwischenraum genutzt werden, um die Drainage zu installieren. Durch eine Drainage kann eine sehr hohe Regenmenge in kurzer Zeit aufgenommen werden, da sie über eine große Oberfläche verfügt. Bousi (2024) gibt für eine Anlage in den Niederlanden eine unlimitierte Speicherkapazität an, da das Wasser zur Bewässerung genutzt wird und überschüssiges Wasser durch eine Drainageschicht fließt, dort wieder aufgesammelt und aufbereitet wird. Somit kann es im Kreislaufsystem wieder zur Bewässerung verwendet werden. Somit lässt sich in der Anlage Wasser und Düngemittel sparen. Dies ist besonders bei Anlagen für Beerenobst, in denen hohe Wasserbedarfe herrschen, interessant.



Abbildung 50: Detail RWH-System in einer bodennahen PV-Anlage in der Türkei (Sevik et al., 2022).

5.5.2.5 Wasserspeicherung

In den meisten hier untersuchten Anlagen wird das Wasser gesammelt, um es später seiner jeweiligen Nutzung zuzuführen. Dies ist vor allem die Bewässerung sowie die Modulreinigung. Die Speicherung des Wassers kann auf verschiedene Weise realisiert werden. In den meisten Anlagen werden Tanks zur Speicherung verwendet. Diese sind oft als Kunststofftank ausgeführt, vor allem bei kleineren Speichervolumen (Abbildung 51). Größere Tanks bestehen oft aus beschichtetem Metall (Abbildung 52). Außerdem

können Betonbecken oder Retentionsteiche zur Speicherung genutzt werden. Die Dimensionierung des Wasserspeichers hängt von diversen Faktoren ab. Die praktische Grenze bildet die vorhandene Fläche für Speichermöglichkeiten, welche sich möglichst auch in der Nähe der PV- oder APV-Anlage befinden sollte. Ist dies nicht der Fall, ist die Installation von Rohrsystemen und Pumpen nötig, die das Wasser zum Tank verbringen.

Weiterhin müssen die potenziell sammelbare Regenmenge und der Wasserbedarf der Fläche, beachtet werden. Die Dimensionierung der Anlagen, also auch der Speicherkapazität, sollte nach dem Wasserbedarf der Fläche in einem „typischen trockenen Jahr“ bemessen werden. (Bousi, 2024). Hierzu sollte der Standard Precipitation Index der Fläche herangezogen werden. Dieser Index charakterisiert die Niederschlagsverhältnisse eines bestimmten Zeitraums im Vergleich zu den Normalwerten. Zu jedem Niederschlagswert kann so die Standardabweichung zum Normalwert ermittelt werden, womit Niederschlagsüberschüsse und Dürren charakterisiert werden (Deutscher Wetterdienst).

Die monatlich potenziell sammelbare Wassermenge ergibt sich aus dem monatlichen Niederschlag auf der Fläche, der effektiven Modulfläche und dem Run-Off-Koeffizienten (Effizienz) der Module (siehe Kapitel 6.2). Diese Menge muss nun mit dem Wasserbedarf verglichen werden, der in einem „typischen trockenen Jahr“ auf der betroffenen Fläche voraussichtlich herrscht. Zudem kann eine Pufferkapazität eingeplant werden, um mehr Wasser speichern zu können, wenn kein oder wenig Bedarf herrscht.

Die in dieser Arbeit betrachteten RWH-Systeme haben Speichermöglichkeiten zwischen 1 m³ (Sevik et al., 2022) und 385 m³ (Bousi, 2024). In der Anlage von Bay.Wa.re Palaja, Frankreich, in der das Wasser zum Tränken von Tieren verwendet wird, liegt ein durchschnittlicher jährlicher Niederschlag von 622 mm vor. Bei einem jährlichen Bedarf von 73 m³ wurde hier ein Speicher von 10 m³ installiert (ca. 13,7 % des Bedarfs). In der Anlage in Alhendin, Südspanien, in der das Wasser zu Reinigung der Module genutzt wird, gibt es lediglich 371 mm Niederschlag pro Jahr im Durchschnitt. Entsprechend wurde hier bei einem Wasserbedarf von ca. 300 m³ jährlich ein Speicher von 385 m³ installiert (ca. 128 % des Bedarfs). Die großen Unterschiede im Verhältnis von Regendargebot und Speicherkapazität zeigen, dass die Speicherkapazität jeder Anlage entsprechend ihrem Potenzial und ihrer Aufgabe geplant werden sollte und Standardisierung von Systemen schwer möglich sein werden. Auch die Häufigkeit und Intensität der Regenereignisse muss in die Überlegung einfließen. Müssen längere Trockenzeiten mit dem Wasserspeicher überdauert werden, sollte die Speicherkapazität ausreichen, um bei Starkregenereignissen viel Wasser auf einmal zu speichern, um es länger vorhalten zu können.



Abbildung 51: Speichertanks für das aufgefangene Wasser in einer bodennahen PV-Anlage in der Türkei (Sevik et al., 2022).



Abbildung 52: Detail Speichertank Rainwater-Harvesting-System in der APV-Anlage in Alhéndin, Südspanien (Bousi, 2024).

6. Case Study

6.1 Material und Methoden

In der vorliegenden Arbeit wird weiterhin eine Agri-PV-Anlage mit integriertem Rainwater-Harvesting modelliert. Das Ziel ist, das Potenzial der Regenwassersammlung in einer APV-Anlage aufzuzeigen.

6.1.1 Standort

Der geplante Standort der Anlage liegt am Rande des Thüringer Beckens im Weimarer Land in Mitteldeutschland. Bisher gibt es in Mitteldeutschland nur wenige APV-Anlagen. Zudem herrscht in der Region des Thüringer Beckens im Vergleich zu anderen Teilen Deutschlands relative Regenarmut, weswegen die Modellierung einer Anlage in dieser Region präferiert wurde.

Der Standort befindet sich in den gemäßigten Klimazonen Mitteleuropas auf ca. 230 m Höhe. Im Verhältnis zu den anderen Teilen Thüringens ist das Klima hier verhältnismäßig trocken und warm (Thüringer Landesamt für Umwelt Bergbau und Naturschutz, 2019). Das langjährige Mittel des Niederschlags in dieser Region beträgt 543 mm jährlich und die durchschnittliche Temperatur beträgt 8,3° C (Thüringer Landesamt für Landwirtschaft, 2025).

Die Anlage benötigt ca. 1 Hektar Fläche (Abbildung 53). Diese Fläche muss aufgrund der Konstruktion (siehe nächster Abschnitt) relativ eben sein und einen für die Verankerung geeigneten Untergrund bieten.

Zudem bietet der Standort die rechtlichen Voraussetzungen zum Bau einer Agri-PV-Anlage. Da APV-Anlagen auf landwirtschaftlichen Flächen errichtet werden, liegen diese oft außerhalb des Bebauungsplans laut §30 BauGB. Hier wird der Bau von APV-Anlage im Außenbereich (§35 BauGB) laut §35 Abs. 1 S 1 Nr. 9 BauGB privilegiert, sofern die Anforderungen an eine besondere Solaranlage (§ 48 Abs. 1 S. 1 Nr. 5 lit. a, b oder c EEG BauGB) erfüllt sind. Auf anderen Flächen kann eine Baugenehmigung deutlich schwieriger zu bekommen sein. (Fraunhofer ISE, 2022)

6.1.2 Konstruktion

Die Anlage wird als hochaufgeständerte Anlage der Kategorie 1 B (Fraunhofer ISE, 2022) modelliert. Das bedeutet, dass sie für den Anbau von ein- und überjährigen Ackerkulturen geeignet sein muss und die Feldbearbeitung mit entsprechenden Maschinen in der

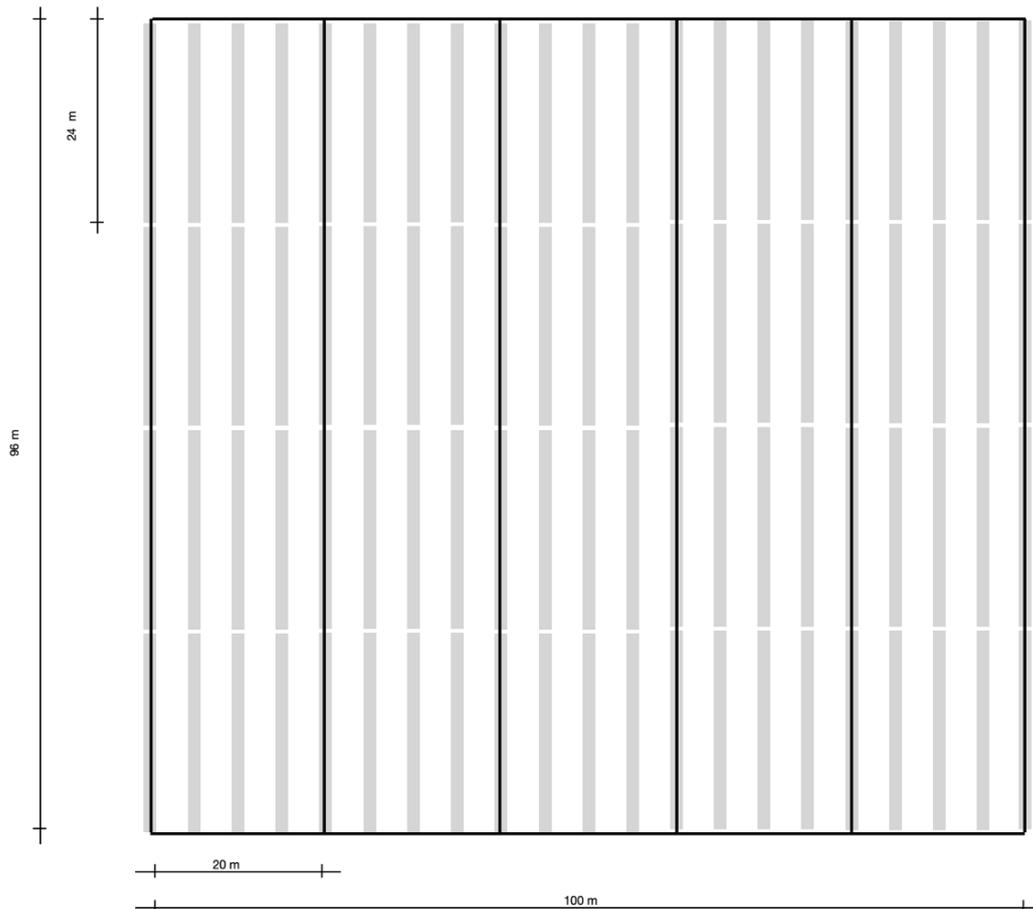


Abbildung 53: Draufsicht auf die modellierte APV-Anlage in Mittelthüringen. Die Modulreihen sind in grau gehalten, die Unterkonstruktion ist in schwarz gehalten (eigene Darstellung).

Anlage möglich sein muss. Aufgrund dessen wurde eine aufgeständerte Fachwerk-Konstruktion gewählt, die in Durchfahrtsrichtung 20 m Pfeilerabstand bietet (Abbildung 54). Das Stahlfachwerk wird auf Stahlstützen montiert, die eine lichte Durchfahrts Höhe von 5 m ermöglichen. Die Bodenverankerung wird als Spinnanker mit Ankerplatte und Gewindestäben ausgeführt.

Die Planung der Anlage sollte stark auf die anzubauende Kultur angepasst sein. Die konstruktiven Merkmale haben Einfluss auf die mikroklimatischen Vorgänge in der Anlage. Der Bedeckungsgrad der Anlage liegt bei ca. 30,3 % (bei 27° Winkelstellung), was im üblichen Bereich für APV-Anlagen liegt. Der Bedeckungsgrad ist der Anteil der Fläche der APV-Anlage, die von Modulen verdeckt ist. Die Modulreihen verlaufen von Ost nach West und sind nach Süden geneigt. Die Module besitzen eine Fläche von 1,1 m x 1,7 m pro Panel, was eine Modulfläche von 3298,68 m² ergibt. Sie teilen sich auf 21 Modulreihen mit jeweils 96 m Länge auf. Pro Reihe sind 84 Module verbaut, was eine Gesamtzahl von 1764 Modulen ergibt. Die Module sind fest verbaut. In der Modellierung wurden mehrere Neigungswinkel der Module in Bezug auf ihr Potenzial,

Regenwasser zu sammeln, untersucht. Hierbei wurden die Werte von 20° , 27° und 34° angenommen, da diese Werte ungefähr den minimalen und maximalen Werten entsprechen, die in den vorher untersuchten Veröffentlichungen gefunden wurden. Die geringste Neigung ($19,6^\circ$) wies hierbei eine Anlage in Indien auf, die von Santra et al. untersucht wurden. (Santra et al., 2018) Die größte Neigung (34°) wies eine Anlage in China auf (Ye et al., 2023). Außerdem wurde eine weitere Panelstellung untersucht, für die ein Mittelwert (27°) der beiden Extremwerte gebildet wurde.

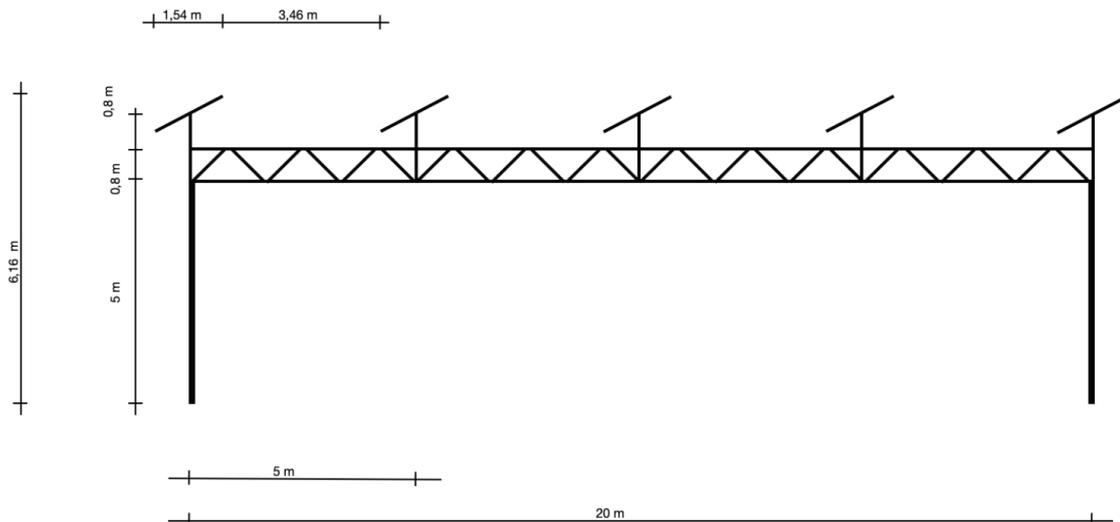


Abbildung 54: Schnitt der modellierten APV-Anlage in Mittelthüringen (eigene Darstellung).

6.1.3 Konstruktion RWH

Durch ihre starre Konstruktion bietet die APV-Anlage gute Voraussetzungen, um ein RWH-System zu integrieren. Das aufgefangene Wasser soll zur zusätzlichen Bewässerung dienen. Als Auffangrinnen werden Kastenrinnen (Nenngröße 400, 150 mm breit) vorgesehen. Sie werden unter der Abtropfkante der Panels direkt in der Unterseite mit einem Aluminiumprofil verschraubt (Abbildung 55). Sie besitzen ein Gefälle von 1° , um einen guten Abfluss zu gewährleisten. Eine Ausstattung mit Schutzgittern kann sie vor Verschmutzung schützen. Die Rinnen verlaufen jeweils über 24 m. An ihren Enden befinden sich Tropfkästen, um das Wasser in die rechtwinklig verlaufenden Sammlerinnen zu leiten. Die größeren Sammlerinnen (Nenngröße 500, 200 mm breit), welche hängend an der Metallkonstruktion verschraubt werden, führen quer zu den Modulreihen an die Stirnseiten der Anlage. Auch sie besitzen eine Neigung von 1 %. An der Stirnseite der Anlage werden die Rinnen, um die Durchfahrt zu

ermöglichen, in der lichten Höhe von 5 m von der Anlage weggeführt und in die Sammelbehälter geleitet. Um die ganze Anlage mit Auffangrinnen auszustatten, würden 2.016 m Rinnen benötigt werden. Außerdem würden ca. 450 m der breiteren Sammelrinnen benötigt werden.

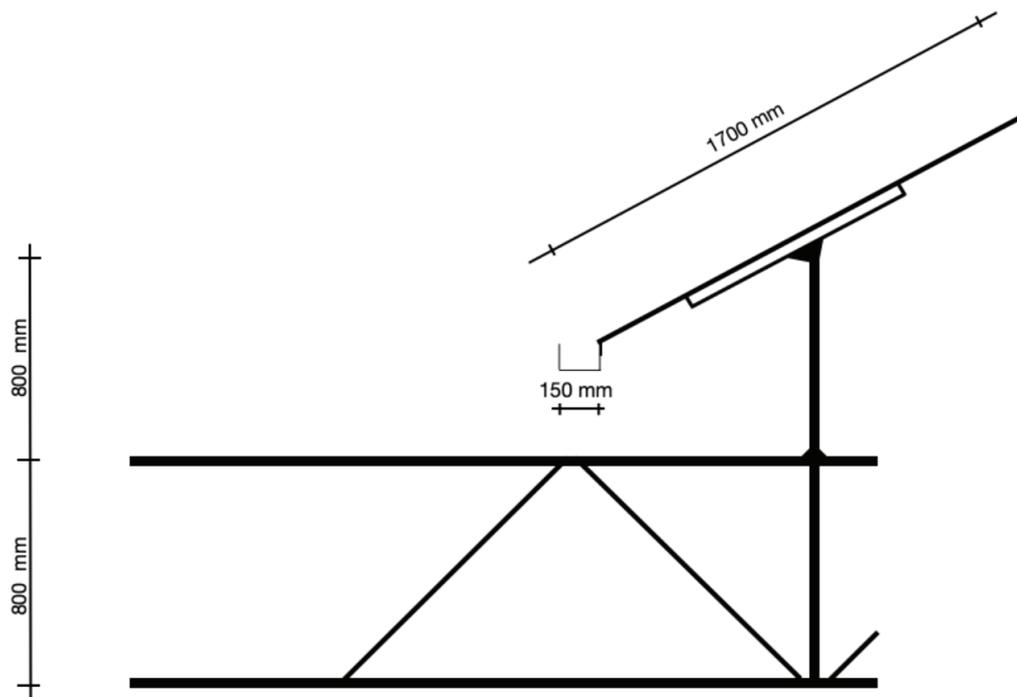


Abbildung 55: Detail Modul und Regenrinne der modellierte APV-Anlage in Mittelthüringen (eigene Darstellung).

6.1.4 Kulturplanung

Die Anbaufläche in der Anlage beträgt ca. 9600 m². Die Anlage ist für alle Arten von Reihenkulturen mit erhöhter Schattentoleranz geeignet, sofern Arbeitsgeräte unter 20 m Breite verwendet werden können. Als Beispiel wird in dieser Arbeit der Anbau von Kartoffeln angenommen. Diese Kultur würde dem Wasserverlust aus dem Boden effektiv reduzieren (Keinath, 2021). Zudem hat sie eine ausreichende Schattentoleranz.

Kartoffeln benötigen in einem durchschnittlichen Jahr rund 430 mm Wasserversorgung über ihre Wachstumsphase von ca. vier Monaten. An heißen Sommertagen können Peaks von ca. 7,5 mm Wasserbedarf täglich entstehen (Kaspar et al., 2020). Das bedeutet, dass in heißen Sommermonaten ein Wasserbedarf von bis zu 232,5 mm monatlich entstehen kann.

6.2 Methodik

Das Modell soll auf sein Potenzial zur Regenwassersammlung geprüft werden. Hierfür wird die potenziell sammelbare Wassermenge evaluiert. Diese definieren Ye et al. als die Menge an Niederschlag, welche direkt auf die empfangende, also sammelnde Oberfläche trifft. (Ye et al., 2023) Die Rainwater-Harvesting-Potential-Gleichung von Zambrano et al. (2021) drücken dies wie folgt aus:

$$PW = 10 \cdot K \cdot H \cdot F$$

PW beschreibt die jährlich sammelbare Wassermenge in m³.

K ist der Runoff-Koeffizient.

H ist der langjährige mittlere Niederschlag.

F ist die effektive Sammelfläche.

Diese ergibt sich aus der senkrecht auf den Boden projizierten Fläche der Module:

$$F = l \cdot \cos(\alpha) \cdot b \cdot n$$

l ist die Länge der Module.

b ist die Breite der Module.

α ist der Anstellwinkel der Module.

n ist die Anzahl der Module.

Der langjährige mittlere Niederschlag wird aus den Klimadaten einer Wetterstation der Region entnommen.

Die effektive Sammelfläche entspricht der Modulfläche, welche senkrecht auf den Boden projiziert wird. Aus diesem Grund hat die Neigung der Panels Einfluss auf das RWH-Potenzial.

Die Gesamtmodulfläche beträgt 3298,68 m². Bei den drei verschiedenen betrachteten Winkelstellungen ergeben sich drei effektive Flächen für die Wassersammlung und Bedeckungsgrade (Tabelle 1).

Tabelle 1: Effektive Sammelfläche und Bedeckungsgrad in Abhängigkeit von der Winkelstellung der Module (eigene Darstellung).

Winkelstellung der Module	Effektive Sammelfläche der Anlage in m ²	Bedeckungsgrad in %
20°	3.098,81	31,94
27°	2939,71	30,30
34°	2734,02	28,18

6.3 Ergebnisse

Der langjährige mittlere Niederschlag der Region beträgt 543 mm. Der K-Faktor wurde einmal mit 1 angenommen um das ideale System darzustellen und einmal mit 0,75, um ein realitätsnahes Ergebnis zu erhalten.

Weiterhin wurde mit spezifischeren Wetterdaten gearbeitet, um das Rainwater-Harvesting Potenzial im Verlaufe des Jahres ersichtlich zu machen.

Kartoffeln benötigen in einem durchschnittlichen Jahr rund 430 mm Wasserversorgung über ihre Wachstumsphase. Das entspricht auf 9600 m² einer gesamten Menge von ca. 4128 m³ Wasser. In heißen Sommermonaten, an denen der Tagesbedarf auf bis zu 7,5 mm pro Tag steigen kann, würde man für eine ausreichende Bewässerung 232,5 mm monatlich benötigen. Das entspricht einer Menge von ca. 2232 m³ Wasser monatlich auf der hier angenommenen Fläche.

Von 2014 bis 2024 hätten im Jahr durchschnittlich etwa 1129,15 m³ Wasser jährlich gesammelt werden können (bei 27° Neigung und 75 % Effizienz), was ca. 27,3 % des Jahresbedarfes entspricht (Abbildung 56 und Tabelle 2). Das entspricht ca. 0,38 m³ Wasser pro m² effektiver Modulfläche jährlich. Im trockenen Hitzejahr 2018 hätten hier

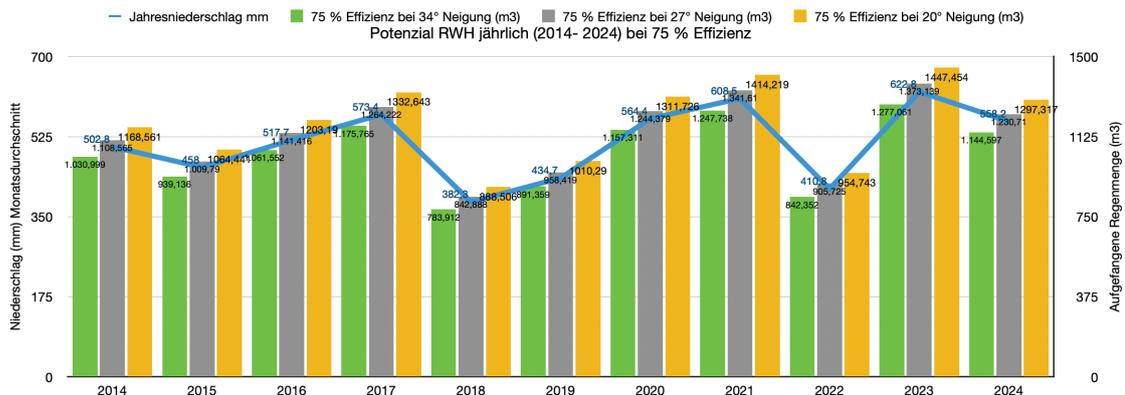


Abbildung 56: Jährliches RWH-Potenzial der modellierten APV-Anlage bei einer Winkelstellung von 27° bei 75 % Effizienz von 2014 bis 2024 (eigene Darstellung).

Tabelle 2: Jährliches RWH-Potenzial der modellierten APV-Anlage bei verschiedenen Winkelstellungen von 2014 bis 2024 (eigene Darstellung).

	Jahresniederschlag mm	Aufgefangene Regenmenge (Neigung 34°) in m ³	Aufgefangene Regenmenge (Neigung 27°) in m ³	Aufgefangene Regenmenge (Neigung 20°) in m ³	75 % Effizienz bei 34° Neigung (m ³)	75 % Effizienz bei 27° Neigung (m ³)	75 % Effizienz bei 20° Neigung (m ³)
2014	502,8	1374,665256	1478,086188	1558,081668	1030,998942	1108,564641	1168,561251
2015	458	1252,18116	1346,38718	1419,25498	939,13587	1009,790385	1064,441235
2016	517,7	1415,402154	1521,887867	1604,253937	1061,5516155	1141,41590025	1203,19045275
2017	573,4	1567,687068	1685,629714	1776,857654	1175,765301	1264,2222855	1332,6432405
2018	382,3	1045,215846	1123,851133	1184,675063	783,9118845	842,88834975	888,50629725
2019	434,7	1188,478494	1277,891937	1347,052707	891,3588705	958,41895275	1010,28953025
2020	564,4	1543,080888	1659,172324	1748,968364	1157,310666	1244,379243	1311,726273
2021	608,5	1663,65117	1788,813535	1885,625885	1247,7383775	1341,61015125	1414,21941375
2022	410,8	1123,135416	1207,632868	1272,991148	842,351562	905,724651	954,743361
2023	622,8	1702,747656	1830,851388	1929,938868	1277,060742	1373,138541	1447,454151
2024	558,2	1526,129964	1640,946122	1729,755742	1144,597473	1230,7095915	1297,3168065

lediglich 842,9 m³ gesammelt werden können (20,4 % des Jahresbedarfs). Im Jahr 2023 war das Potenzial der letzten zehn Jahre mit 1373,1 m³ am größten (33,26 % des Jahresbedarfs) (Abbildung 57 und Tabelle 3). Das entspricht ca. 0,467 m³ pro m². Im Jahr 2024 hätte man in der Anlage von Januar bis Anfang Juli (bei 27° Neigung) eine Regenmenge von 403,1 m³ sammeln können (Abbildungen 58 und Tabelle 4). Dies entspricht etwa 18 % des Bedarfs für einen sehr heißen Monat.

In den Herbst- und Wintermonaten gibt es keinen Bewässerungsbedarf. Der hier sammelbare Niederschlag könnte also gänzlich für die Vegetationsphase in Frühjahr und Sommer vorgehalten werden. Betrachtet man den Zeitraum von Oktober 2023 bis März 2024, so hätten sich in dieser Zeit 624 m³ Wasser sammeln lassen (bei 27° Neigung und 75 % Effizienz) (siehe Abbildung 57 und 58). Das entspricht einem Anteil von ca. 15,1 % am Gesamtwasserbedarf der Kultur, welcher schon vor der Vegetationsphase bereit steht.

Diese Erkenntnis ist für die Dimensionierung des Speichers zu beachten. Der durchschnittliche Wasserstand vor Beginn der Vegetationszeit kann als Maß für den Maximalstand des Speicherbeckens herangezogen werden, da bis zu diesem

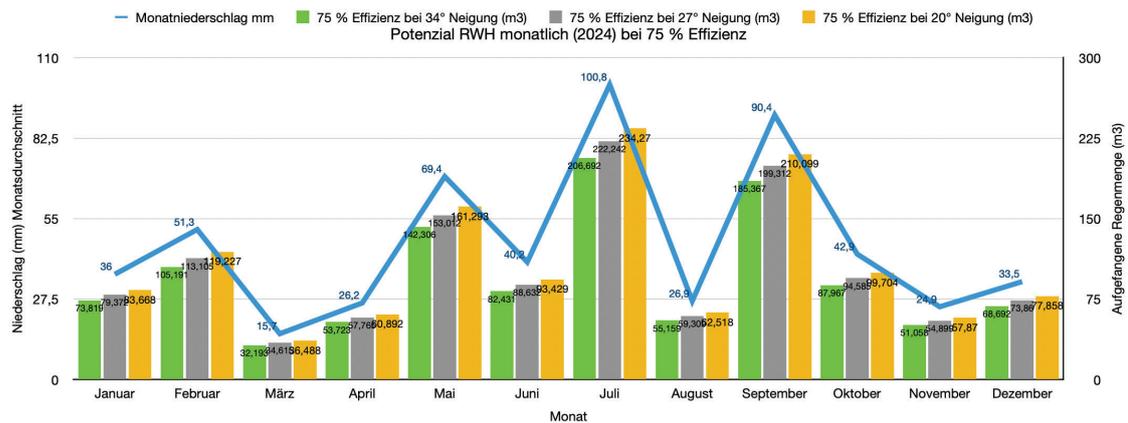


Abbildung 57: Monatliches RWH-Potenzial der modellierten APV-Anlage bei einer Winkelstellung von 27° bei 75 % Effizienz im Jahr 2024 (eigene Darstellung).

Tabelle 3: Monatliches RWH-Potenzial der modellierten APV-Anlage bei verschiedenen Winkelstellungen im Jahr 2024 (eigene Darstellung).

2024	Monatniederschlag mm	Aufgefangene Regenmenge (Neigung 34°) m ³	Aufgefangene Regenmenge (Neigung 27°) m ³	Aufgefangene Regenmenge (Neigung 20°) m ³	75 % Effizienz bei 34° Neigung (m ³)	75 % Effizienz bei 27° Neigung (m ³)	75 % Effizienz bei 20° Neigung (m ³)
Januar	36	98,42472	105,82956	111,55716	73,81854	79,37217	83,66787
Februar	51,3	140,255226	150,807123	158,968953	105,1914195	113,10534225	119,22671475
März	15,7	42,924114	46,153447	48,651317	32,1930855	34,61508525	36,48848775
April	26,2	71,631324	77,020402	81,188822	53,723493	57,7653015	60,8916165
Mai	69,4	189,740988	204,015874	215,057414	142,305741	153,0119055	161,2930605
Juni	40,2	109,907604	118,176342	124,572162	82,430703	88,6322565	93,4291215
Juli	100,8	275,589216	296,322768	312,360048	206,691912	222,242076	234,270036
August	26,9	73,545138	79,078199	83,357989	55,1588535	59,30864925	62,51849175
September	90,4	247,155408	265,749784	280,132424	185,366556	199,312338	210,099318
Oktober	42,9	117,289458	126,113559	132,938949	87,9670935	94,58516925	99,70421175
November	24,9	68,077098	73,198779	77,160369	51,0578235	54,89908425	57,87027675
Dezember	33,5	91,58967	98,480285	103,810135	68,6922525	73,86021375	77,85760125

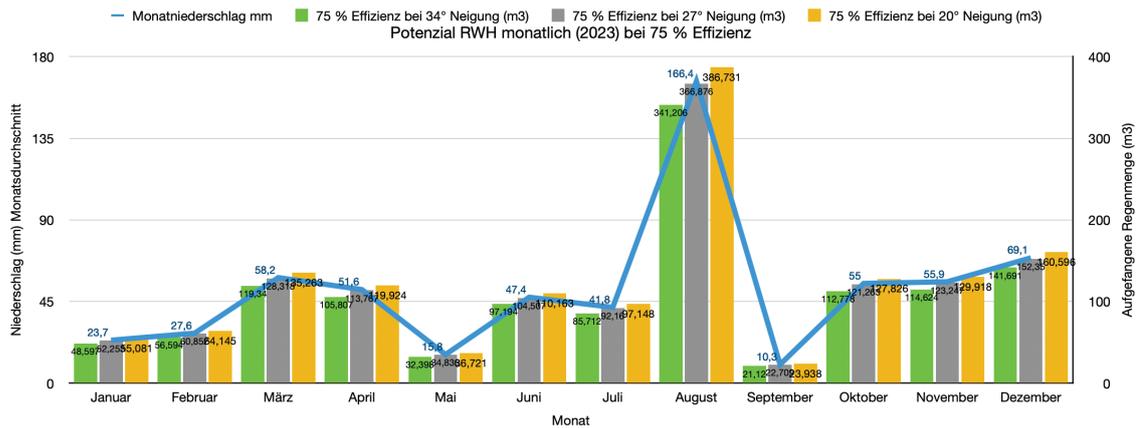


Abbildung 58: Monatliches RWH-Potenzial der modellierten APV-Anlage bei einer Winkelstellung von 27° bei 75 % Effizienz im Jahr 2023 (eigene Darstellung).

Tabelle 4: Monatliches RWH- Potenzial der modellierten APV- Anlage bei verschiedenen Winkelstellungen im Jahr 2023 (eigene Darstellung).

2023	Monatniederschlag mm	Aufgefangene Regenmenge (Neigung 34°) m³	Aufgefangene Regenmenge (Neigung 27°) m³	Aufgefangene Regenmenge (Neigung 20°) m³	75 % Effizienz bei 34° Neigung (m³)	75 % Effizienz bei 27° Neigung (m³)	75 % Effizienz bei 20° Neigung (m³)
Januar	23,7	64,796274	69,671127	73,441797	48,5972055	52,25334525	55,08134775
Februar	27,6	75,458952	81,135996	85,527156	56,594214	60,851997	64,145367
März	58,2	159,119964	171,091122	180,350742	119,339973	128,3183415	135,2630565
April	51,6	141,075432	151,689036	159,898596	105,806574	113,766777	119,923947
Mai	15,8	43,197516	46,447418	48,961198	32,398137	34,8355635	36,7208985
Juni	47,4	129,592548	139,342254	146,883594	97,194411	104,5066905	110,1626955
Juli	41,8	114,282036	122,879878	129,530258	85,711527	92,1599085	97,1476935
August	166,4	454,940928	489,167744	515,641984	341,205696	366,875808	386,731488
September	10,3	28,160406	30,279013	31,917743	21,1203045	22,70925975	23,93830725
Oktober	55	150,3711	161,68405	170,43455	112,778325	121,2630375	127,8259125
November	55,9	152,831718	164,329789	173,223479	114,6237885	123,24734175	129,91760925
Dezember	69,1	188,920782	203,133961	214,127771	141,6905865	152,35047075	160,59582825

Zeitpunkt Wasser gesammelt werden kann, ohne etwas auszubringen. Da in diesem Fall der Wasserbedarf der Kultur (Kartoffel) die Potenziell sammelbare Wassermenge überschreitet, sollte so viel Wasser gespeichert werden können, wie möglich. Zusätzlich zur Kapazität, die gebraucht wird, um die Niederschläge des Herbstes und Winters vorzuhalten, könnte deshalb eine Pufferkapazität eingeplant werden, die es ermöglicht, auch die zusätzlichen Niederschläge des Frühjahrs zu sichern. Zu dieser Zeit herrscht noch ein geringer Bewässerungsbedarf, der die Nutzung des gespeicherten Wassers möglicherweise erst später im Jahr nötig macht. Sind die Speicher aber am Ende des Winters schon voll, geht das sammelbare Wasser des Frühjahrs verloren. Mit Blick auf die sammelbaren Wassermengen im April und Mai der Jahre 2023 und 2024, könnte es deswegen sinnvoll sein, eine Kapazität von 200 m³ zusätzlich einzuplanen.

6.4 Fazit

Die hier vorliegende Case Study zeigt die potenziell in der geplanten Anlage sammelbare Regenmenge. Bei einer Effizienz von 75 % ließen sich über die letzten 10 Jahre im Durchschnitt 27,3 % des gesamten Wasserbedarfs der Kultur auffangen. Die Betrachtung der Jahre 2023 und 2024 zeigt von Monat zu Monat große Unterschiede des Niederschlags. Im August der Jahres 2023 fiel ca. 16 mal mehr Regen als im folgenden September. Im Juli des Jahres 2024 fiel ca. vier mal so viel Niederschlag wie im folgenden August. Das zeigt, dass vor allem in der Hauptvegetationsphase große Inhomogenität in der Niederschlagsmenge vorliegt. Durch gespeichertes Wasser aus einem Tank könnte diese Inhomogenität teilweise ausgeglichen werden. Hierfür sollte in der vorliegenden Case Study im Optimalfall ein Speicher von ca. 850 m³ vorgesehen werden, um auch das volle Potenzial des Niederschlags der Herbst-, Winter-, und Frühjahrsmonate nutzen zu können.

Im Vergleich zu anderen in dieser Arbeit betrachteten Anlagen zeigt sich, dass das Potenzial für eine trockene Region durchaus realistisch sein könnte. Ye et al. (2023) ermittelten in den ariden Gebieten Chinas (507 mm jährlicher Niederschlag) mit einem Modell, dass einen Run-Off-Koeffizienten von 1 angibt, eine sammelbare Wassermenge von 0,418 m³ pro m² Modulfläche, was ein vergleichbarer Wert ist (Case Study: 0,382 m³).

Vor allem, da die Anlage in einer der trockensten Regionen Deutschlands geplant ist, kann der Vorteil der selbstbestimmten Einteilung des Wassers bedeutend sein. Auch wenn das aufgefangene Wasser in diesem Fall nur ein Zusatz zur weiteren Bewässerung sein kann, bietet das RWH-System weitere Vorteile wie eine Verhinderung der Splash-Erosion und Run-Off. Auf landwirtschaftlicher Ebene würde die Anlage die Fläche also aufwerten. Zudem könnte die niederschlagsarme Fläche auch wirtschaftlich resilienter werden, da trockenheitsbedingte Ernteeinbußen mit Stomerträgen ausgeglichen werden können. Eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung müsste vor dem Bau der Anlage betrieben werden.

7. Fazit und Diskussion

In der vorliegenden Arbeit wurde gezeigt, dass Photovoltaik und Agri-Photovoltaikanlagen negative und positive Einflüsse auf den Wasserkreislauf einer Fläche haben. Es wurde beschrieben, wie die Implementierung von Regenwasser-Management negative Einflüsse der APV wie Erosion oder inhomogene Bodenfeuchteverteilung abschwächen oder verhindern kann. Weiterhin wurden die Nutzung von APV-Anlagen zur Wassersammlung beschrieben und ihr Potenzial mithilfe

eines Modells in einer Case Study erörtert. Damit wurde aufgezeigt, dass Regenwasser-Management in Kombination mit APV einen Lösungsansatz zur Abschwächung von Extremwetterereignissen bietet.

Obwohl die Kenntnisse über den Einfluss von PV- und APV-Anlagen auf den Wasserkreislauf und den Bodenwasserhaushalt durch diverse Feldversuche immer besser werden, sind bisher noch in wenigen PV- und APV-Anlagen Wassermanagement-Systeme installiert. Der steigende Kenntnisstand bietet jedoch eine gute Grundlage, diese in Zukunft effizient und zielgerichtet in den dafür geeigneten PV- und APV-Anlagen zu errichten.

Der Ausbau der erneuerbaren Energien verschafft den APV-Anlagen einen Aufschwung. Zusätzlich zur klimafreundlichen Energie können APV-Anlagen durch die doppelte Flächennutzung einen Beitrag gegen die Flächenverknappung liefern. Die Kategorien der Anlagen nach DINSpec 91434 und deren technische Besonderheiten wurden vorgestellt. Außerdem wurde eine Klassifizierung verschiedener Anlagentypen aufgezeigt.

Das Potenzial der Stromerzeugung durch APV wird in Deutschland auf 130 GW geschätzt, was der Nutzung von 1 % der landwirtschaftlichen Fläche entspräche (Stiftung Klimaneutralität, 2021). Der positive Effekt der APV-Anlagen für die Landwirtschaft könnte auf weit mehr Flächen genutzt werden. Denn die Anlagen bieten eine Schutzwirkung gegen Hitze und Dürre, Starkregen sowie Hagel. Damit können sie dazu beitragen, die Auswirkungen des Klimawandels auf die Landwirtschaft abzumildern. Verschiedene Publikationen gehen von einer möglichen Ertragssteigerung von 60-70 % aus, wenn man die Stromerträge und die landwirtschaftlichen Erträge kombiniert.

Die Literaturrecherche zeigt, dass ein großes Spektrum an Themen im Bereich Wassermanagement in APV in der Literatur behandelt wird. Die Literatur stammt aus verschiedenen Ländern. Die Publikationen beziehen sich zum Großteil auf die mikroklimatischen Bedingungen in APV-Anlagen und die Niederschlags- und Bodenfeuchteverteilung. In vielen Publikationen, in denen die Ertragsveränderung untersucht wurde, wurden auch die mikroklimatische Bedingungen untersucht. Zum Thema Rainwater-Harvesting bieten die Publikationen wenig Daten. In einigen Anlagen, in denen Wassermanagement und Rainwater-Harvesting-Systeme installiert wurden, wurden keine Daten erhoben.

Die Arbeit zeigt, dass Einwirkung von meteorologischen Faktoren sowie das Mikroklima von APV-Anlagen beeinflusst werden.

Es wird aufgezeigt, dass die Bodentemperatur durch die Verschattung im Sommer niedriger gehalten werden kann. Im Winter kann eine PV-Anlage die Temperatur des Bodens höher halten. Weiterhin wurde festgestellt, dass der Bereich unter PV und APV weniger anfällig für Extreme in der Bodentemperatur ist.

Auch für die Lufttemperatur wurde in den meisten Publikationen, in Abhängigkeit von der Konstruktion der Anlage, eine Abkühlung unter PV- und APV-Anlagen festgestellt. Alle Publikationen bestätigen eine inhomogenere Verteilung von Niederschlag in APV- und PV-Anlagen. Dies ist abhängig von der Konstruktionsart und dem Bedeckungsgrad der Anlage. Für diesen Vorgang wurden Lösungsansätze aufgezeigt. Eine Rinne, die abtropfendes Wasser auffängt, kann konzentrierten Niederschlag unter der Tropfkante verhindern. Zudem kann in Anlagen mit ein- und zweiachsig nachführbaren Modulen die Niederschlagsverteilung durch die Modulstellung optimiert werden. Im Bereich direkter Wasserverteilung herrscht weiterhin Forschungsbedarf.

Die Untersuchung der relativen Luftfeuchtigkeit wies in verschiedenen Publikationen unterschiedliche Ergebnisse auf. Es wurden einerseits oft höhere, andererseits auch niedrigere Werte als auf den Referenzflächen gemessen. Hier liegt nahe, dass das Klima und der Aufbau der Anlage mehr Einfluss besitzen. Hier besteht erhöhtes Forschungspotenzial.

Weiterhin zeigt die Arbeit auf, dass die verminderte auftreffende Sonnenstrahlung auch einen Einfluss auf den Wasserhaushalt in APV- und PV-Anlagen haben kann. Durch die Verschattung wird die potenzielle Evapotranspiration als einer der größten Treiber der Evapotranspiration vermindert.

Der Einfluss von APV-Anlagen auf die Evapotranspiration konnte in diversen Veröffentlichungen bestätigt werden. Teilweise wurde, vor allem in kälteren Perioden, eine erhöhte Evapotranspiration in der Anlage befunden. Größtenteils konnte jedoch eine Verringerung dieser unter den Modulen festgestellt werden, was zu einer Wasserersparnis im Bodenwasserhaushalt führt. Die größten Verminderungen konnten in den Sommermonaten, also bei mehr Sonneneinstrahlung und höheren Temperaturen, gemessen werden.

Die Arbeit zeigt außerdem, dass auch die Bodenfeuchte und deren Verteilung von APV- und PV-Anlagen beeinflusst wird. In allen Veröffentlichungen wurde eine inhomogenere Bodenfeuchteverteilung gemessen. Zudem wurde in Untersuchungen angestellt, wie sich diese Verteilung vergleichmäßigen lässt. Hierbei gilt die Sammlung des Regenwassers als wirtschaftlichste Lösung. Zudem wurde befunden, dass durch APV- und PV-Anlagen eine Erhöhung der absoluten Bodenfeuchte möglich ist. Je nach Bodenart gleicht sich die Bodenfeuchte bereits in oberen oder eher nur in tieferen Bodenschichten aus und kehrt sich zum Teil um, mit höheren Werten unter der APV-Anlage.

Auch die Bodenerosion als Effekt von APV- und PV-Anlagen wird in den Publikationen erläutert. Es wird eine negative Auswirkung der Abtropfkante bestätigt. Zudem geht man durch die inhomogene Niederschlagsverteilung von einer unterschiedlich starken Erosion innerhalb der Anlagen aus. Lösungsansätze wie RWH oder Anti-Erosionsmatten wurden aufgezeigt.

Die Arbeit zeigt Möglichkeiten auf, wie sich die Nutzung von Solarenergie im Wassermanagement etablieren lässt.

Desweiteren wird das Rainwater-Harvesting als Element des Wassermanagements beschrieben, und verschiedene Formen des RWH werden aufgezeigt.

Die Arbeit stellt Ergebnisse von Publikationen vor, in denen das Rainwater-Harvesting in PV- und APV-Anlagen mithilfe von Feldstudien, Modellen und Berechnungen untersucht wurde. Die Ergebnisse zeigen, dass in vielen Teilen der Erde zum Thema RWH in PV und APV geforscht wird. In einigen Versuchen konnten die Wasserbedarfe, die größtenteils aus Bewässerung und Modulsäuberung entstanden, gedeckt werden. In anderen Versuchen konnten nur Teile des Bedarfs aufgefangen werden. In anderen Veröffentlichungen wurde kein Wasserbedarf angegeben. Aufgrund verschiedenster Anlagenaufbauten und klimatischer Bedingungen sind die Ergebnisse nur bedingt vergleichbar. Die Ergebnisse zeigen, dass RWH in PV und APV potenziell den Wasserbedarf für landwirtschaftliche Zwecke oder Modulsäuberung decken kann. Hier besteht weiteres Forschungspotenzial, vor allem im Zusammenhang mit der technischen Ausstattung der Anlage, um die Effizienz des RWH weiter zu erhöhen. Weiterhin wurde die Eignung verschiedener PV- und APV-Anlagen zum RWH erläutert. Die Vorgänge beim RWH wurden aufgezeigt und die technischen Bestandteile der PV und APV-Anlagen im Bezug auf RWH erläutert. Technische Lösungsansätze zur Realisierung von RWH-Anlagen wurden aufgezeigt und an Beispielen aus Publikationen belegt.

Zudem wird in der Arbeit eine Case Study vorgelegt, die das RWH-Potenzial einer fiktiven Überkopf-APV-Anlage, in der Kartoffelanbau stattfindet, aufzeigt. Die Modellierung und der Aufbau der Anlage wurde beschrieben. Unter Berücksichtigung der klimatischen Bedingungen konnte berechnet werden, dass ca. ein Viertel des jährlichen Wasserbedarfs der Kultur gedeckt werden kann. Das Ergebnis der Case Study zeigt, dass RWH unter Berücksichtigung des relativ trockenen Gebiets in Mitteleuropa und der angebauten Kultur einen Beitrag zur gleichmäßigeren Bewässerung der Kultur liefern kann.

Die Arbeit zeigt, dass RWH in PV- und APV-Anlagen ein hohes Potenzial hat, Wasser zur Bewässerung von Kulturen, zum Reinigen der Module oder zur Versorgung von Tieren zur Verfügung zu stellen. Mithilfe von Speichertanks können die Systeme zur Überbrückung von Trockenphasen dienen.

Darüber hinaus schwächt RWH die inhomogene Niederschlagsverteilung ab und hilft, die Bodenqualität zu sichern und eine gleichmäßige Bodenfeuchte aufrecht zu erhalten. Dieser Nebeneffekt erhöht die schon vorhandene Schutzwirkung von APV-Anlagen auf Boden und Kultur und kann somit zur landwirtschaftlichen Resilienz beitragen.

Zudem kann RWH mit handelsüblichen Rinnensystemen mit wenig technischem und finanziellen Aufwand installiert werden. Da der Bau von PV- oder APV-Anlagen große Investitionen darstellt, sollten verhältnismäßig kleine Kosten für RWH-Systeme entstehen.

Es wurde gezeigt, dass in der Forschung ein steigendes Augenmerk auf RWH in APV- und PV-Anlagen gelegt wird. Die weiterführende, auch nachträgliche, Installation von RWH sollte im Hinblick auf die klimatischen Veränderungen verfolgt und gefördert werden. Der gleichzeitige Ausbau der Forschung zum Thema könnte für eine weitere Entwicklung von RWH in PV- und APV sorgen.

Literaturverzeichnis

Adeh, E. H., Selker, J. S., Higgins, C. W. (2018). remarkable agrivoltaic influence on soil moisture. *Micrometeorology and Water-Use Efficiency*. Italien: Plos ONE. 2018. 13(11): e0203256.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203256>.

Al-agele, H. (2021): A Case Study of Tomato- Production and Water Productivity in Agerivoltaic Systems. *Sustainability* 2021, 13, 2850, S. 1- 13.

<https://doi.org/10.3390/su13052850>

Alazzam, I., Shatanawi, K., & Al-Weshah, R. (2024). rainwater and fog harvesting from solar panels. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 10(3), 955-968.

<https://doi.org/10.22034/gjesm.2024.03.02>

Al Mamun, M. A., Dargusch, P., Wadley, D., Zulkarnain, N. A., Aziz, A. A. (2022). a review of research on agrivoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier(161).

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112351>.

Barron-Gafford, G., Minor, R.L., Allen, E.A., Cronin, D., Brooks, A.E., Pavao-Zuckerman, M.A. (2016). the photovoltaic heat island effect: larger solar power - plants increase local temperatures. *Sci. Rep.* 6, 35070,

<https://doi.org/10.1038/srep35070>

Barron-Gafford, G., Pavao-Zuckerman, M., Minor, R., Sutter, L., Barnett-Moreno, I., Blackett, D., Thompson, M., Dimond, K., Gerlak, A., Nabhan, G., Macknick, J. (2019). agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands. *Nature Sustainability*. 2. 848-855.

<https://doi.org/10.1038/s41893-019-0364-5>.

Baumgartner, A., & Liebscher, H. J. (1990). *Allgemeine Hydrologie–Quantitative Hydrologie Lehrbuch der Hydrologie*, Bd. 1. Gebrüder Bornträger, Berlin, Stuttgart.

Bilen, K., & Erdoğan, İ. (2023). effects of cooling on performance of photovoltaic/thermal (PV/T) solar panels: A comprehensive review. *Solar Energy*, 262, 111829.

<https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.111829>

Boers, T. M., & Ben-Asher, J. (1982). A review of rainwater harvesting. *Agricultural Water Management*, 5(2), 145-158.

[https://doi.org/10.1016/0378-3774\(82\)90003-8](https://doi.org/10.1016/0378-3774(82)90003-8)

Bousi, E. (2024). Rainwater Harvesting in Agrivoltaic Systems, as presented at Fraunhofer ISE Lecture series, 2024

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. (2020). Daten und Fakten. Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft mit Fischerei und Wein- und Gartenbau. Aufgerufen am 10.03.2025 von:
https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/daten-fakten-2022.pdf?__blob=publicationFile&v=8

Chaitanya Rain Harvest Product and Systems. (2018). Rainwater Drainage Gutters – A Lifeline for Your RWH System. Aufgerufen am 05.03.2025 von:
<https://www.chaitanyaproducts.com/blog/rainwater-drainage-gutters-rwh-system/>

Chekired, F., Richa, A., Touil, S., & Bingwa, B. (2022). energy yield evaluation of a rainwater harvesting system using a novel agrophotovoltaics design. *Desalination and Water Treatment*, 255, 27-33.
<http://dx.doi.org/10.5004/dwt.2022.28318>

Choi, C. S., Macknick, J., Li, Y., Bloom, D., McCall, J., & Ravi, S. (2023). environmental co-benefits of maintaining native vegetation with solar photovoltaic infrastructure. *Earth's Future*, 11(6),
<https://doi.org/10.1029/2023EF003542>

Deutsches Institut für Normung e.V. (2021). Agri-Photovoltaik-Anlagen – Anforderungen An Die Landwirtschaftliche Hauptnutzung. Berlin: Beuth Verlag. 2021. S. 26. DIN SPEC 91434:2021-05.
Aufgerufen am 05.03.2025 von:
<https://www.din.de/de/wdc-beuth:din21:337886742>

Deutscher Wetterdienst DWD (o.J.) Standard Precipitation Index (SPI). Wetter- und Klimalexikon. Aufgerufen am 18.03.2025 von:
<https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv3=603324&lv2=102248>

Dupraz, C., Talbot, G., Marrou, H., Wery, J., Roux, S., Liagre, F., Nogier, A. (2011). to mix or not to mix - evidences for the unexpected high productivity of new complex agrivoltaic and agroforestry Systems. Paris: INRA. 2011. Aufgerufen am 05.03.2025 von:
https://www.researchgate.net/publication/230675951_To_mix_or_not_to_mix_evidences_for_the_unexpected_high_productivity_of_new_complex_agrivoltaic_and_agroforestry_systems.

Elamri Y., Cheviron B., Mange A., Dejean C., Liron F., Belaud G. (2018). Rain concentration and sheltering effect of solar panels on cultivated plots. *Hydrology and Earth Science* 22, S. 1285-1298.
<https://doi.org/10.5194/hess-22-1285-2018>

Ewind Betreiber- und Vertriebs-GmbH. (2022). Irrigation Nets - Flutpräventions-Photovoltaik. Abgerufen am 12.01.2025 von:
<http://Irrigationnets.Com/#Imprint>.

Ewind Betreiber- und Vertriebs-GmbH. (2025). Feldraine.de. Wassermanagement-Photovoltaik.

Aufgerufen am 05.03.2025 von:

<https://feldraine.de/startseite/bewaessern/>

Falkenmark, M., Fox, P., Persson, G., & Rockström, J. (2001). water harvesting for upgrading of rainfed agriculture. *Problem Analysis and Research Needs*, 76-87.

ISSN 1404-2134. Aufgerufen am 05.03.2025 von:

[https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/FALKENMARK et al 2001 Water Harvesting for Upgrading of Rainfed Agriculture.pdf](https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/FALKENMARK%20et%20al%202001%20Water%20Harvesting%20for%20Upgrading%20of%20Rainfed%20Agriculture.pdf)

Feistel, U., Kettner, S., Ebermann, J., Müller, F., Werisch, S., (2022): Wie PV-Freiflächen den Bodenwasserhaushalt verändern - Begleitforschung im größten Solarpark Deutschlands. *Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, Heft 43.22, S. 43- 52

<https://doi.org/10.14617/for.hydrol.wasbew.43.22>

Feistel, U., Lux, G. (2023): 6 Jahre Forschung zum Einfluss von PV- und APV-Anlagen an der HTW Dresden. *Agri-Photovoltaik Forum Sachsen 2023*. Aufgerufen am 05.03.2025 von:

https://www.landwirtschaft.sachsen.de/download/Ulrike_Feistel-APV-Forum_SN_Feistel_Lux_rev6i.pdf

Feistel, U., Team Ingenieurhydrologie. (2025). Auswirkungen von Solarmodulen auf Wasserhaushalt und Mikroklima. 29.01.2025. Nationales APV Forum Dresden.

Feistel, U., Team Ingenieurhydrologie. (2025). Präsentation: Auswirkungen von Solarmodulen auf den Wasserhaushalt - was wissen wir (nicht)? 29.01.2025. Nationales APV Forum HTW Dresden.

Feistel, U., Werisch, S., Marx, P., Kettner, S., Ebermann, J., Wagner, L. (2022b). Assessing the impact of shading by solar panels on evapotranspiration and plant growth using lysimeters. *AIP Conference Proceedings* 2635, 150001, S. 2- 6.

<https://doi.org/10.1063/5.0103124>

Fernández-Raga, M., Palencia, C., Keesstra, S., Jordán, A., Fraile, R., Angulo-Martínez, M., & Cerdà, A. (2017). splash erosion: A review with unanswered questions. *Earth-Science Reviews* 171, 463-477.

<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.06.009>.

Frank G.A. Verheijen, A.C.B. (2023). avoid severe (future) soil erosion from agrivoltaics. *Science of The Total Environment*, 873, 162249.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162249>.

Fraunhofer ISE. (2022). Agri-Photovoltaik: Chancen für Landwirtschaft und Energiewende. Ein Leitfaden für Deutschland. Aufgerufen am 05.03.2025 von: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/APV-Leitfaden.pdf>.

Helmreich, B., & Horn, H. (2009). opportunities in rainwater harvesting. *Desalination*, 248(1-3), 118-124.
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.05.046>.

Hörnle, O., Riedelsheimer, J., Trommsdorff, M., Keinath, T., Binder, F., Weinmann, E., et al (2021). Durchführbarkeitsstudie zur Ermittlung möglicher Forschungs- und Demonstrations-Felder für Agri-Photovoltaik In Baden-Württemberg. Abschlussbericht, Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme, Erneuerbare Energien, Freiburg Im Breisgau. 2021.
<https://doi.org/10.24406/publica-fhg-416837>

InstaTurf Soft Armor. (2025). The Growing Demand for Agrivoltaics and the Role of InstaTurf® in Erosion Control on Solar Farms. Aufgerufen am 05.03.2025 von: <https://insta-turf.com/the-growing-demand-for-agrivoltaics-and-the-role-of-instaturf-in-erosion-control-on-solar-farms/>

Jiang, S., Tang, D., Zhao, L., Liang, C., Cui, N., Gong, D., ... & Peng, Y. (2022). effects of different photovoltaic shading levels on kiwifruit growth, yield and water productivity under “agrivoltaic” system in Southwest China. *Agricultural Water Management*, 269, 107675
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107675>

Juillion, P., Lopez, G., Fumey, D., Lesniak, V., Génard, M., Vercambre, G. (2022). shading apple trees with an agrivoltaic system - impact on water relations, leaf morphophysiological characteristics and yield determinants. *Scientia Horticulturae*. 306, 111434.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111434>.

Kaspar, M., Kellermann, A. (2020). Bewässerung von Kartoffeln - Gut für Qualität und Umwelt. *Beratungsblatt ALB Bayern e. V.* Ausgabe 1. 4/2020. Aufgerufen am 05.03.2025 von: https://www.alb-bayern.de/De/Bewaesserung/BewaesserungsforumBayern/Ergebnisse/produktqualitaet-naehrstoffeffizienz-planungssicherheit_bef4.html

Keinath, T. (2021). Reduktion der Evapotranspiration durch Agri-Photovoltaik. In 36. PV-Symposium/ BIPV Forum 2021. Aufgerufen am 05.03.2025 von: <https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/c79a6bd4-1f0b-4e6a-a3ac-e3a1eec44e13>

Liu, Y., Zhang, R. Q., Huang, Z., Cheng, Z., López-Vicente, M., Ma, X. R., & Wu, G. L. (2019). solar photovoltaic panels significantly promote vegetation recovery by modifying the soil surface microhabitats in an arid sandy ecosystem. *Land Degradation & Development*, 30. 18.
<https://doi.org/10.1002/ldr.3408>

Luboń, W., Pełka, G., Janowski, M., Pająk, L., Stefaniuk, M., Kotyza, J., & Reczek, P. (2020). assessing the impact of water cooling on pv modules efficiency. *Energies*, 13, 2414.

<http://dx.doi.org/10.3390/en13102414>

Mekdaschi Studer, R. and Liniger, H. 2013. *Water Harvesting: Guidelines to Good Practice*. Centre for Development and Environment (CDE), Bern; Rainwater Harvesting Implementation Network (RAIN), Amsterdam; MetaMeta, Wageningen; The International Fund for Agricultural Development (IFAD), Rome. Aufgerufen am 05.03.2025 von:

https://www.researchgate.net/publication/259190040_Water_Harvesting_Guidelines_to_Good_Practice

Meier-Grüll, M., Jedmowski, C., Hoelscher, K., Müller, C., Raumann, L., Pieters, B., Gerber, A., Trommsdorff, M., Berwind, M., Muller, O. (2024). agri-horti-pv research system in north rhine-westphalia including pv trackers and integrated rainwater harvesting. *AgriVoltaics Conference Proceedings*.

<http://dx.doi.org/10.52825/agripv.v1i.632>

Meinardi, D., Röttcher, K. (2025). Wassermanagement unter einer Agri-Photovoltaikanlage. Institut für nachhaltige Bewässerung und Wasserwirtschaft im ländlichen Raum der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften. Vorgetragen im Rahmen der Agrivolatrics Lecture Series der Fraunhofer ISE 2025 am 27. Februar 2025

Myers, L.E. (1974). water harvesting, 2000 bc to 1974 ad. In Frasier, G.W. (ed), *Proceedings of the water harvesting symposium, March 26-29, 1974, Phoenix, Arizona*

Marrou, H., Dufour, L., & Wery, J. (2013). how does a shelter of solar panels influence water flows in a soil–crop system?. *European Journal of Agronomy*, 50, 38-51.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2013.05.004>

Marrou, H., Guilioni, L., Dufour, L., Dupraz, C., Wery, J. (2013b). microclimate under agrivoltaic systems: is crop growth rate affected in the partial shade of solar panels? *Agricultural and Forest Meteorology* 177, 117–132.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.04.012>

Nearing, M. A., Bradford, J. M., & Holtz, R. D. (1987). measurement of waterdrop impact pressures on soil surfaces. *Soil Science Society of America Journal*, 51, 1302-1306.

<https://doi.org/10.2136/sssaj1987.03615995005100050038x>

Omer, A. (2022). water evaporation reduction y the agrivoltaic systems development. *Solar Energy*, S. 13- 23. Elsevier Ltd.

<https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.10.022>

Ramos-Fuentes, I. A., Elamri, Y., Cheviron, B., Dejean, C., Belaud, G., & Fumey, D. (2023). effects of shade and deficit irrigation on maize growth and development in fixed and dynamic AgriVoltaic systems. *Agricultural Water Management*, 280, 108187. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108187>

Randle-Boggis, R. J., Barron-Gafford, G. A., Kimaro, A. A., Lamanna, C., Macharia, C., Maro, J., Hartley, S. (2024). harvesting the sun twice: Energy, food and water benefits from agrivoltaics in East Africa. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 208, 115066. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115066>

Rößner, J. (2022). rainwater management in agrivoltaic systems - research and development potential. 8th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, S. 996- 998. Fraunhofer Institut for Solar Energy Systems. Aufgerufen am 05.03.2025 von: https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/conference-paper/wcpec-8/Roessner_4AO84.pdf&ved=2ahUKEwjYvLWYwaaJAxWpxQIHHZ06KGwQFnoECBUQAQ&usg=AOvVaw1wMXVIBWUncx1stWqUyPYv

Rumbayan, M., Pundoko, I., Sompie, S. R., & Ruindungan, D. G. (2025). integration of smart water management and photovoltaic pumping system to supply domestic water for rural communities. *Results in Engineering*, 25, 103966. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.103966>

Santra, P., Singh, R. K., Meena, H. M., Kumawat, R. N., Mishra, D., Jain, D., & Yadav, O. P. (2018). agri-voltaic system: crop production and photovoltaic-based electricity generation from a single land unit. *Indian Farming*, 68(1). Aufgerufen am 05.03.2025 von: <https://epubs.icar.org.in/index.php/IndFarm/article/view/80411>

Seifert, E., (2025). Präsentation: Dreiklang in der Landwirtschaft aus Agri-PV, Regenwassersammlung und Bewässerung – ein Praxiskonzept. Agrokraft GmbH. Vorgetragen am 25.01.25

Şevik, S., & Aktaş, A. (2022). performance enhancing and improvement studies in a 600 kW solar photovoltaic (pv) power plant; manual and natural cleaning, rainwater harvesting and the snow load removal on the PV arrays. *Renewable Energy*, 181, 490-503. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.09.064>

Singh, V. P. (1992). *Elementary hydrology*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall. ISBN: 0132493845. Aufgerufen am 05.03.2025 von: <https://archive.org/details/elementaryhydrol0000sing>

Stiftung Klimaneutralität. (2021). Photovoltaik (PV) - Potenziale. Literaturrecherche. Berlin, 18. Februar 2021. Aufgerufen am 05.03.2025 unter: <https://www.stiftung-klima.de/app/uploads/2021/02/2021-02-18-PV-Potentiale-Literaturrecherche.pdf>

Sturzflut - Informationsportal rund um Starkregen, Sturzfluten und Hochwasser. (2021).
Flutpräventions- Photovoltaik. Aufgerufen am 05.03.2025 von:
<https://sturzflut.com/publikation/flutpraeventions-photovoltaik/>

SUNfarming GmbH. (o. J.). Sunfarming Agri- Photovoltaik Tierwohlanlagen.
Aufgerufen am 10.03.2025 von:
<https://sunfarming.de/geschaeftsbereich/agri-und-oeko-solaranlagen/sunfarming-tierwohlanlagen>

Thüringer Landesamt für Landwirtschaft. (2025). Agrarmeteorologie Thüringen.
Stationskarte. Wetterstation Buttstedt (TLLLR). Aufgerufen am 05.03.2025 von:
<https://www.wetter-th.de/Internet/AM/NotesTAM.nsf/thamweb/2207936106064950c1257f1700375deb?OpenDocument>

Thüringer Landesamt für Umwelt Bergbau und Naturschutz. (2019). Die vier Thüringer
Klimabereiche und ihre klimacharakteristischen Merkmale. Aufgerufen am 05.03.2025
von:
https://tlubn.thueringen.de/fileadmin/000_TLUBN/Klima/Dokumente/Witterungsdiagnosen/tabelle_thueringer_klimabereiche.pdf

Trommsdorff, M., Kang, J., Reise, C., Schindele, S., Bopp, G., Bauerle, A., . . .
Obergfell, T. (2021). combining food and energy production: design of an agrivoltaic
system applied in arable and vegetable farming in Germany. *Renewable and
Sustainable Energy Reviews*. Elsevier. 140. 110694.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110694>

Tsutsumi, A., Jinno, K., Berndtsson, R. (2004). surface and subsurface water balance
estimation by the groundwater recharge model and a 3-D two-phase flow model.
*Hydrological Sciences Journal-journal Des Sciences Hydrologiques - HYDROLOG SCI
J*. 49.
<https://doi.org/10.1623/hysj.49.2.205.34837>.

United Nations. (2024). United Nations World Water Development Report 2024.
UNESCO, Paris.
Aufgerufen am 05.03.2025 von:
<https://www.unwater.org/publications/un-world-water-development-report-2024>

Vollmer, V. (2022). Agri-Photovoltaik. Aktueller Forschungsstand sowie fallspezifische
Wirtschaftlichkeitsbetrachtung. MA-Arbeit FH Erfurt. Aufgerufen am 05.03.2025 von:
<https://www.fh-erfurt.de/fileadmin/Dokumente/Personen/LGF/Wydra/>

Weselek, A., Bauerle, A., Hartung, J., Zikeli, S., Lewandowski, I., & Högy, P. (2021).
agrivoltaic system impacts on microclimate and yield of different crops within an
organic crop rotation in a
temperate climate. *Agronomy for Sustainable Development*, 41, 59.
<https://doi.org/10.1007/s13593-021-00714-y>

Weselek, A., Ehmann, A., Zikeli, S., Lewandowski, I., Schindele, S., & Högy, P. (2019). *agrophotovoltaic systems: applications, challenges and opportunities. A review.* Springer Nature.

<https://doi.org/10.1007/s13593-019-0581-3>:

Willockx, B. (2020). *agrivoltaic systems: why not prioritize crops that grow in the dark? a case study with white asparagus.* Leuven: KU Leuven. Abgerufen am 16. Februar 2022 von:

<https://limo.libis.be/primo->

[explore/fulldisplay?docid=LIRIAS3374333&context=L&vid=Lirias&search_scope=Lirias&tab=default_tab&lang=en_US&fromSitemap=1](https://limo.libis.be/primo-explore/fulldisplay?docid=LIRIAS3374333&context=L&vid=Lirias&search_scope=Lirias&tab=default_tab&lang=en_US&fromSitemap=1)

Willockx, B., Herteleer, B., Ronsijn, B., Uytterhaegen, B., & Cappelle, J. (2020). *a standardized classification and performance indicators of agrivoltaic systems.* Proceedings of the 37th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Lisbon, Portugal (pp. 7-11).

<http://dx.doi.org/10.4229/EUPVSEC20202020-6CV.2.47>

Wirth, H. (2025). *Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland.* Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme, Erneuerbare Energien, Freiburg. 2025. Aufgerufen am 05.03.2025 von:

<https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.html>

Wydra, K., Vollmer, V., Schmidt, S., Prichta, S., Kunze, R., Aulich, H. (2022) *Potential der Agri-Photovoltaik in Thüringen.* Solarinput e.V. und Fachhochschule Erfurt.

Aufgerufen am 05.03.2025 von:

<https://www.fh-erfurt.de/fileadmin/Dokumente/Personen/LGF/Wydra/APV-Studie.pdf>

XiamenTop Best Tech CO. (2022). *Solar mounting waterproof M-rails.* Aufgerufen am 06.03.2025 von:

<https://www.solarpartcomponents.com/pv-waterproof-rail>

Ye, W., Ma, E., Liao, L., Liang, S., Ji, Y., & Yu, S. (2023). *applicability of photovoltaic panel rainwater harvesting system in improving water-energy-food nexus performance in semi-arid areas.* Science of The Total Environment, 896, 164938.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164938>

Zambrano-Prado, P., Muñoz-Liesa, J., Josa, A., Rieradevall, J., Alamús, R., Gasso-Domingo, S., & Gabarrell, X. (2021). *assessment of the food-water-energy nexus suitability of rooftops. A methodological remote sensing approach in an urban Mediterranean area.* Sustainable Cities and Society, 75, 103287.

<https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103287>

Zotarelli, L., Dukes, M. D., Romero, C. C., Migliaccio, K. W., & Morgan, K. T. (2010). *step by step calculation of the penman-monteith evapotranspiration (FAO-56 Method).* Institute of Food and Agricultural Sciences. University of Florida, 8.

<https://doi.org/10.32473/edis-ae459-2010>

Danksagung

An dieser Stelle möchte den Menschen danken, die mich während meiner Bachelorarbeit unterstützt haben.

Zuerst gilt mein Dank Frau Prof. Dr. Kerstin Wydra von der FH Erfurt. Sie hat meine Bachelorarbeit betreut und stand mir immer mit großem Engagement zur Seite.

Außerdem möchte ich Herr Prof. Axel Klapka von der FH Erfurt danken. Als Fachbetreuer hat er meine Arbeit unterstützt.

Weiterhin gilt mein Dank meinen Freunden und meiner Familie, die mich unentwegt unterstützt haben und mir Motivation und emotionalen Beistand entgegenbrachten.

Erfurt, 20. März 2025

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, Hannes Frömchen, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Alle Stellen der Arbeit, die wortwörtlich oder sinngemäß aus anderen Quellen übernommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfbehörde vorgelegen.

Ort, Datum

Hannes Frömchen