

PV2Float

Technologieentwicklung für schwimmende PV-Kraftwerke und deren Implementierung zum Einsatz auf künstlichen Gewässern

Schlussbericht PV2Float-Teilvorhaben

Bestimmung technischer und sozioökonomischer Voraussetzungen für die nachhaltige Erschließung von FPV-Potenzialen

Andreas Beinert, Matthew Berwind, Sebastian Gölz, Ingrid Hädrich, Thomas Kaltenbach, Stefan Wieland

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE in Freiburg, September 2026

Zuwendungsempfänger: Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V., Hansastraße 27c, 80686 München

Förderkennzeichen: 03EE1097A

Laufzeit des Vorhabens: 01.05.2021 – 31.12.2025

Berichtszeitraum: 01.05.2021 – 31.12.2025

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

Danksagung

Das Forschungsprojekt PV2FLOAT wurde in der Zeit vom 01.05.2021 bis zum 31.12.2025 durch den Projektträger Jülich (PtJ) unter dem Förderkennzeichen 03EE1097A betreut. Die Finanzierung erfolgte aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, wofür wir uns herzlich bedanken.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	3
1 Ausgangssituation des Vorhabens	7
1.1 Aufgabenstellung	7
1.2 Voraussetzungen.....	7
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens.....	8
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand	9
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	10
2 Ablauf und Ergebnisse des Vorhabens	12
2.1 Verwendung der Zuwendung und Ergebnisse	12
2.1.1 AP 1: Projektmanagement	12
2.1.2 AP 2: Potenzialanalyse und Standortauswahl für die Versuchsanlage	13
2.1.3 AP 3: Genehmigungsprozesse und Akzeptanz	16
2.1.4 AP 4: Zuverlässigkeit, Qualitätssicherung und Normung.....	27
2.1.5 AP 5: Modulentwicklung.....	39
2.1.6 AP 6: Konzeption, Aufbau und Betrieb der Versuchsanlage	44
2.1.7 AP 7: Optimierung und Skalierung auf Großanlagen	51
2.1.8 AP 8: Ertragsmodell, Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit.....	58
2.1.9 AP 9: Ökologie	75
2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	77
2.3 Notwendigkeit der Arbeit	77
2.4 Verwertbarkeit der Ergebnisse	77
2.5 Relevante Ergebnisse von dritter Seite	77
2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen	78

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Erwarteter Fehler bei Bestimmung des Kühleffekts für FPV-Designs mit verschiedenen Faiman-Koeffizienten u_0 und u_1 . Grüne Punkte geben Standardwerte für u_0 und u_1 wieder. Linke Seite: Absoluter Fehler. Rechte Seite: Standardfehler.	14
Abbildung 2: Erfasste FPV-Anlagen und kumulierte Nennleistung für Deutschland (links) und Europa (rechts), Stand 02/2026.	14
Abbildung 3: FPV-Potenzialanalyse für Deutschland für zwei verschiedene FPV-Aufständierungen.	15
Abbildung 4: Schema zum Genehmigungsablauf für FPV-Anlagen in Deutschland.	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Abbildung 5: gewählte Randbedingungen für die CFD und mechanische Simulation. Die Wellengleichung wurde aus Standardliteratur aus Standardliteratur übernommen.	28
Abbildung 6: Links: Druckverteilung auf Grund von 20,8 m/s frontal auf das West-Modul eintreffender Wind. Rechts: Resultierende Deformation unter dem Einfluss von Wind (20.8 m/s) und Wellen (0.2m).	28
Abbildung 7: mechanische Zugspannung im Modulglas (links) und den Solarzellen (rechts). Oben ist jeweils das Ost-Modul und unten das West-Modul gezeigt.	29
Abbildung 8: Prüfprogramm für FPV.	29
Abbildung 9: Prüfmuster für Anschlussdosen mit zwei verschiedenen Klebematerialien Kleber#1 geöffnet (oben, links) und geschlossen (oben rechts), Kleber#2 geöffnet (unten links) und geschlossen (unten rechts).	30
Abbildung 10: Prüfmuster für Anschlussdosen mit zwei verschiedenen Klebematerialien (oben) und Haftprüfung gem. IEC 61215-2:2021 (unten).	31
Abbildung 11: Leaching-Test am FHG ISE Ansicht seitlich (links) und rückwärtig (rechts).	31
Abbildung 12: Leaching-Test am FHG ISE, Aufnahme vom 11.01.2024 DI-Wasserbecken (links) NaCl-Becken (rechts).	32
Abbildung 13: Maximum-Power-Tracking Spannungsverlauf am FHG ISE Kanal 0 Ohne NaCl, Kanal 0 mit NaCl im Winter (links) und Sommer (rechts).	32
Abbildung 14: Vergleichende Messung Effekt Leaching/Auswaschung von Schadstoffen Expositionszeitraum 15.11.2023 - 25.06.2024, 223 Tage.	33
Abbildung 15: Vergleichende Messung Effekt Leaching/Auswaschung von Schadstoffen Expositionszeitraum 26.06.2024 - 28.11.2025, 520 Tage.	33
Abbildung 16: Auswertung nach PFAS-Messung Effekt Leaching/Auswaschung von Schadstoffen Expositionszeitraum 26.06.2024 - 28.11.2025, 520 Tage.	34
Abbildung 17: Prinzip-Skizze für einen Belastungstest von Steckern und Kabeln (FHG ISE).	35

Abbildung 18: Vorrichtung für den mechanische Belastungstest von Steckern und Kabeln (links). Prüfmusterhalter für 5 Steckerpaare (Mitte) Testapparatur im Prüflauf (rechts) (FHG ISE).	36
Abbildung 19: Prüfmuster #1 nach 830 T Zyklen (links) und nach Dielectric Strength Test geöffnet (rechts).	36
Abbildung 20: Prüfmuster #2 nach 830 T-Zyklen (links) und nach Dielectric Strength Test geöffnet (rechts).	37
Abbildung 21: Prüfmuster #3 nach 830 T-Zyklen (links) und nach Dielectric Strength Test Stecker #3-3 geöffnet (rechts).	37
Abbildung 22: Minimodule BOM1 Ergebnisse Elektroluminiszenz initial (links) und nach 2000h 85°C, 85%RH (rechts).	41
Abbildung 23: Minimodule BOM 1 Ergebnisse visuelle Inspektion initial (links) und nach 2000h 85°C, 85%RH (rechts).	42
Abbildung 24: Ergebnisse elektrische Charakterisierung der Minimodule #61 bis #70 als relative Änderungen von initial zu 2000h 85°C, 85%RH.	42
Abbildung 25: Exposition der Mini-Module am Merdingen-Demonstrator seit 01.09.2025.	43
Abbildung 26: Exposition der Mini-Module in Lohsa auf dem Zimmermann-Demonstrator seit 28.08.2025.	43
Abbildung 27: FPV-Demonstratoren im PV2Float-Projekt.	44
Abbildung 28. Monitoring-Konzept. Standort Mortkasee.	47
Abbildung 29. Sensorik auf der Zimmermann Demonstrator.	48
Abbildung 30. PV2FLOAT-Datenplattform. Links: Karte mit den zwei Standorten. Rechts: Temperaturmessungen (Umgebung und Modul) aller vier PV-Anlagen über eine Woche.	48
Abbildung 31: Links: CAPEX $[f(x)]$ in €/kWp als Funktion von der Anlagengröße x (in kWp). Rechts: Anlagengrößenabhängiger OPEX.	57
Abbildung 32: Schematische Darstellung der mehrstufigen Datenaufbereitungs- und Filterkette mit Unterscheidung zwischen Basis- und analyseabhängigen, justierbaren Filtern.	59
Abbildung 33: Tägliche mittlere Modultemperaturen für Ostmodule (oben) und Westmodule (unten) der drei schwimmenden Demonstratoren am Mortkasee im Vergleichszeitraum 06.08.–01.11.2025. ProFloating (rot) zeigt durchgängig die höchsten Temperaturen bei mittlerem Ertrag, Zimmermann (blau) die niedrigsten Temperaturen bei höchstem Ertrag.	60
Abbildung 34: Modultemperaturdifferenz ($\Delta T_{mod} = T_{System} - T_{Merdingen}$) der drei Mortkasee-Systeme gegenüber der Landreferenz in Merdingen unter harmonisierten Wetterbedingungen. Beide Zimmermann-Designs (Merdingen und Mortkasee) zeigen	

<i>nahezu identisches thermisches Verhalten, was die Validität der Harmonisierungsmethodik bestätigt.</i>	<i>62</i>
<i>Abbildung 35: Leistungsvergleich der Demonstratoren unter harmonisierten Wetterbedingungen (Methode 2). Zimmermann und ProFloating erzielen eine Performance auf dem Niveau der Landreferenz Merdingen oder leicht darüber; Floating Solar liegt unterhalb der Landreferenz.</i>	<i>63</i>
<i>Abbildung 36: Hochdetailliertes 3D-Modell des Zimmermann-Demonstrators für die Ray-Tracing-Lichtsimulation. Sämtliche geometrische Elemente (Modulreihen, Wechselrichter, Unterkonstruktion, Horizont) sind abgebildet. Die Einstrahlung wird zellenaufgelöst berechnet – vergleichbar mit einem virtuellen Sensor auf jeder einzelnen Solarzelle.</i>	<i>65</i>
<i>Abbildung 37: Architektur des digitalen Zwillings. Die Simulationskette verbindet ein detailliertes Ray-Tracing-Lichtmodell mit dem thermischen Faiman-Modell und der elektrischen Ertragssimulation (Zenit). Berechnete Werte werden auf dem Mondas-Dashboard mit Messdaten verglichen und ermöglichen Parameteranpassung, Fehlerdetektion und die Bestimmung von Leistungsverlusten.</i>	<i>66</i>
<i>Abbildung 38: FPV-LCOEs für 2 Szenarien, differenziert nach chilenischen Regionen. ...</i>	<i>69</i>
<i>Abbildung 39: Systemgrenzen in der FPV-LCA.</i>	<i>72</i>
<i>Abbildung 40: Beiträge ausgewählter Phasen in der LCA für die Pontoon-Lösung (PS), Stahl-Lösung (SS) und Folien-Lösung (FS) für drei verschiedene Wirkungskategorien. ...</i>	<i>73</i>
<i>Abbildung 41: Beiträge der Komponenten in der LCA für die Pontoon-Lösung (PS), Stahl-Lösung (SS) und Folien-Lösung (FS) für drei verschiedene Wirkungskategorien.</i>	<i>74</i>

Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1: Abschätzung der Zyklen Anzahl für Belastungstest von Steckern und Kabeln (FHG ISE).</i>	<i>35</i>
<i>Tabelle 2: Rückseitenfolienprüfmuster.</i>	<i>40</i>
<i>Tabelle 3: Materialkombinationen für Minimodule (4-Zeller, 36cm x 36 cm).</i>	<i>41</i>
<i>Tabelle 4: Aus Messdaten abgeleitete Faiman-Koeffizienten U_0 und U_1 der vier Demonstratoren. Die Werte liegen in plausiblen Größenordnungen im Vergleich zu Literaturwerten (Dörenkämper et al., 2021). Zimmermann zeigt die höchsten Wärmeabfuhrkoeffizienten.</i>	<i>64</i>

1 Ausgangssituation des Vorhabens

1.1 Aufgabenstellung

In der ersten Phase des PV2FLOAT-Projekts (2021-2024) sollte das Fraunhofer ISE hauptsächlich die technischen bzw. sozioökonomischen Voraussetzungen zur Erschließung von Potenzialen schwimmender PV (auch „Floating PV“ oder „FPV“) untersuchen und deren nachhaltige Nutzung betrachten. Im Zuge dessen sollten standardisierte Prüfverfahren für Systemkomponenten entwickelt und besonders geeignete Modulaufbauten ermittelt werden. Hauptaugenmerk lag laut Aufgabenstellung dabei auf dem Bau von FPV-Demonstratoren verschiedener Montagevarianten, um durch deren Vergleich Kostenreduktionen, eine Optimierung der Verankerungs-, Tracking- und Schwimmkörpertechnik sowie effizienter Genehmigungs- und Partizipationsprozesse zu erörtern. Um parallel die Effizienz und Lebensdauer der FPV-Technologie zu erhöhen, sollten Materialeigenschaften der PV-Module untersucht sowie GPS-gesteuerte Ausrichtungssysteme und spezielle FPV-Ertragsmodelle entwickelt werden.

In der PV2FLOAT-Aufstockungsphase (2024-2025) war das Hauptziel des Fraunhofer ISE der Betrieb von drei verschiedenen FPV-Demonstratoren und einer Landreferenzanlage (mit einer Leistung von jeweils etwa 30 kWp) sowie die Aufzeichnung und die Auswertung dort aufgenommener Messdaten zu design- und umgebungsbedingten Einflüssen auf Stromertrag, Moduldegradation und -verschmutzung. Dabei sollten im Wesentlichen zwei Systemvergleiche angestellt werden: der zwischen drei unterschiedlichen schwimmenden Demonstratoren und ein weiterer Vergleich zweier baugleicher Anlagen in unterschiedlichen Umgebungen (Land und Wasser). Durch die Verwendung gleicher Modultypen/-ausrichtung/-neigung sowie gleicher Wechselrichter zielen diese Systemvergleiche auf die Quantifizierung der Rolle der FPV-Unterkonstruktion und seiner Umgebung auf Wärmetransfer, Bifazialitätsfaktor, FPV-Kühleffekt, Stromerträge und Degradation. Darüber hinaus sollte das ISE die FPV-Tauglichkeit von PV-Modulen und anderer Anlagenkomponenten untersuchen, verantwortete das Anlagenmonitoring, simulierte design- und umweltspezifische Einflüsse auf den Stromertrag, und transferierte die gewonnenen Ergebnisse auf FPV-Anlagen im Megawatt-Maßstab. In beiden Projektphasen war das Fraunhofer ISE für das Projektmanagement verantwortlich.

1.2 Voraussetzungen

Mit 1.400 Mitarbeitern ist das **Fraunhofer ISE** das größte Forschungsinstitut für Solarenergie in Europa mit langjähriger Erfahrung in der Charakterisierung von PV-Modulen sowie Prüfung, Performanceanalyse und techno-ökonomische Bewertung von PV-Kraftwerken verschiedenen Typs. Die Integration von PV in verschiedene Umgebungen stellt für das Institut ein strategisches Forschungsfeld höchster Priorität dar, welches im Falle der FPV seit 2019 mit einem eigenständigen Geschäftsfeld verfolgt wird. Dieses Geschäftsfeld hat sich in den vergangenen Jahren zum Zentrum der FPV-Forschung in Deutschland entwickelt, mit Beteiligung an internationalen, der Leitung nationaler Forschungsprojekte und der erfolgreichen Durchführung zahlreicher FPV-Projekte im Auftrag von Industrie und öffentlicher Hand.

Das Fachgebiet Gewässerökologie der **Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg (BTU)** beschäftigt sich mit der Ausbildung und Forschung in den Bereichen Gewässerökologie, Umweltingenieurwesen und Management von Gewässern. Auf dem Gebiet der Forschung besteht eine langjährige Expertise mit den Arbeitsschwerpunkten Ökologie von Stand- und Fließgewässern in Bergbaufolgelandschaften, Gewässerbelastungen, Gewässerbewertung entsprechend der Anforderungen der EU-Wasserrahmenrichtlinie, Sanierung und Restaurierung anthropogen veränderter Gewässer sowie Gewässeruntersuchungen aller Art. Zu einem Forschungsschwerpunkt der letzten Jahre hat sich neben der Befassung mit FPV-Anlagen die gewässerökologisch verträgliche thermische Nutzung

von Flüssen und Seen entwickelt. Durch die Zusammenarbeit mit dem Institut für Wasser und Boden Dr. Uhlmann, Dresden steht zudem ein langjähriger Partner der BTU für komplexe limnophysikalische Modellierungen von Seen zur Verfügung.

Die **RWE Renewables Europe & Australia GmbH (RWE)** konzentriert sich auf den Geschäftsbereich der Energieerzeugung aus erneuerbaren Energien, vor allem Windkraft und Photovoltaik, und stellt damit das zukünftige Kerngeschäft der RWE in den erneuerbaren Energien dar. Der Solarbereich befasst sich mit der Entwicklung, dem Bau und dem Vertrieb von Photovoltaikanlagen auf weltweit ausgewählten Märkten. Darüber hinaus werden innovative Entwicklungen und Ansätze wie FPV-Anlagen beobachtet und analysiert. Nach dem Rückzug von LEAG aus dem PV2FLOAT-Projekt war RWE – mit der GMB GmbH im Unterauftrag – für die Standortsuche und damit einhergehende Genehmigungsverfahren verantwortlich. Nach dem Ausstieg von Aton und Heckert Solar aus dem PV2Float-Projekt übernahm RWE außerdem – zusammen mit seinen Unterauftragnehmern Diliciency, meteocontrol und ecotec – die Beschaffung aller vier Demonstratoren sowie die Errichtung, Betrieb und elektrisches/thermisches Monitoring der drei schwimmenden Anlagen auf dem Mortkasee.

Die **VDE Renewables** unterstützt alle wesentlichen Marktteilnehmer bei der Sicherstellung technischer Qualität und der Wirtschaftlichkeit von Produkten und Systemen im Bereich der erneuerbaren Energien. Die VDE Renewables bietet ihren Kunden ein breites Spektrum von Prüf- und Messleistungen nach nationalen und internationalen Normen in den Bereichen Photovoltaik, Netzkonformität, Wind sowie Batterie- und Energiespeichersystemen. Zum Ende der ersten Projektphase ließ VDE seine Tätigkeiten im PV2FLOAT-Projekt ruhen, so dass die schwimmenden Demonstratoren auf dem Mortkasee stattdessen von DNV inspiziert und abgenommen wurden.

Die niederländische Firma **Aton** (vormals Volta Solar) ist auf die Planung, Installation und Wartung von PV-Anlagen spezialisiert. Bei über 15 Jahren Markterfahrung führt Volta Solar außerdem seit mehreren Jahren Machbarkeitsstudien für FPV-Anlagen in den Niederlanden durch und untersucht dabei auch Verankerungslösungen. Ende der ersten Projektphase stieg Aton als EPC aus dem PV2FLOAT-Projekt aus.

Die Firma **Heckert Solar** sollte monofaziale Module aus eigener Produktion für die PV2FLOAT-Demonstratoren bereitstellen. Nach seinem Ausstieg aus dem Projekt in der ersten Projektphase wurden stattdessen bifaziale Module des chinesischen Herstellers LONGi verwendet.

Die **Lausitz Energie Bergbau AG (LEAG)** ist mit einer Belegschaft von rund 8000 Deutschlands zweitgrößter Stromversorger, verantwortet die Braunkohlengewinnung in den vier Lausitzer Tagebauen und betreibt Kohlekraftwerke in Brandenburg und Sachsen. Im Rahmen des PV2FLOAT-Projektes sollte LEAG den Standort für die FPV-Demonstratoren zur Verfügung stellen - zu Projektbeginn stieg jedoch LEAG aus dem Projekt aus.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

PV2FLOAT widmete sich der technischen Weiterentwicklung schwimmender PV-Kraftwerke mit Blick auf Kostenreduktion, Integration in die Raumplanung und nachhaltige Umsetzung im Megawatt-Maßstab. Wirtschaftlichkeit und ökologische Auswirkungen sowie die Potenziale und Akzeptanz der Technologie sollten mit Schwerpunkt auf die Gegebenheiten in Deutschland analysiert werden. Kernpunkt waren Errichtung, Betrieb und Monitoring mehrerer FPV-Demonstratoren auf einem Lausitzer Tagebaufolgesee sowie einer PV-Landreferenzanlage. Das Vorhaben war dazu in neun Arbeitspakete unterteilt:

- AP 1: Projektmanagement
- AP 2: Potenzialanalyse und Standortauswahl für die Versuchsanlage
- AP 3: Genehmigungsprozesse, Akzeptanz und Normung
- AP 4: Zuverlässigkeit, Qualitätssicherung und Normung für FPV-Anlagen
- AP 5: Modulentwicklung
- AP 6: Konzeption, Aufbau und Betrieb der Versuchsanlage
- AP 7: Optimierung und Skalierung auf Großanlagen
- AP 8: Ertragsmodell, Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit
- AP 9: Ökologie

Wegen der COVID-Pandemie sowie der zahlreichen Änderungen im Projektkonsortium kam es nach Ablauf der regulären Projektlaufzeit am 30.04.2024 erst zu einer kostenneutralen Verlängerung (bis 31.10.2024) und dann einer Aufstockung (bis 31.12.2025) des PV2FLOAT-Projekts. Hauptgrund für die Verzögerung im Projektlauf war aber das komplexe Genehmigungsverfahren für die Errichtung der schwimmenden Versuchsanlagen auf dem Mortkasee.

Insgesamt wurden 10 Projekttreffen abgehalten, davon die Mehrzahl - nach der COVID-Pandemie - in Präsenz (3x in Cottbus, 1x in Essen, 2x in Freiburg). Darüber hinaus sorgten zusätzlich etwa 3 mehrstündige Arbeitstreffen pro Jahr sowohl regelmäßige AP-spezifische Treffen (alle virtuell) für Abstimmung und Abgleich, besonders den Demonstratorenbau und Monitoringaufbau vorbereitend und begleitend. Im Februar 2023 stellte federführend das ISE – zusammen mit BTU und RWE – das PV2FLOAT-Projekt vor Ort im Gemeinderat Lohsa vor. Schließlich wurde im November 2024 am Mortkasee eine Einweihungs- und Infoveranstaltung zu den PV2FLOAT-Demonstratoren abgehalten.

Im Projekt wurden alle Meilensteine des ISE-Teilvorhabens erreicht.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

FPV-Kraftwerke gewannen bei Antragstellung zunehmend an Bedeutung. Damals existierten mehr als 1 GWp an installierter FPV-Leistung, mit über 70% der installierten Leistung in China. Das bis dahin größte Projekt wies eine installierte Leistung von 150 MWp auf. In Europa wurden Projekte bis 2020 vor allem in Großbritannien und den Niederlanden realisiert. Im Juli 2019 ging das erste deutsche FPV-Kraftwerk mit einer Nennleistung von 749 kWp auf dem Maiwald-See im baden-württembergischen Renchen in Betrieb.

Weltweit fand die Installation der Technologie insbesondere auf industriellen Becken, Trinkwasserreservoirs und künstlichen Gewässern statt. Zudem bestand die Aussicht darauf, die FPV-Technologie zukünftig mit bisherigen Energieerzeugungsformen zu verknüpfen und hierbei Synergieeffekte im Bereich der Windenergie und der Wasserkraft zu erzeugen.

Es besteht weltweit weiterhin ein großes Potenzial, welches bislang noch nicht vollständig genutzt wird. Bei einer weltweiten Nutzung von 1 % der Oberflächengewässer könnte dadurch eine installierte Leistung von 404 GWp erzielt werden. In Deutschland besteht laut einer früheren ISE-Erhebung allein bei den Tageauseen ein technisches Potenzial von 56 GWp. Auch küstennahe Installationen wurden getestet, wobei durch die erhöhte Wind- und Wasserbewegung sowie den Salzgehalt des Wassers besondere Konstruktionsvorkehrungen getroffen werden müssen. Auch hier besteht weltweit ein großes Potenzial, das sich verschärfende Flächennutzungskonflikte mildern könnte.

Das Design eines FPV-Gesamtsystems ähnelt dem von PV-Freiflächenanlagen mit der Spezifikation, dass sich PV-Reihen und ggf. Wechselrichter auf schwimmenden Plattformen befinden. FPV wird heute vorwiegend auf Pontons, Metallkonstruktionen oder einer Kombination beider montiert, die wiederum

gegen Abtreiben verankert sind. Die Boden-, Ufer- und Pfahlverankerung stellen hierbei die am häufigsten genutzten Verankerungssysteme dar, dessen Auswahl oftmals individuell und abhängig von der Bathymetrie der Gewässer getroffen werden muss. Bislang werden bevorzugt Glas-Glas-Module wegen ihrer höheren Feuchtebeständigkeit eingesetzt, mit kleinen Neigungswinkeln (bis 15°) und in Ost-West Ausrichtung zur Minimierung von Windkräften.

Die Investitionskosten der asiatischen Großprojekte lagen 2018 zwischen 0,7 Euro/W und 1,05 Euro/W, wobei die Kosten sehr stark nach Anlagegröße und Anlagestandort variieren. Besonders kostspielig erwies sich dabei die Verankerung. Auch wird mit erhöhten Wartungskosten gerechnet, wie beispielsweise für den Modultausch. Eine andere Herausforderung ist Vogelkot, der aggressiv gegenüber Materialien und Oberflächen wirkt und zudem häufig hohe Hot-Spot-Bildung nach sich zieht. Für die Montage wird oft auf Gestelle zurückgegriffen, die analog zu den Produkten für den Einsatz an Land aufgebaut sind. Wesentliche Fragen zu Ertragspotenzialen, auf die Anwendung zugeschnittene Design- und Materiallösungen, Belastungen und realistische beschleunigte Prüfsequenzen, Widerstandsfähigkeit der Komponenten und Wirtschaftlichkeit sind noch offen. Kritische Aspekte bleiben die elektrische Betriebssicherheit und die gesellschaftliche Akzeptanz der Technologie.

Als potenziell geeignete Alternative zu Glas-Folien-Modulen wurden bei Antragstellung Doppelglaslamine betrachtet, trotz spezifischer Nachteile wie meist höhere Modulkosten oder höhere Betriebstemperaturen. Der Grund dafür ist die Widerstandsfähigkeit von Glas, aus der im Bereich FPV besondere Vorteile im Bereich Zuverlässigkeit folgen.

Im Hinblick auf die ökologischen Auswirkungen von FPV wurden 2018 vor allem die Vorteile gegenüber landgestützten Systemen hervorgehoben. So entfallen größere Eingriffe in den Landschaftshaushalt, die dauerhafte Auswirkungen u.a. auf die Bodenhydrologie, die Vegetation und die Besiedlung durch Tiere von den Insekten bis zu den Vögeln und Säugetiere haben. Störungen wurden vor allem beim Aufbau der Anlagen insbesondere in den Uferbereichen bei der Verankerung am Gewässerboden gesehen. Vorstudien quantifizierten und bestätigten durch Modellsimulationen Auswirkungen von FPV auf den Energie- und Lichthaushalt von Gewässern und die daraus resultierenden Effekte auf die Evaporation und die Primärproduktion. Langzeitstudien im Freiland, die fundiertere und umfassendere Aussagen erlauben würden, lagen jedoch noch nicht vor. Insbesondere fehlten auch Studien, die die Auswirkungen auf das Durchmischungsverhalten von Seen untersuchten.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Dieses Projekt wurde als Verbundprojekt mit den antragstellenden Partnern BTU Cottbus und RWE Renewables durchgeführt, wobei RWE Renewables in der Aufstockungsphase die Rolle eines assoziierten Partners einnahm. Darüber hinaus waren folgende Firmen während der Antragstellung oder danach zeitweise als assoziierte Partner aktiv

- Aton/Volta Solar
- Heckert Solar
- VDE Renewables
- LEAG
- Bischof+Klein
- Belectric

Weiterhin beauftragte die BTU für die hydrologische/ökologischer Modellierung in AP 9 das IWB Dresden (Privates Institut für Wasser und Boden GmbH).

Mit folgenden Vorhaben wurde im Rahmen des PV2FLOAT-Projektes kooperiert:

- Projektvorhaben „IEA PVPS Task 13“: Performance, Operation and Reliability of Photovoltaic Systems (BMWK / PTJ, FKZ 0324304B und 03EE1120B)
- Projektvorhaben „FPV4Resilience“: Gesteigerte Klimaresilienz von Standgewässern durch ertragsoptimierte schwimmende Photovoltaik (Leistungszentrum Nachhaltigkeit Freiburg)

2 Ablauf und Ergebnisse des Vorhabens

2.1 Verwendung der Zuwendung und Ergebnisse

2.1.1 AP 1: Projektmanagement

Ergebnis / Meilenstein Nr.	Erzieltes Ergebnis	Erreicht am	Kommentar zur Einhaltung des Zeitplans
E1: Kick-off-Meeting organisiert und durchgeführt	Abgehalten online, Protokoll liegt vor	21.05.2021	Zeitplan wurde eingehalten
E2: Zwischenberichte erstellt und Evaluation zur Halbzeit des Projekts durchgeführt	Alle notwendigen Zwischenberichte wurden angefertigt und verschickt. Eine Projektevaluation wurde aufgrund der häufigen Wechsel im Konsortium mehrfach auf Projekttreffen durchgeführt und auf Basis der Ergebnisse leichte inhaltliche Kurswechsel veranlasst.		Alle Zwischenberichte wurden (hinreichend) termingerecht dem Projektträger übermittelt.
E3: Informations- und Eröffnungsveranstaltung für Versuchsanlage	abgehalten in „Herzogs Restaurant“ in Lohsa	15.11.2024	Verzögerungen bei Genehmigung/Netzanschluss der Demonstratoren

Die Projektkoordination erfolgte primär durch das Fraunhofer ISE. Neben der Steuerung und Überwachung des Projektverlaufs und der termingerechten Erbringung der geplanten Meilensteine und Ergebnisse, beinhaltete das Arbeitspaket auch die Erstellung und Sicherstellung der termingerechten Lieferung der Zwischenberichte sowie die Kommunikation mit dem Projektträger und den Verbundprojektpartnern. Des Weiteren erfolgte im Rahmen des Arbeitspakets die Organisation, Durchführung und Nachbereitung von je 2 Projekttreffen pro Jahr, von zusätzlichen Arbeitstreffen und zwei Informationsveranstaltungen zu PV2FLOAT. Letztere datierten auf den Februar 2023 (Vorstellung PV2FLOAT-Projekt auf Sitzung des Gemeinderats von Lohsa) und November 2024 (Demonstratoreinweihung in Lohsa), und wurden in enger Zusammenarbeit mit AP 3 zur Wissensvermittlung und Öffentlichkeit konzeptualisiert und verwirklicht. Projektergebnisse wurden auf Konferenzen, Messen und Tagungen präsentiert z.B. PV-Symposium, EUPVSEC, Intersolar, E-World oder Fachkonferenzen wie *FPV Forum*, *Solarplaza FPV* oder *Floating Solar*. Zur Außendarstellung des Projekts wurde folgende Online-Materialien erstellt und gepflegt:

- Projektüberblick aus ISE-Sicht: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/pv2float.html>
- eine ausführliche externe Projektwebseite aus Konsortialperspektive: <https://pv2float.net/>
- ein ISE-Flyer mit den wichtigsten Projektkennndaten: <https://pv2float.net/pdfs/ISE-FPV-Flyer-de.pdf>

Viele Erkenntnisse aus dem Projekt mündeten in dem ersten FPV-Leitfaden für Deutschland¹. Pressemitteilungen und -anfragen wurden bearbeitet, z.B. BR24 17.02.2023, FAZ 20.09.2023, ZEIT Online 22.08.2024, VEE Sachsen 25.11.2024 (vgl. <https://pv2float.net/#results>).

¹ <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2025/floating-pv-nachhaltige-energieerzeugung-auf-dem-wasser-neuer-leitfaden-des-fraunhofer-ise.html>

2.1.2 AP 2: Potenzialanalyse und Standortauswahl für die Versuchsanlage

Ergebnis / Meilenstein Nr.	Erzieltes Ergebnis	Erreicht am	Kommentar zur Einhaltung des Zeitplans
M1: <i>Finale Standortauswahl steht fest</i>	Entscheidung für Standorte Morkasee und Merdingen	IV/2022 bzw. IV/2023	Verzögerung von 1.5 Jahren
E1: <i>Kriterienkatalog zur Bewertung von Wasserflächen liegt vor</i>	getragen von RWE		
E2: <i>Marktanalyse für den deutschen Markt abgeschlossen</i>	getragen von RWE		
E3: <i>Potenzialanalyse für RWE-Standorte erarbeitet</i>	getragen von RWE		
E4: <i>Handlungsempfehlung hinsichtlich FPV für RWE-Unternehmensstrategie erarbeitet</i>	getragen von RWE		
E5: <i>Potenzialanalyse für LEAG-Standorte liegt vor</i>	nicht erreicht durch Ausstieg von LEAG		
E6: <i>Potenzialanalyse International abgeschlossen</i>	seenscharfe und szenarienbasierte Potenzialanalyse für Deutschland	II/2024	im Zeitplan

In diesem Arbeitspaket wurde vom ISE und RWE das Potenzial für FPV-Anlagen in Deutschland untersucht sowie von ISE, RWE und BTU die finale Standortauswahl für die schwimmende Versuchsanlage und die Landreferenzanlage (zur Messung des Wasserkühleffekts) getroffen.

Im Rahmen der Standortsuche erstellte das ISE zusammen mit BTU und RWE einen Kriterienkatalog mit 10+ hydrologischen/logistischen Anforderungen an einen PV2FLOAT-Standort. Damit wurden für die schwimmenden Demonstratoren 5+ aussichtsreiche Seenkandidaten im Lausitzer Revier bewertet. Auf Grundlage des Katalogs fiel die Wahl auf den Morkasee bei Lohsa. RWE – in Zusammenarbeit mit GMB und ISE – nahm sich daraufhin des Genehmigungsverfahrens für die schwimmenden Demonstratoren an. Eine Landreferenzanlage am Morkasee konnte wegen zu großer Verschattung und genehmigungsrechtlicher Hürden nicht realisiert werden. Stattdessen wurde eine mit dem schwimmenden

Zimmermann-Demonstrator baugleiche Anlage auf dem ISE-Outdoor-Performance-Testfeld in Merdingen installiert. Eine detaillierte Rechnung bestätigte, dass der erwartete Fehler bei Bestimmung des FPV-Kühleffekts (durch Abgleich von FPV-Messdaten mit denen der Referenzanlage Merdingen) geringer ist als der erwartete Kühleffekt – als Nachweis, dass eine FPV-Referenzanlage in Merdingen für Projektziele sinnvoll ist (Abbildung 1).

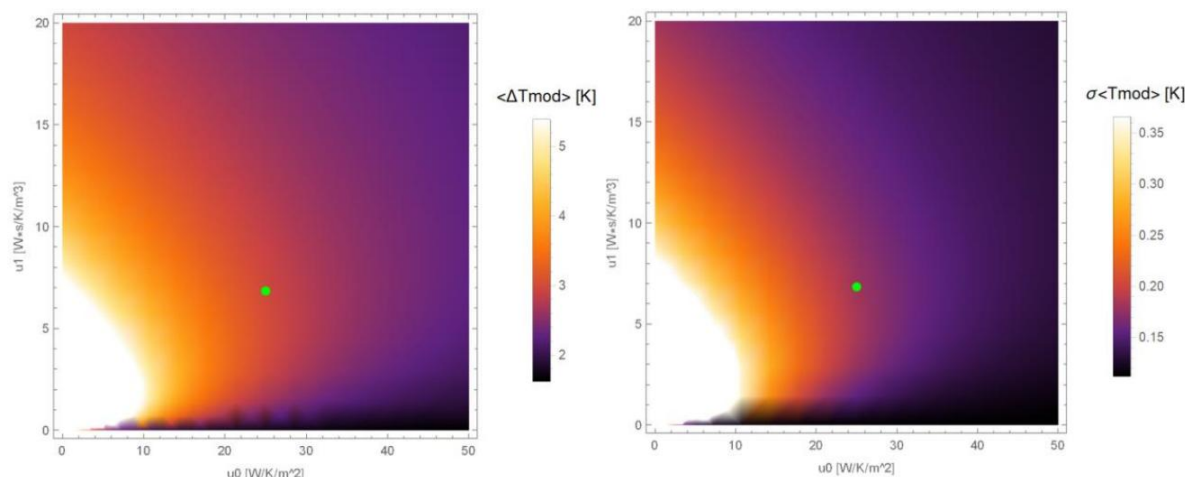


Abbildung 1: Erwarteter Fehler bei Bestimmung des Kühleffekts für FPV-Designs mit verschiedenen Faiman-Koeffizienten u_0 und u_1 . Grüne Punkte geben Standardwerte für u_0 und u_1 wieder. Linke Seite: Absoluter Fehler. Rechte Seite: Standardfehler.

Darüber hinaus erstellte und pflegte das ISE eine deutschlandweite Datenbank für FPV-Anlagen, die Schritt für Schritt zu einer europäischen FPV-Datenbank heranwachsen wird (Abbildung 2).

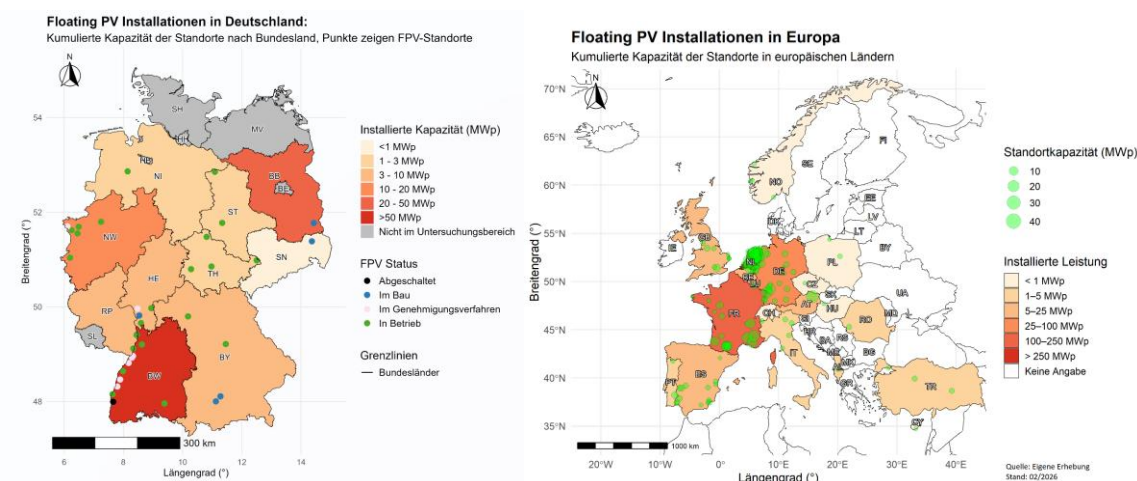


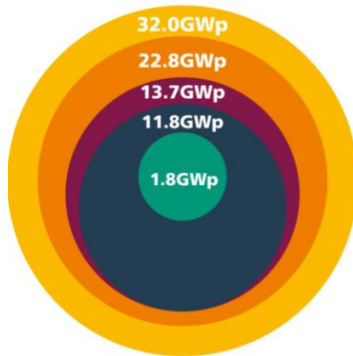
Abbildung 2: Erfasste FPV-Anlagen und kumulierte Nennleistung für Deutschland (links) und Europa (rechts), Stand 02/2026.

Des Weiteren wurde das FPV-Potenzial von deutschen Pumpspeicherkraftwerken erhoben, einer synergieversprechenden FPV-Nutzungsform². Schließlich wurde in Zusammenarbeit mit RWE für ganz Deutschland – gewässerscharf und szenarienbasiert – das FPV-Potenzial bestimmt³ (Abbildung 3).

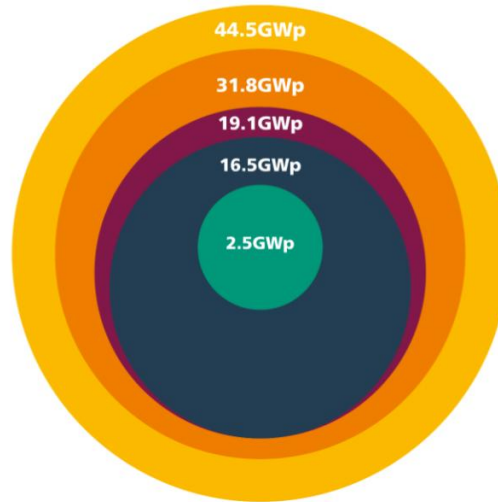
² <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/news/2022/kopplung-von-schwimmender-pv-mit-pumpspeicherkraftwerken-verspricht-besondere-synergien.html>

³ <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2024/deutschland-hat-grosses-potenzial-fuer-schwimmende-photovoltaik.htm>

Südausrichtung



Ost-West-Ausrichtung



Legende

- Technisches Potenzial mit 20m Uferabstand
- 35% Belegung
- 25% Belegung
- 15% Belegung
- Potenzial nach gesetzlichen Vorgaben
- Wirtschaftlich-praktisch erschließbares Potenzial

Abbildung 3: FPV-Potenzialanalyse für Deutschland für zwei verschiedene FPV-Aufständerungen.

2.1.3 AP 3: Genehmigungsprozesse und Akzeptanz

In diesem Arbeitspaket wurden soziale, regulatorische und organisatorische Aspekte (öffentliche Wahrnehmung, Nutzungskonflikte bspw. beim Wassersport, Genehmigungsverfahren und Umweltschutz etc.) untersucht. Weiterhin wurde ein Partizipationsverfahren zur Beteiligung der lokalen Akteure entwickelt sowie informatorische Öffentlichkeitsarbeit geleistet.

Ergebnis / Meilenstein Nr.	Erzieltes Ergebnis	Erreicht am	Kommentar zur Einhaltung des Zeitplans
E1: Ergebnisbericht des Partizipationsprozesses	Bericht	Dezember 2024	fristgerecht
E2: Kurzbericht über mögliche lokale Vermarktungsmodelle	Aufgrund der regulatorischen Rahmenbedingungen des EnWG und EEG konnten hier keine Modelle identifiziert werden		
E3: Bericht und Ablaufmodell Genehmigungsprozesse	Masterarbeit, eine deutsche und eine englische Publikation	2023	fristgerecht
E4: Studienbericht sozio-politische Akzeptanz von FPV	Masterarbeit, englische Publikation (in Druck)	2025	fristgerecht

2.1.3.1 E1: Ergebnisbericht zum Partizipationsprozess

Im Rahmen von Arbeitspaket AP 3.1 (Partizipationsverfahren und Öffentlichkeitsarbeit) wurde am 15. November 2024 eine zweiteilige Veranstaltung in Lohsa durchgeführt. Das Veranstaltungskonzept sah vor, zwei unterschiedliche Zielgruppen durch zwei aufeinander folgende Formate zu erreichen:

1. **Einweihungsfeier** (Festakt, 10:00–13:00 Uhr, Herzogs Restaurant): Ausgerichtet an Vertreter:innen aus Wissenschaft, Politik, Behörden, Wirtschaft und Fachöffentlichkeit. Ziel war die offizielle Einweihung der Floating-PV-Forschungsanlage am Mortkasee sowie die Vernetzung relevanter Akteure.
2. **Infomarkt** (Nachmittag): Ausgerichtet an die breite Öffentlichkeit, insbesondere Anwohner:innen aus Lohsa und Nachbargemeinden. Ziel war die bürgernahe Information über das Projekt, die Schaffung von Beteiligungsmöglichkeiten und die Förderung von Akzeptanz.

Zur Unterstützung beider Formate wurden **Factsheets** zu zentralen Themen (Technologie, Genehmigungsrahmen, Gewässerökologie, Akzeptanz, gesellschaftlicher Nutzen, Projektfortschritt) entwickelt, die sowohl auf der Veranstaltung als auch dauerhaft über die Projektwebsite für die Öffentlichkeitsarbeit genutzt werden.

Vorbereitung und Einladungsmanagement

Die Planung und das Einladungsmanagement wurden ab September 2024 aufgenommen. Insgesamt wurden deutlich mehr als 50 Personen und Institutionen aus einem breiten Stakeholder-Spektrum eingeladen. Die eingeladenen Akteure umfassten:

Akteursgruppe	Beispielhafte Organisationen
Forschung & Wissenschaft	Fraunhofer ISE, BTU Cottbus-Senftenberg, TU Dresden, HS Zittau/Görlitz, Fraunhofer IEG
Industrie & Technologie	RWE, Zimmermann, ProFloating, Floating Solar, ecotec, Diliciency
Behörden & Verwaltung	SMEKUL, Landratsamt Bautzen, LTV Sachsen, LMBV, SOBA
Politik	Gemeinde Lohsa, BMWK / PTJ
Umwelt & Naturschutz	BfN, Grüne Liga e.V., UNESCO-Biosphärenreservat Oberlausitz
(Lokale) Wirtschaft & Verbände	LEAG, Peitzer Edelfisch, VEE Sachsen, AQVA Synergy, Zweckverband Lausitzer Seenland
Projektteam	Fraunhofer ISE, RWE, BTU

Der Einladungsprozess umfasste mehrere Reminder-Runden (Oktober 2024). Es wurden sowohl Zu- als auch Absagen dokumentiert. Einige ursprünglich geplante Einladungen (z. B. BMWK-Zuständiger Timo Haase) konnten nicht realisiert werden, da Personen nicht mehr zuständig oder erreichbar waren. Für das Grußwort des SMEKUL wurde eine Videobotschaft des Staatsministers vorbereitet.

Einweihungsfeier (Fachöffentlichkeit)

Datum: 15. November 2024 **Teilnehmerzahl:** ca. 30 Personen **Format:** Moderierter Festakt mit Fachvorträgen, Fragerunden, Bildervorstellung und anschließendem informellen Networking

Das Programm umfasste:

- Begrüßung durch Moderator (Sebastian Götz, Fraunhofer ISE) und den Bürgermeister der Gemeinde Lohsa
- Grußwort SMEKUL
- Fachvorträge von Fraunhofer ISE (Marktentwicklung FPV), RWE (Forschungsanlage), ISE (technische Forschungsfragen) und BTU (gewässerökologische Fragestellungen)
- Video-Präsentation Bauprozess sowie Dankesworte
- Informeller Teil mit Networking

Die Veranstaltung erreichte eine breite Mischung aus Wissenschaft, Industrie, Behörden und Politik und erfüllte damit die im Konzept formulierten Ziele der Vernetzung und des Wissenstransfers zwischen Forschung und Praxis.

Infomarkt (Breite Öffentlichkeit)

Datum: 15. November 2024 (Nachmittag) **Besucherzahl:** 3 Personen **Format:** Informationsstände mit Postern und Factsheets, Möglichkeit zu Gesprächen mit Expert:innen

Die Besucherzahl blieb deutlich hinter den Erwartungen zurück. Als mögliche Erklärungen wurden vor Ort diskutiert:

- Geringe Sichtbarkeit der Forschungsanlage am Morkasee in der Öffentlichkeit (der See ist aufgrund geotechnischer Sicherheitsbedenken für die Bevölkerung nicht zugänglich und wenig präsent)

- FPV ist in der breiten Öffentlichkeit kaum bekannt (bestätigt durch die Akzeptanzforschung im Projekt)
- Im Unterschied zu anderen erneuerbaren Energien wie Windkraft löst FPV keine spontane Mobilisierung aus – weder pro noch contra (so auch ein Kommentar eines anwesenden Restaurantbesitzers)

Ergebnisse der Veranstaltungen

Einweihungsfeier – Diskussionsschwerpunkte und Erkenntnisse

Die Fachvorträge lösten eine lebhafte Diskussion aus. Die zentralen Themen und Erkenntnisse aus den Wortbeiträgen sind nachfolgend thematisch zusammengefasst.

Technische und wissenschaftliche Fragen:

Thema	Diskussionsinhalt
Referenzanlage / Digitaler Zwilling	Da ein Standort für die Landreferenzanlage in Lohsa nicht realisiert werden konnte, wird ein kalibrierter digitaler Zwilling der Referenzanlage in Merdingen mit Lohsaer Wetterdaten gespeist, um eine virtuelle Landreferenz zu simulieren.
Verdunstungsminderung durch FPV	Simulationsstudien (u. a. vom ISE) bestätigen die Verdunstungsreduktion; reale Feldstudien sind noch rar. Mess- und Berechnungsmethoden für die Quantifizierung wurden diskutiert.
Verschattung durch PV-Anlagen	Diskussion über das tatsächliche Ausmaß der Verschattung und ökologisch notwendige Schattenanteile für aquatische Lebensgemeinschaften.
Vogelkot / Reinigung	Bisher keine technische Lösung etabliert; Reinigung erfolgt händisch. Ideen wie Drähte auf der Aufständigung wurden diskutiert, zeigen aber begrenzte Wirkung.
Halbdurchlässige PV-Module	Bereits erste Versuche mit semitransparenten PV-Flächen wurden erwähnt.
Stegmaterialien	Diskussion über Metallgitter als Alternative zu Holzstegen.
Neigung der Module	Hinweis, dass PV-Module nicht horizontal, sondern geneigt installiert werden.

Ökologische Fragen:

Thema	Diskussionsinhalt
Libellen	Libellen erkennen PV-Flächen als Wasseroberfläche (polarisiertes Licht) und wollen Eier ablegen; sie erkennen jedoch zunehmend, dass es kein Wasser ist.
Cottbuser Ostsee	Vergleich der FPV-Anlage am Cottbuser Ostsee (Flachwasserbereich) mit der Anlage am Morkasee (Tiefwasserbereich). Die Anlage am Cottbuser See ist für externe Forscher:innen derzeit nicht zugänglich (LEAG gestattet keine Untersuchungen).

Thema	Diskussionsinhalt
Potenzielle Nutzungskonflikte	Wurden allgemein diskutiert, keine konkreten Konflikte benannt.

Genehmigung und regulatorische Fragen:

Thema	Diskussionsinhalt
Mindestseegröße / 15%-Regelung	Frage nach der Mindestgröße eines Sees, ab der die 15%-Belegungsregel (§ 36 WHG) sinnvoll ausgenutzt werden kann.
Wettbewerb zwischen Herstellern	Frage, ob der Vergleich der drei Hersteller (Zimmermann, ProFloating, Floating Solar) mit deren Zustimmung erfolgt – dies wurde bejaht.

Verankerung und Rückbau:

Es wurde diskutiert, ob die Verankerungen nach dem Rückbau der Anlage aus dem Seegrund entfernt werden sollen. Der Plan sieht deren Rückbau vor; die Umsetzbarkeit (Aufwand durch Sediment, ökologische Auswirkungen) muss jedoch noch geprüft werden.

Seenpotenzial:

Die im Vortrag gezeigte Grafik zum FPV-Potenzial in Deutschland umfasst auch natürliche Seen. Besonderes Potenzial wurde für die brandenburgische und sächsische Lausitz festgestellt.

Infomarkt – Besucher:innen und Gesprächsinhalte

Trotz der geringen Besucherzahl konnten qualitativ wertvolle Gespräche geführt werden.

Vertreter der Sächsischen Zeitung:

- Hatte über einen Kollegen von der Veranstaltung erfahren
- Fragte, ob die Forschungsanlage am Morkasee in den Projektmaterialien bereits eingezeichnet ist
- Interesse an medialer Berichterstattung

Solar-Installateur aus der Region:

- Starkes Interesse an der Möglichkeit, zukünftig selbst schwimmende PV-Anlagen in der Region zu errichten
- Fragen zur Marktlage sowie zu praktischen Aspekten der Implementierung (Prozessabläufe, Hebemaschinen, Materialien, notwendiges Know-how)
- Wurde mit dem vor Ort anwesenden EcoTec-Projektmanager für den Bau der Anlage bekannt gemacht

Interessierte Anwohnerin (Zugang über Gemeindeblatt):

- Fragen zu steuerlichen Einnahmen durch FPV-Anlagen für die Gemeinde
- Interesse an den offenen Fragen der Gewässerökologie (auf den Postern abgebildet)

Bewertung des Partizipationsprozesses

Die Einweihungsfeier hat die im Konzept formulierten Ziele weitgehend erfüllt:

- Informationsvermittlung: Die Hauptbotschaften zu Klimabeitrag, ökologischer Verantwortung, technischer Innovation und Forschung-Praxis-Kooperation wurden durch die Fachvorträge transportiert.
- Netzworkebildung: Mit ca. 30 Teilnehmenden aus Wissenschaft, Behörden, Politik, Industrie und Wirtschaft wurde ein breiter Akteurskreis angesprochen und vernetzt.
- Fachlicher Austausch: Die rege Diskussion in und nach den Vorträgen zeigt ein hohes Interesse und aktives Engagement der Teilnehmenden.
- Sichtbarkeit und Kommunikation: Durch die Einbindung von Medienvertretern (VEE Sachsen, Sächsische Zeitung) und die angestrebte Nachberichterstattung wurde die öffentliche Sichtbarkeit des Projekts erhöht.
- Einbindung politischer Akteure: Grußworte von SMEKUL und die Beteiligung des Bürgermeisters von Lohsa unterstreichen die politische Verankerung des Projekts.

Zielerreichung des Infomarkts

Die Bürgerbeteiligungsveranstaltung konnte die im Konzept angestrebten Ziele nur eingeschränkt erfüllen:

- Reichweite: Mit lediglich drei Besucher:innen war die Breitenwirkung sehr begrenzt.
- Qualität der Gespräche: Die wenigen Gespräche waren inhaltlich substanziell und zeigten relevante Interessen und Fragen aus der Bevölkerung und der lokalen Wirtschaft.
- Transparenz und Offenheit: Alle Fragen konnten direkt und offen beantwortet werden; der Informationsstand war professionell aufbereitet.
- Akzeptanzbildung in der Breite: Das Ziel, Akzeptanz bei einer größeren Bevölkerungszahl zu erzeugen, wurde durch die geringe Resonanz nicht erreicht.

Erklärungen für die geringe Bürgerbeteiligung

Die geringe Besucherzahl beim Infomarkt ist im Kontext folgender Faktoren zu sehen, die im Rahmen des Projekts und der Veranstaltung selbst diskutiert wurden:

1. **Geringe Bekanntheit der Technologie:** FPV ist in der breiten Öffentlichkeit kaum bekannt; es fehlen positive oder negative Vorerfahrungen, die Neugier oder Widerstand erzeugen würden.
2. **Eingeschränkte Sichtbarkeit der Anlage:** Der Mortkasee ist für die Öffentlichkeit gesperrt. Die Anlage ist „unsichtbar“ und erzeugt dadurch kaum öffentliche Aufmerksamkeit.
3. **Fehlende Kontroversität:** Im Vergleich zu Windkraftanlagen löst FPV keine spontane Mobilisierung aus, was die Aktivierung von Bürgerinteresse erschwert.
4. **Begrenzte Reichweite der Bekanntmachung:** Der Infomarkt wurde v. a. über das Gemeindeblatt beworben, was eine begrenzte Zielgruppe erreicht.

Öffentlichkeitsarbeit über die Factsheets

Die entwickelten Factsheets stellen einen eigenständigen Beitrag zur Öffentlichkeitsarbeit dar, der über die Veranstaltung hinaus wirkt. Sie decken alle zentralen Aspekte des Projekts ab:

Factsheet	Inhalt
Projekt PV2Float	Ziele, Laufzeit, Standort, Strategie, Projektfortschritt
Technologie	Systemaufbau, Implementierungsbeispiele, Vorteile der FPV-Technologie

Factsheet	Inhalt
Implementierung am Mortkasee	Geotechnische Besonderheiten, Lösungsansätze
Regulatorischer Rahmen	WHG § 36, Bauleitplanung, Genehmigungsverfahren (Flowchart)
Gesellschaftlicher Nutzen	Sozioökonomische Vorteile, Steuereinnahmen, Energy Sharing
Akzeptanz	Ergebnisse der Akzeptanzforschung, Hemmnisse beim FPV-Ausbau
Gewässerökologie	Ökologische Chancen und offene Forschungsfragen

Die Materialien sind in verständlicher Sprache verfasst und wurden auf der Projektwebsite⁴ veröffentlicht, womit das Projektziel der nachhaltigen Öffentlichkeitswirkung erreicht wurde.

Schlussfolgerungen und Empfehlungen

- Die Einweihungsfeier war ein Erfolg hinsichtlich Vernetzung, Fachkommunikation und politischer Einbindung. Die lebhafteste Diskussion bestätigt das hohe Interesse der Fachöffentlichkeit.
- Der Infomarkt verdeutlicht strukturelle Herausforderungen der Bürgerbeteiligung bei wenig bekannten Technologien ohne direkte Anwohnerwirkung. Die geringe Resonanz sollte nicht als Ablehnung, sondern als Ausdruck von Unbekanntheit und fehlender Betroffenheit interpretiert werden – ein Befund, der durch die Akzeptanzforschung des Projekts gestützt wird.
- Die Factsheets stellen ein wirksames und langfristig nutzbares Instrument der Öffentlichkeitsarbeit dar.

Empfehlungen für künftige Partizipationsprozesse bei FPV-Projekten

1. **Frühzeitige Einbindung** lokaler Akteure (Gemeinde, Vereine, Schulen) bereits in der Planungsphase, um Bekanntheit und Identifikation aufzubauen.
2. **Sichtbarmachung der Anlage** durch Besichtigungsmöglichkeiten, Informationstafeln vor Ort oder digitale Erlebnisformate (z. B. Virtual Reality).
3. **Mehrkanal-Kommunikation** über Social Media, regionale Tageszeitungen und lokale Netzwerke, um über das Gemeindeblatt hinaus zu erreichen.
4. **Kombination mit attraktiven Begleitprogrammen** (z. B. Exkursionen, Mitmachaktionen) zur Steigerung der Besucherattraktivität von Infoformaten.
5. **Kontinuierliche Öffentlichkeitsarbeit** statt punktueller Einzelveranstaltungen, um schrittweise Bekanntheit aufzubauen.

2.1.3.2 E3: Entwicklung Ablaufmodell Genehmigung

Ziel von AP 3.2 war die systematische Analyse der Genehmigungsprozesse für schwimmende Photovoltaik-Anlagen in Deutschland sowie die Entwicklung eines verallgemeinerbaren Ablaufmodells, das Projektentwicklern und Behörden als Orientierungshilfe dienen kann.

Da zum Projektstart kaum belastbares Erfahrungswissen über Genehmigungsverfahren für FPV-Anlagen vorlag, wurde ein empirischer Ansatz gewählt: Das Fraunhofer ISE führte qualitative Interviews mit Genehmigungsbehörden und Projektentwicklern von sechs realisierten oder weit gediehenen FPV-Projekten

⁴ <https://pv2float.net/pdfs/ISE-FPV-Flyer-de.pdf>

in fünf Bundesländern durch. Die untersuchten Projekte lagen in Bayern, Baden-Württemberg, Nordrhein-Westfalen, Brandenburg und Rheinland-Pfalz.

Die Analyse ergab, dass die entscheidende Weichenstellung im Genehmigungsprozess die Frage nach dem überwiegenden Eigenverbrauch des erzeugten Stroms durch einen ortsgebundenen gewerblichen Betrieb ist. Je nach Antwort ergeben sich grundlegend unterschiedliche Genehmigungspfade mit stark variierender Verfahrensdauer und -komplexität (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Das entwickelte Ablaufmodell unterscheidet drei Hauptpfade:

Pfad 1: Bauleitplanverfahren (linker Pfad)

Dieser Pfad ist erforderlich, wenn kein überwiegender Eigenverbrauch vorliegt – d. h. wenn der erzeugte Strom vollständig oder überwiegend ins Netz eingespeist wird, oder wenn die Anlage so dimensioniert ist, dass ein anliegender Betrieb nur einen geringen Anteil des Stroms selbst verbrauchen kann. Dieser Pfad erfordert:

- ein formelles Bauleitplanverfahren (Bebauungsplan oder Flächennutzungsplanänderung),
- eine wasserrechtliche Genehmigung sowie
- je nach Bundesland eine Baugenehmigung (in Bayern für FPV-Anlagen nicht erforderlich).

Das Bauleitplanverfahren ist mit erheblichem Zeitaufwand und intensiver Abstimmung mit Gemeinden, Trägern öffentlicher Belange und Naturschutzbehörden verbunden. Dieser Pfad wurde u. a. für das Brandenburger Projekt (21-MW-Anlage an einem ehemaligen Braunkohletagebausee) beschritten. Dort war ursprünglich eine 150-MW-Anlage geplant, die jedoch aufgrund der im Braunkohlenplan festgelegten Tourismusprioritäten auf eine Belegung von unter einem Prozent der Seefläche reduziert werden musste, bevor eine Genehmigung möglich war.

Pfad 2: Privilegiertes Vorhaben nach §35 BauGB (mittlerer Pfad)

Liegt ein überwiegender Eigenverbrauch eines ortsgebundenen gewerblichen Betriebs vor, kann die FPV-Anlage nach §35 Abs. 1 Nr. 3 BauGB als privilegiertes Vorhaben im Außenbereich behandelt werden. In diesem Fall entfällt das langwierige Bauleitplanverfahren; erforderlich sind lediglich:

- eine wasserrechtliche Genehmigung sowie
- eine Baugenehmigung.

Zuständig sind in der Regel die untere Baubehörde und die untere Wasserbehörde. Dieser Pfad ist typischerweise für aktive Sand- und Kiesabgrabungsseen relevant, bei denen die FPV-Anlage dem Betrieb der Abgrabung dient.

Pfad 3: Sonderbetriebszulassung (rechter Pfad)

Im Fall eines aktiven Quarzsandabbaus – zumindest in Nordrhein-Westfalen – liegt die Zuständigkeit bei der Bergbehörde. Da die FPV-Anlage einer bergbaulichen Anlage (dem Quarzwerk) dient und der erzeugte Strom eigenverbraucht wird, konnte eine Sonderbetriebszulassung erteilt werden. Dieser Pfad stellt das vereinfachteste Verfahren dar:

- kein Bauleitplanverfahren,
- keine öffentliche Beteiligung erforderlich,
- Genehmigung durch die Bergbehörde.

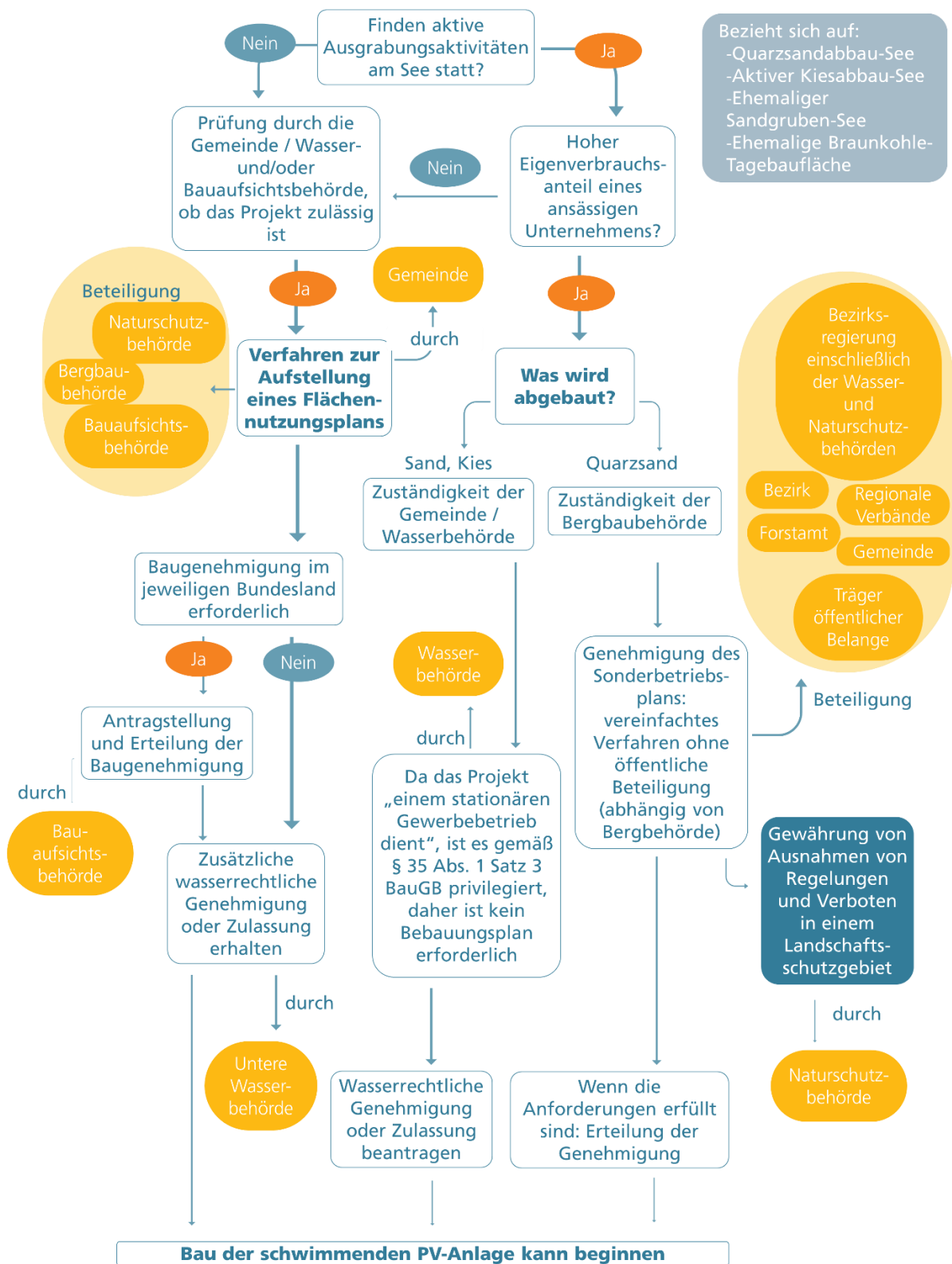


Abbildung 4: Schema zum Genehmigungsablauf für FPV-Anlagen in Deutschland.

Gemeinsamkeiten aller Pfade

Unabhängig vom gewählten Genehmigungspfad waren in allen untersuchten Projekten folgende Elemente obligatorisch:

- Einholung von Stellungnahmen der Naturschutzbehörde
- Beteiligung der Träger öffentlicher Belange
- Beteiligung anliegender Gemeinden
- Wasserrechtliche Genehmigung als Grundvoraussetzung

Die Ergebnisse des AP 3.2 wurden in einem Fachbeitrag im *pv magazine*⁵ und auf Englisch in *Floating PV Best Practice Guidelines*⁶ veröffentlicht und damit einer breiten Fachöffentlichkeit aus Industrie, Planung und Wissenschaft zugänglich gemacht. Der Beitrag richtet sich sowohl an Projektentwickler, die einen Überblick über mögliche Genehmigungspfade benötigen, als auch an Behörden, die sich mit zukünftigen FPV-Anträgen befassen werden. Darüber hinaus wurde das Ablaufmodell als Factsheet für die Projektwebsite aufbereitet und auf der Einweihungsveranstaltung in Lohsa (November 2024) der Fachöffentlichkeit präsentiert.

2.1.3.3 E4: Studienbericht sozio-politische Akzeptanz von FPV

Zielsetzung

Im Rahmen von AP 3.3 wurde die gesellschaftliche Akzeptanz schwimmender Photovoltaikanlagen (FPV) in den deutschen Braunkohlerevieren empirisch untersucht. Ziel war es, die Faktoren zu identifizieren, die regionale Akzeptanz und lokale Ablehnung von FPV-Anlagen erklären, und dabei insbesondere den bisher in der Forschung vernachlässigten Zusammenhang zwischen der Wahrnehmung des Strukturwandels und der Akzeptanz erneuerbarer Energietechnologien zu beleuchten. Die Ergebnisse wurden in einem Fachbeitrag aufbereitet, der bei der Zeitschrift *Energy Research & Social Science (ERSS)* zur Veröffentlichung eingereicht wurde⁷.

Methode

Die empirische Grundlage bildet eine standardisierte Online-Befragung (Computer Assisted Web Interview, CAWI), die im März und April 2024 in den drei aktiven deutschen Braunkohlerevieren – dem **Lausitzer Revier**, dem **Mitteldeutschen Revier** und dem **Rheinischen Revier** – durchgeführt wurde. Insgesamt nahmen **N = 1.196 Personen** (48,8 % weiblich, Altersspanne 18–87 Jahre) teil, mit regionalen Teilstichproben von n = 223 (Lausitz), n = 477 (Mitteldeutschland) und n = 496 (Rheinland). Die Befragung wurde durch das Marktforschungsinstitut *aproxima GmbH* unter Nutzung zweier Online-Access-Panels durchgeführt.

Das Erhebungsinstrument basierte auf einem **erweiterten deskriptiven Akzeptanzmodell**, das neben etablierten Akzeptanzfaktoren (soziale Normen, Einstellung zur Energiewende, Vertrauen in Akteure, wahrgenommene Auswirkungen auf Mensch und Natur, wirtschaftliche Effekte) auch spezifische Variablen zur **Wahrnehmung des Strukturwandels** sowie zur **Häufigkeit der Gewässernutzung** umfasste. Als abhängige Variablen wurden **regionale Akzeptanz** (evaluative Zustimmung auf Regionsebene) und

⁵ Gözl, S.; Zuber, B. (2023) Floating-Photovoltaik und der herausfordernde Weg zur „Schwimmerlaubnis“, in PV Magazine online, retrieved on 15.9.23 under <https://www.pv-magazine.de/2023/05/11/floating-photovoltaik-und-der-herausfordernde-weg-zur-schwimmerlaubnis/>

⁶ SolarPower Europe (2023): Floating PV Best Practice Guidelines Version 1.0 (Chapter author for „Development and implementing of projects“ & „Acceptance“), under <https://www.solarpowereurope.org/insights/thematic-reports/floating-pv-best-practice-guidelines-version-1-2>

⁷ Gözl, S., Ortseifen, D., Berneiser, J.: Exploring acceptance of floating Photovoltaics in regions undergoing structural change in Germany (eingereicht)

lokale Ablehnung (verhaltensbezogene Opposition auf kommunaler Ebene) unterschieden – eine konzeptionelle Zweidimensionalität, die in der bisherigen FPV-Akzeptanzforschung noch nicht systematisch berücksichtigt wurde.

Die statistische Auswertung erfolgte mittels explorativer und konfirmatorischer Faktorenanalyse sowie multiplen Regressionsanalysen (Vorwärtsmethode) – sowohl für die Gesamtstichprobe als auch getrennt für die drei Regionen.

Deskriptive Befunde

Die allgemeinen Einstellungen zur FPV-Technologie zeigten sich moderat bis leicht positiv. Die **regionale Akzeptanz** war mit einem Mittelwert von $M = 3,14$ ($SD = 1,25$) auf einer fünfstufigen Skala mäßig positiv ausgeprägt; die **lokale Ablehnung** lag im Mittel niedriger ($M = 2,61$; $SD = 1,35$), wies jedoch eine erhebliche interindividuelle Variabilität auf.

Einstellungen zur Energiewende fielen positiv aus ($M = 3,67$). Das Vertrauen in relevante Akteure war dagegen vergleichsweise niedrig ($M = 2,84$), und die wahrgenommenen Auswirkungen auf Natur und Anwohner wurden überwiegend negativ bewertet – insbesondere hinsichtlich der Erholungsnutzung von Gewässern, des Landschaftsbildes und der Vogelwelt.

Im regionalen Vergleich zeigte das **Rheinische Revier** durchgängig positivere Werte für Akzeptanz und Einstellung zur Energiewende, während das **Lausitzer Revier** die stärkste lokale Ablehnung bei gleichzeitig vergleichsweise optimistischerer Bewertung wirtschaftlicher Effekte und des Strukturwandels aufwies.

Einflussfaktoren auf Akzeptanz und Ablehnung

Die Regressionsanalysen lieferten folgende Befunde für die **Gesamtstichprobe**:

Prädiktor	Regionale Akzeptanz (β)	Lokale Ablehnung (β)
Soziale Normen	0,42 ***	-0,28 ***
Wahrgenommene Auswirkungen auf Mensch & Natur	-0,20 ***	0,13 ***
Einstellung zur Energiewende	0,18 ***	-0,15 ***
Wirtschaftliche Effekte	0,12 ***	-0,10 ***
Vertrauen in Akteure	0,10 ***	n.s.
Allg. Wahrnehmung des Strukturwandels	n.s.	-0,11 **
Häufigkeit der Gewässernutzung	n.s.	-0,10 ***
Persönliche Betroffenheit durch Strukturwandel	n.s.	n.s.
R²	0,60	0,34

Das Modell erklärt **60 % der Varianz in der regionalen Akzeptanz** – ein für Akzeptanzstudien im Bereich erneuerbarer Energien hoher Erklärungsanteil. Die **lokale Ablehnung** wird mit einem R^2 von 0,34 weniger vollständig erfasst, was auf zusätzliche, im Modell nicht berücksichtigte Einflussfaktoren hinweist.

Als stärkster übergreifender Prädiktor erwiesen sich **soziale Normen**: Je stärker Befragte glaubten, dass ihr soziales Umfeld FPV befürwortet, desto höher war die eigene Akzeptanz und desto geringer die Ablehnungsbereitschaft. Bemerkenswert ist zudem, dass **Strukturwandelwahrnehmung und Gewässernutzungshäufigkeit** ausschließlich die lokale Ablehnung, nicht aber die regionale Akzeptanz

erklären – ein Befund, der auf die spezifische Bedeutung von Ortsverbundenheit und kumulativer Transformationsbelastung für oppositionelles Verhalten hinweist.

Regionale Unterschiede

Die nach Revieren differenzierten Regressionsanalysen ergaben bedeutsame regionale Unterschiede, die mit den jeweiligen strategischen Transformationskonzepten korrespondieren:

Im **Lausitzer Revier** dominieren Umwelt- und Naturschutzbedenken die Akzeptanzbildung – konsistent mit dem dort stark auf Landschaftsidentität, Rekultivierung und Seetourismus ausgerichteten Strukturwandelkonzept. Im **Mitteldeutschen Revier** spielen wirtschaftliche Argumente und die allgemeine Haltung zur Energiewende eine vergleichsweise größere Rolle, was die industriell-ökonomische Transformationslogik der Region widerspiegelt. Im **Rheinischen Revier** sind soziale Normen besonders dominant, was mit den stark vernetzten Governance-Strukturen und dem gesellschaftlichen Diskurs im Rheinland vereinbar ist.

Schlussfolgerungen und Implikationen

Die Studie belegt, dass **Akzeptanz und Ablehnung von FPV sozial konstruiert und regional eingebettet** sind. Eine einheitliche Kommunikations- und Beteiligungsstrategie für alle Regionen greift zu kurz. Stattdessen sind **differenzierte, ortssensible Ansätze** erforderlich, die an lokalen Identitäten, regionalen Transformationsnarrativen und dem Aufbau institutionellen Vertrauens ausgerichtet sind.

Konkrete Handlungsempfehlungen für Projektierende und Kommunen umfassen:

- **Lausitz:** Ökologische Mitgestaltung und transparente Kommunikation zu Umweltauswirkungen in den Vordergrund stellen; wirtschaftliche Argumente treten in den Hintergrund.
- **Mitteldeutschland:** Wirtschaftliche Teilhabe- und Beteiligungsmodelle sowie die Einbettung von FPV in die industrielle Transformationserzählung herausstellen.
- **Rheinland:** Community-Botschafter, partizipative Planungsformate und Bürgerenergiemodelle zur Stärkung positiver sozialer Normen nutzen.

Darüber hinaus unterstreichen die Befunde die Bedeutung **frühzeitiger, transparenter und inklusiver Planungsprozesse** sowie ortsbezogener Wirkungsabschätzungen als präventive Maßnahmen gegen die Eskalation lokaler Opposition.

2.1.4 AP 4: Zuverlässigkeit, Qualitätssicherung und Normung

In diesem Arbeitspaket wurden Zuverlässigkeitsaspekte der Systemkomponenten für FPV-Anlagen untersucht. Eine initiale Bewertung der spezifischen Anforderungen sollte durchgeführt und darauf ausgehend ein Prüfprogramm erstellt werden, das Systemkomponenten bewertet und vergleicht. Des Weiteren wurden mögliche Auswirkungen vom System und Modulen auf die Gewässer (Schadstoff-Leaching) betrachtet. Die im AP 4 im Rahmen des Projektes gewonnenen Erkenntnisse, insbesondere die Ergebnisse des Leaching-Versuches, fließen derzeit in die Gremien- und Normungsarbeit ein. Aktuell erfolgt eine Teilnahme an von SERIS Singapur organisierten Treffen zum Erstellen einer "Technical Specification (TS) on Floating PV systems: "Floating photovoltaic power plants – Design guidelines and recommendations", welche auf der "Technical Reference" TR100:2022 (selbst basierend auf IEC 62738:2018) aufbauen soll.

Ergebnis / Meilenstein Nr.	Erzieltes Ergebnis	Erreicht am	Kommentar zur Einhaltung des Zeitplans
M2: Erstes Prüfprogramm für FPV entwickelt	Prüfprogramm für FPV entwickelt	03/2022	M2 wurde fristgerecht erbracht
E1: Prüfprogramm für Module, Modul- und Systemkomponenten	Prüfprogramm für Komponenten Stecker und Anschlussdosen entwickelt	09/2024	E1 wurde fristgerecht erbracht
E2: Bericht zur Eignung von Modul- und Systemkomponenten		11/2025	E2 wurde fristgerecht erbracht
E3: Bericht zur Schadstoffbelastung in Seen durch FPV		11/2025	E3 wurde fristgerecht erbracht

2.1.4.1 AP 4.1 Ermittlung spezifischer Belastungsfaktoren für FPV-Anlagen

Ermittlung spezifischer Belastungsfaktoren mit Blick auf Langzeitbeständigkeit der Module, Modulkomponenten und Systemkomponenten sind erfolgt. Dazu wurden Literaturstudien durchgeführt. Als evidente Belastungsfaktoren wurden adressiert:

- Feuchtigkeit
- Mechanische Last
- Teilverschattung

Es wurde weiterhin ein multiphysikalisches Finite-Elemente-Methoden-Modell (FEM) entwickelt, welches die mechanischen Spannungen in PV-Modulen und Unterkonstruktion, die durch Wind und Wellengang induziert werden, simuliert. Das Modell bildet Zimmermanns ZIMFloat-System ab, welches im Projekt sowohl schwimmend auf dem Morkasee als auch als Landzwilling in Merdingen verwendet wird. Es wurde ein zweistufiger Modellierungsansatz gewählt. Im ersten Schritt wird in einem Computational-

Fluid-Dynamics-Modell (CFD) die Windlast auf Grund der maximal zulässigen Windgeschwindigkeit (20,8 m/s) ermittelt. Diese wird dann als Druckverteilung an ein mechanisches FEM-Modell übergeben, welches die mechanische Spannung und Dehnung in den Solarzellen, Modulglas und Unterkonstruktion ermittelt. Abbildung 5 zeigt die gewählten Randbedingungen. Der Wellengang wurde dabei als Druckrandbedingungen abgebildet⁸.

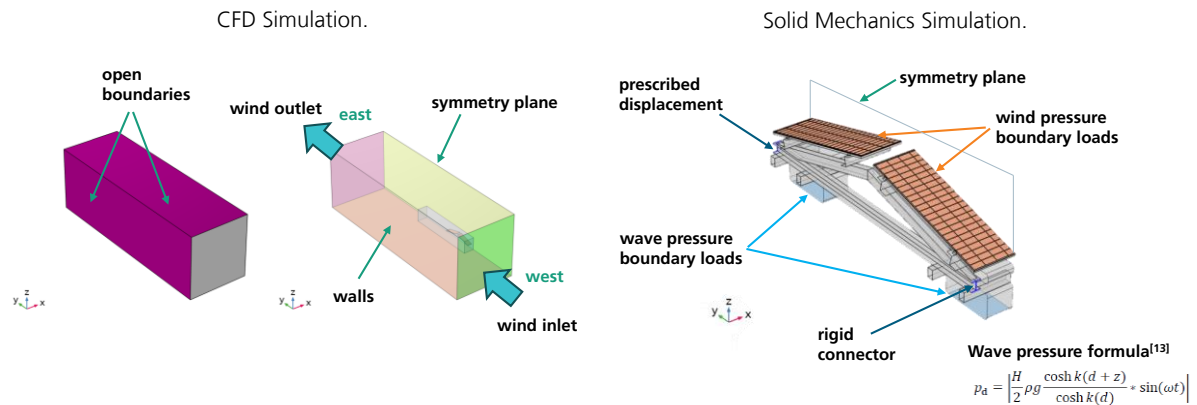


Abbildung 5: gewählte Randbedingungen für die CFD und mechanische Simulation. Die Wellengleichung wurde aus Standardliteratur⁸ übernommen.

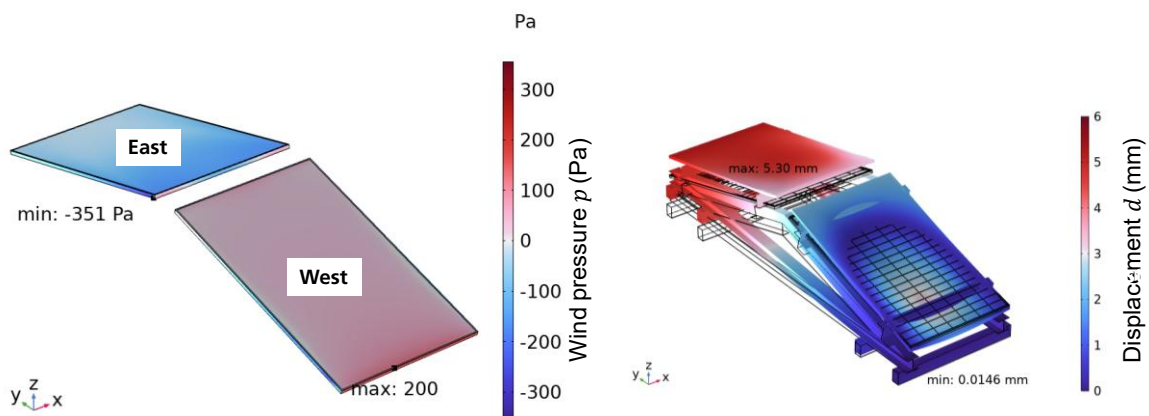


Abbildung 6: Links: Druckverteilung auf Grund von 20,8 m/s frontal auf das West-Modul eintreffender Wind. Rechts: Resultierende Deformation unter dem Einfluss von Wind (20.8 m/s) und Wellen (0.2m).

Es hat sich gezeigt, dass die untersuchten Wellenhöhen und Windgeschwindigkeiten keine kritischen Spannungen oder Deformationen in PV-Modulen und Unterkonstruktion verursachen, dies ist in Abbildung 6 und Abbildung 7 zu sehen. In dem europäisch geförderten Projekt *SuRE* werden die Modelle weiterentwickelt um auch den Einfluss der Umgebungstemperatur, sowie Einstrahlung abzubilden.

⁸ D. K. Sree et al., "Fluid-structural analysis of modular floating solar farms under wave motion", Solar Energy, vol. 233, pp. 161–181, 2022, doi: 10.1016/j.solener.2022.01.017

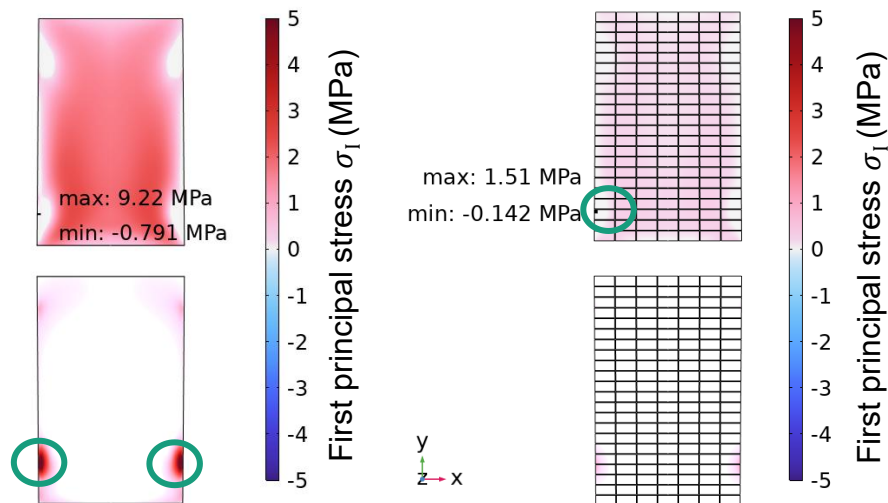


Abbildung 7: mechanische Zugspannung im Modulglas (links) und den Solarzellen (rechts). Oben ist jeweils das Ost-Modul und unten das West-Modul gezeigt.

2.1.4.2 AP 4.2: Entwicklung anwendungsnaher beschleunigter Prüfprogramme

Spezifische Belastungsfaktoren mit Blick auf Langzeitbeständigkeit der Module, Modulkomponenten und Systemkomponenten wurden in AP 4.1 ermittelt. Daraus erfolgt eine Ableitung von relevanten Prüfprogrammen, die die besonderen Anforderungen abbilden.

Die IEC-Zertifizierung legt Standards für Photovoltaikanlagen fest, die in Europa verkauft werden. Dabei bescheinigen die IEC-Zertifikate i.d.R. nicht unterschiedliche Qualitäts- und Leistungsstufen, sondern die geforderte grundsätzliche Funktionalität und Sicherheit.

Somit sind durch die IEC-Zertifizierung die wesentlichen Betriebsanforderungen an das Modul und die Komponenten gewährleistet

Prüfungen aus vorhandenen internationalen Prüfstandards z.B. für PV-Module, insbesondere IEC61215 und IEC61730 wurden angepasst und zu aussagekräftigen Prüfsequenzen kombiniert.

Zusätzlich wurden Prüfungen für die Komponenten wie Kabel, Stecker und Anschlussdosen berücksichtigt.

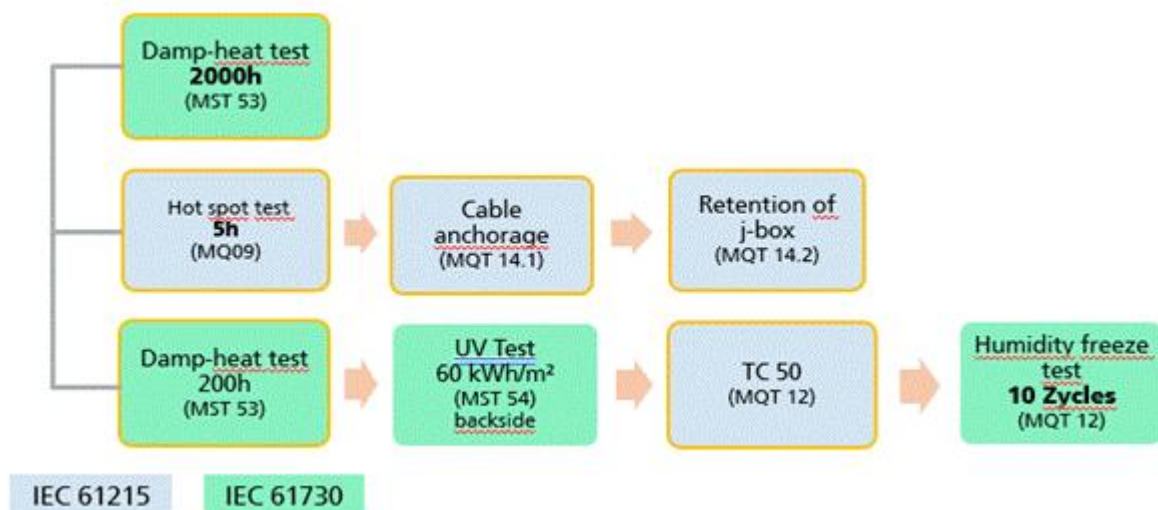


Abbildung 8: Prüfprogramm für FPV.

Abbildung 8 zeigt das entwickelte Prüfprogramm. Es besteht aus 3 Sequenzen. Dazu wurden insbesondere für FPV relevante Prüfungen der Standardprüfungen IEC61215 und IEC61730 angepasst und erweitert.

2.1.4.3 AP 4.3 Zuverlässigkeitsprüfungen an Systemkomponenten

Die Zuverlässigkeitsprüfungen wurden an den ausgewählten PV-Komponenten Stecker/Kabel und Anschlussdosen durchgeführt. Für die Prüfung der Anschlussdosen wurden zwei Klebehersteller angefragt, und jeweils Klebematerialien für die Anschlussdosen für Tests im Rahmen des Projekts zur Verfügung zu stellen. Jeweils zwei PV-Module wurden mit je zehn Standarddosen pro Klebematerial am ISE hergestellt. In Abbildung 9 sind die die Anschlussdosen mit den zwei verschiedenen Klebematerialien geöffnet und geschlossen dargestellt.

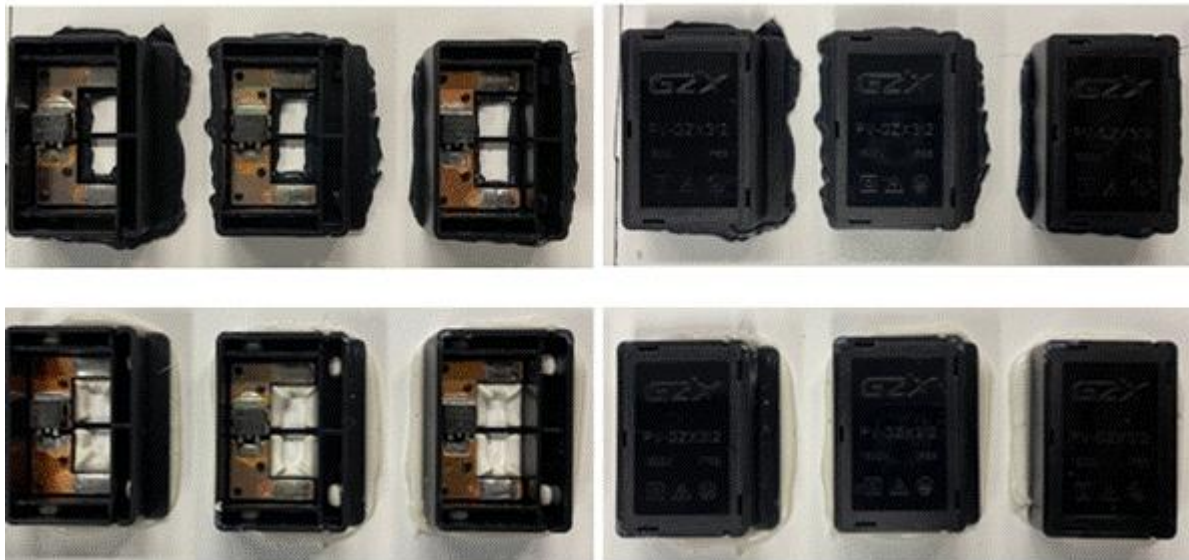


Abbildung 9: Prüfmuster für Anschlussdosen mit zwei verschiedenen Klebematerialien Kleber#1 geöffnet (oben, links) und geschlossen (oben rechts), Kleber#2 geöffnet (unten links) und geschlossen (unten rechts).

An den Prüfmustern werden zur Charakterisierung und Bewertung Haftprüfung gemäß der Norm IEC 61215-2:2021 durchgeführt (Abbildung 10). Dabei wird eine Zugkraft von 40 N allmählich an 4 Positionen für die Dauer von 10 Sekunden aufgebracht. Vor und nach der Prüfung erfolgt eine visuelle Begutachtung / Sichtprüfung.

An dem Prüfmodul werden beschleunigte Alterungsversuche durchgeführt. Es wurde eine Auslagerung bei 85°C und 85% RH (DH) für 1000 Stunden vorgenommen. Vor und nach der Auslagerung wurde eine Sichtprüfung und eine Haftprüfung an allen Anschlussdosen durchgeführt. Als Ergebnis lässt sich feststellen, dass keine Änderungen nach 1000 Stunden DH Prüfung aufgetreten sind.

Das Prüfmodul wurde nochmals für 1000 Stunden DH beschleunigt gealtert. Auch nach in Summe 2000 Stunden DH sind keine Änderungen bei der Sichtprüfung und Haftprüfung feststellbar.

An einem zweiten Prüfmodul wurde ein Dauerversuch durchgeführt. Dazu wurde eine Anschlussdose mit einer Zugkraft von 40 N statisch belastet. Die Prüfung wurde am 13.01.2025 gestartet und am 19.08.2025 (217 Tage) beendet. Eine danach durchgeführte visuelle Prüfung und eine Haftprüfung gemäß der Norm IEC 61215-2:2021 zeigte keine Auffälligkeiten.



Abbildung 10: Prüfmuster für Anschlussdosen mit zwei verschiedenen Klebematerialien (oben) und Haftprüfung gem. IEC 61215-2:2021 (unten).

2.1.4.4 AP 4.4: Leaching/Auswaschung von Schadstoffen

Für die vergleichende Messung für Leaching/Auswaschung von Schadstoffen wurde eine entsprechende Versuchsanordnung entwickelt. Es soll eine vergleichende Messung zwischen deionisiertem Wasser vs. Salzwasser erfolgen. Als Salzkonzentration wurde ein mittlerer Wert für das Mittelmeer: von 3,8% (gew.) gewählt. Die Nachfüllung der Becken ist durch eine regelmäßige Füllstandskontrolle sichergestellt. Die Module sind an ein Maximum-Power-Tracking Messsystem mit kontinuierlicher Datenerfassung angeschlossen. In Abbildung 11 und Abbildung 12 ist der Leaching-Test auf der Testfläche des ISE-Institutsgebäudes dargestellt.



Abbildung 11: Leaching-Test am FHG ISE Ansicht seitlich (links) und rückwärtig (rechts).



Abbildung 12: Leaching-Test am FHG ISE, Aufnahme vom 11.01.2024 DI-Wasserbecken (links) NaCl-Becken (rechts).

In Abbildung 13 sind zwei ausgewählte Messkurven des Maximum-Power-Tracking Messsystems für einen Wintertag und einen Sommertag dargestellt.

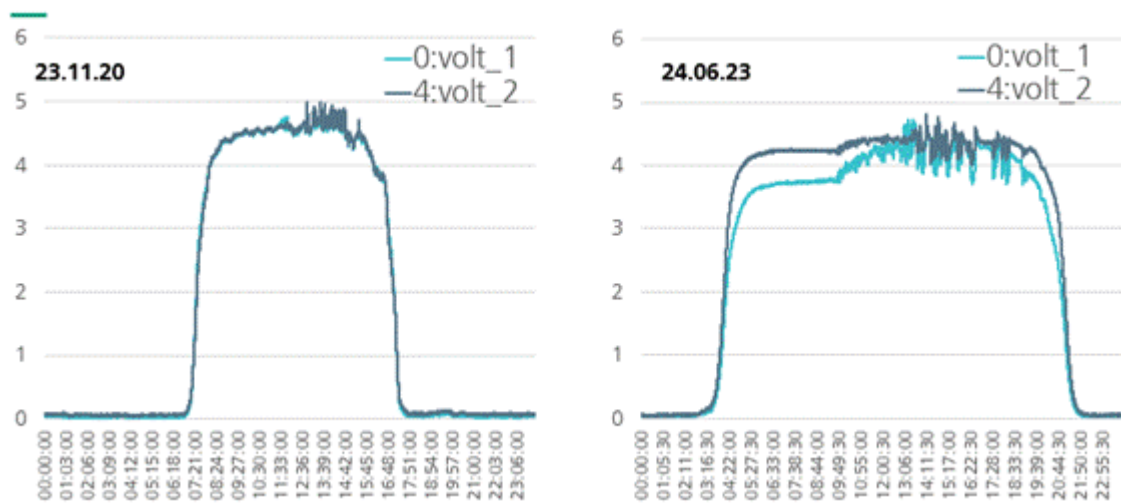


Abbildung 13: Maximum-Power-Tracking Spannungsverlauf am FHG ISE Kanal 0 Ohne NaCl, Kanal 0 mit NaCl im Winter (links) und Sommer (rechts).

Die Probenahme für die wasseranalytischen Messungen am BTU Cottbus sind am 25.06.2024 erfolgt. Es wurden fünf Proben gezogen:

- 1 PV-Modul in Wasser
- 2 PV-Modul in Salzwasser
- 3 Referenz ohne PV Modul Wasser
- 4 Referenz ohne PV Modul Salzwasser
- 5 Referenz Wasser

Die Ergebnisse der vergleichenden Messung zur Untersuchung des Effektes eines Leaching/Auswaschung von Schadstoffen aus dem Modul in das Wasser sind für den Expositionszeitraum 15.11.2023 - 25.06.2024 (223 Tage) sind in Abbildung 14 dargestellt.

Auswertung	Ag	Al	As	Cd	Cr	Cu	Ga	In	Mo	Ni	Pb	Se	Zn
DI - Leaching nachweisbar	-	++	?	-	-	?	-	-	-	+	-	-	+
Salzwasser - Leaching nachweisbar	+	++	+	-	-	?	-	+	+	+	+	-	?

Auswertung	Al	Delta Modul-Referenz	rel. Delta Modul-Referenz	Ni	Delta Modul-Referenz	rel. Delta Modul-Referenz
Modul in DI / filtriert	0,0890	0,0841	17,2	0,0025	0,0015	1,5
Modul in Salzwasser / filtriert	0,0958	0,0680	2,4	0,0080	0,0045	1,3
DI in Testbehälter /filtriert ohne Modul	0,0049			0,0010		
Salzwasser in Testbehälter / filtriert ohne Modul	0,0278			0,0035		

Abbildung 14: Vergleichende Messung Effekt Leaching/Auswaschung von Schadstoffen Expositionszeitraum 15.11.2023 - 25.06.2024, 223 Tage.

Es ist eine weitere Probennahme für einen zweiten Messpunkt am 28.11.2025 erfolgt. Die Proben wurden an die BTU Cottbus, Lehrstuhl Biotechnologie der Wasseraufbereitung gesandt.

Die Ergebnisse der vergleichende Messung Effekt Leaching/Auswaschung von Schadstoffen für den Expositionszeitraum 26.06.2024 - 28.11.2025 (520 Tage) sind in Abbildung 15 dargestellt.

Auswertung	Fe	Al	Mn	Ga	In	La	Sm	Nd	Ce	Pr	Cu	Ni	Cr	Mo	Zn	Cd	Pb	Si	Ag	As	Se
DI Leaching Nachweisbar	?	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	-	-	?	?	+	?	-	-	-
Salzwasser Leaching Nachweisbar	?	++	-	-	-	-	-	-	-	-	++	++	-	-	?	?	++	?	+	-	+

Abbildung 15: Vergleichende Messung Effekt Leaching/Auswaschung von Schadstoffen Expositionszeitraum 26.06.2024 - 28.11.2025, 520 Tage

Es bestand bei dieser Probenanalyse dankenswerterweise auch die Möglichkeit, zusätzlich zu den Metallen auch noch eine Analyse nach PFAS (Per- und Polyfluoralkylsubstanzen) zu untersuchen.

PFAS sind eine Gruppe von über Industriechemikalien, welche aufgrund ihrer extremen Langlebigkeit in der Umwelt auch unter „Ewigkeitschemikalien“ bekannt sind. PFAS reichern sich im menschlichen Körper an und stehen im Verdacht, Krebs zu fördern und oder das Immunsystem zu schwächen. In Abbildung 16 sind die Ergebnisse der PFAS-Analyse zusammengestellt.

Für die PFA PFOA zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen den Ergebnissen Modul in DI-Wasser / Modul in Salzwasser und den jeweiligen Referenzen. Der relativen Unterschiede liegen beim Salzwasser um ca. Faktor 3,6 höher als beim DI-Wasser. Eine weitergehende Bewertung dieser Ergebnisse ist noch ausstehend.

PFAS	Konz. in ng/L				
	Pr26	Pr27	Pr28	Pr29	Pr30
PFBA	0	0	0	0	0
PFPeA	0	0	0	0	0
PFBS	0,42	0,00	0	0	0
PFHxA	0,00	0,00	0	0	0
PFHpA	1,36	0,00	0	0,53	0,00
PFHxS	1,19	0,08	0	0,08	0,03
PFOA	5,26	5,69	2,44	0,74	1,22
PFNA	0,40	0,00	0,00	0,54	0,00
PFOS	1,59	0,31	0,40	0,21	0,10
PFDA	0,00	0,00	0,00	1,74	0,05
PFUnA	0,00	0,00	0	0,00	0,00
PFDoA	0,37	0,00	0	0,34	0,21
PFTTrD	0,00	0,79	0	0,70	1,40
PFTeD	0,00	0,00	0	0,00	11,49
1H1H2H2H PFHxS 4_2	5,84	20,60	0	0,00	0
PFPeS	0,00	11,57	0	4,79	0
1H1H2H2H PFOS 6_2	0	0,00	0	0	0
PFHpS	0	0,00	0	0	0
1H1H2H2H PFDS 8_2	0	0	0	0	0
PFDS	0	0	0	0	0
PFOSA	0	0	0	0	0
Capstone B	0	0	0	0	0
Summe	16,44	39,03	2,85	9,67	3,00
Ausreißer/Verunreinigung???					14,50
Modul in DI Wasser					
Modul in Salzwasser					
Referenz DI Wasser in Behälter					
Referenz Salzwasser in Behälter					
Referenz DI Wasser					

Abbildung 16: Auswertung nach PFAS-Messung Effekt Leaching/Auswaschung von Schadstoffen Expositionszeitraum 26.06.2024 - 28.11.2025, 520 Tage.

Mechanische Beanspruchung Stecker

Am FHG ISE wurde als Worst-Case-Szenario für die Komponente Stecker ein Szenario eruiert, in dem der Stecker komplett mit dem Wasser in Kontakt kommt und noch zusätzlich eine mechanische Beanspruchung in Form von Zuglasten auftritt. Um diese Situation im Labor abzubilden, wurde ein Testaufbau wie in Abbildung 17 skizziert entwickelt.

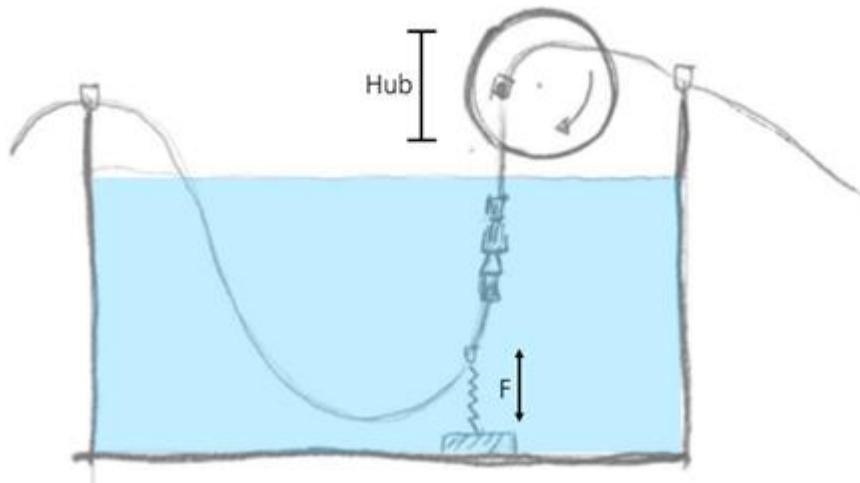


Abbildung 17: Prinzip-Skizze für einen Belastungstest von Steckern und Kabeln (FHG ISE).

Der Hub je Zyklus beträgt ca. 100mm. Als Frequenz wird ein Wert von ca. 1 Hz angesetzt. Die Zugkraft soll kontinuierlich von 0N bis 5N betragen. Die Stecker werden im Wasser zyklisch belastet. Als Abschätzung für die Prüfsequenz wird folgende Überschlagsrechnung erstellt (Tabelle 1):

Abschätzung Prüfzeiten mech. Beanspruchung Stecker	
See	8760 h/a
Wellengang	10 mal/h
Zyklen	87600 Zyklen/a
Frequenz Teststand	1,25 Hz
Periode	10 a
	876000 Zyklen
	195 h
	8 d

Tabelle 1: Abschätzung der Zyklen Anzahl für Belastungstest von Steckern und Kabeln (FHG ISE).

Als Parameter für das Bewertungskriterium zum Bestehen des Testes wird eine Übergangswiderstandmessung gemäß „Dielectric Strength Test“ verwendet. Der Test ist für PV-Steckverbinder bis zu einer Bemessungsspannung von 1500 VDC in der IEC 62852, Kapitel 6.3.8 definiert.

Für die Prüfungen an den im Projekt eingesetzten Steckern gilt demnach folgendes Kriterium zum Bestehen des Tests: Bei einer anliegenden Spannung von 8kV (DC) muss für die Dauer von 60s der gemessene Strom I kleiner als 2 mA sein. Somit werden Übergangswiderstände R von größer 4 M Ω eingehalten. Der Test jeweils wird vor (Referenz) und nach der Prüfung durchgeführt.

In Abbildung 18 ist die Vorrichtung für den mechanische Belastungstest von Steckern und Kabeln, der Prüfmusterhalter für 5 Steckerpaare sowie die Testapparatur im Prüflauf abgebildet.



Abbildung 18: Vorrichtung für den mechanische Belastungstest von Steckern und Kabeln (links). Prüfmusterhalter für 5 Steckerpaare (Mitte) Testapparatur im Prüflauf (rechts) (FHG ISE).

Die Übergangswiderstandmessung sollte zeitnah nach Testende erfolgen (wenige Stunden). Es wurden drei Prüfmuster Sets mit jeweils fünf Steckern vermessen

Prüfmuster #1:

Als Frequenz der Apparatur wurde ein Wert von 1,37 Hz gemessen (5 Messungen, jeweils 100 Zyklen, SD 0,015). In Abbildung 19 sind die Prüfmuster #1 nach 830 T-Zyklen und nach Dielectric Strength Test geöffnet dargestellt.

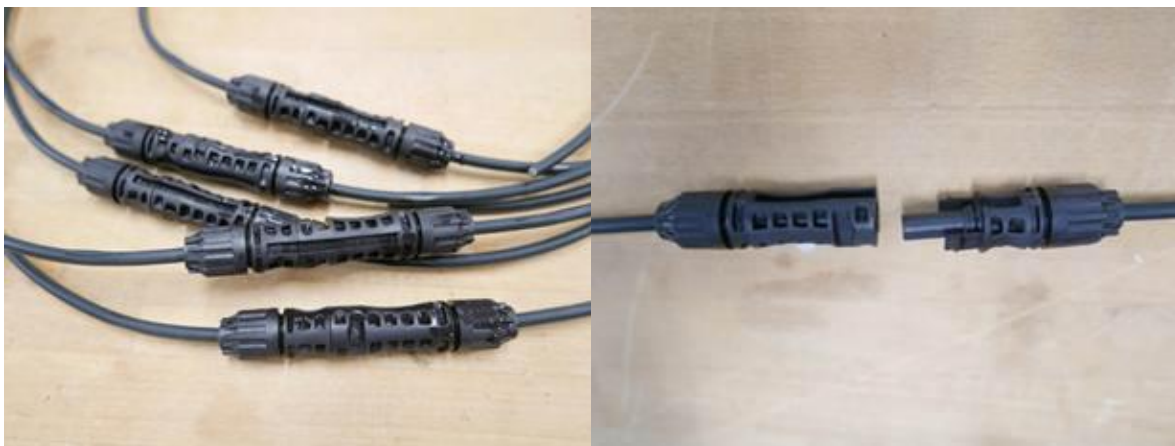


Abbildung 19: Prüfmuster #1 nach 830 T Zyklen (links) und nach Dielectric Strength Test geöffnet (rechts).

Alle fünf Prüfmuster von #1 haben den Dielectric Strength Test vor und nach der Prüfung bestanden.

Prüfmuster #2:

In Abbildung 20 sind die Prüfmuster #2 nach 830 T-Zyklen und nach Dielectric Strength Test geöffnet dargestellt.



Abbildung 20: Prüfmuster #2 nach 830 T-Zyklen (links) und nach Dielectric Strength Test geöffnet (rechts).

Alle fünf Prüfmuster von #1 haben den Dielectric Strength Test vor und nach der Prüfung bestanden.

Prüfmuster #3:

In Abbildung 21 sind die Prüfmuster #3 nach 830 T-Zyklen und nach Dielectric Strength Test geöffnet dargestellt.

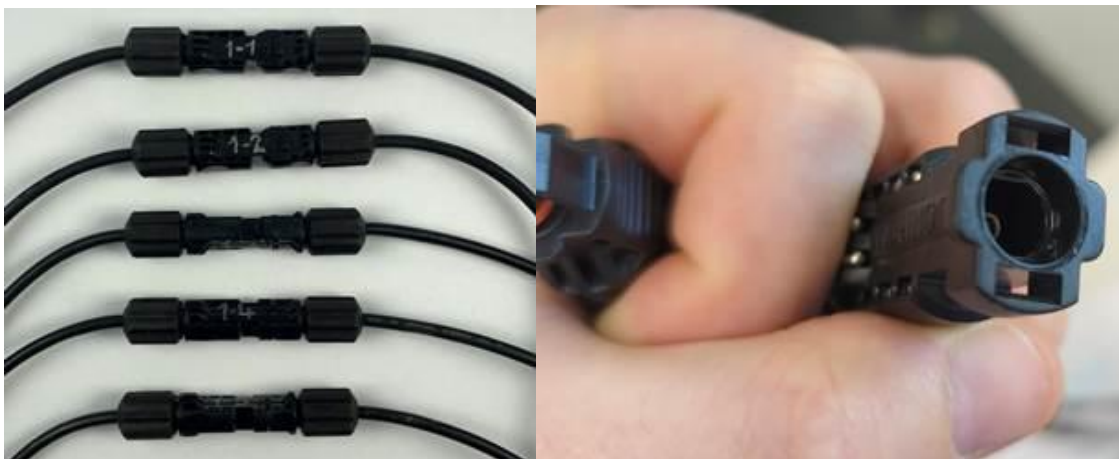


Abbildung 21: Prüfmuster #3 nach 830 T-Zyklen (links) und nach Dielectric Strength Test Stecker #3-3 geöffnet (rechts).

Vier Prüfmuster von #1 haben den Dielectric Strength Test vor und nach der Prüfung bestanden. Ein Stecker mit der Nummer #3-3 hat den Dielectric Strength Test nach der Prüfung nicht bestanden. Der Stecker wurde

direkt nach der Messung geöffnet, und als Ergebnis der visuellen Inspektion hat sich gezeigt, dass Wasser in das Innere des Steckers gelangt ist.

2.1.4.5 AP 4.5: Gremienarbeit und Normung

Es ist eine Zuarbeit und Teilnahme am Normungstreffen im Rahmen der IEA Task 13, ST 2.1.2: „Degradation and performance loss rates of FPV systems“ erfolgt.

Eine Teilnahme an von SERIS Singapur organisierten Treffen zum Erstellen einer “Technical Specification (TS) on Floating PV systems: “Floating photovoltaic power plants – Design guidelines and recommendations”, welche auf der “Technical Reference” TR100:2022 (selbst basierend auf IEC 62738:2018) aufbauen soll, hat stattgefunden.

2.1.5 AP 5: Modulentwicklung

In diesem AP werden die Arbeiten zur Prüfung- und Charakterisierung von Modulen und Materialien zusammengefasst. Dazu werden Zuverlässigkeitsaspekte von PV-Modulen für FPV-Anlagen untersucht. Ein besonderer Schwerpunkt liegt auf der Bewertung von Rückseitenfolien als kritischer Komponente von PV-Modulen. Es werden geeignete Module entwickelt und gebaut.

Ergebnis / Meilenstein Nr.	Erzieltes Ergebnis	Erreicht am	Kommentar zur Einhaltung des Zeitplans
E1: <i>Optimierung/Auswahl optimaler Rückseitenfolie für FPV</i>	Auswahl ist erfolgt	03/23	E1 wurde fristgerecht erbracht
E2: <i>Bewertung/Vergleich von PV-Modulen mit Standardmaterialien und optimierter Rückseitenfolie</i>	Bewertung im Vergleich ist erfolgt	09/24	E2 wurde fristgerecht erbracht

Es wurde außerdem eine Konzeptstudie für selbstschwimmende PV-Module durchgeführt. Die Grundidee ist die Einsparung der Unterkonstruktion. Es hat sich aber gezeigt, dass dennoch Schwimmkörper notwendig sind. Daher wurde untersucht, inwieweit die Schwimmkörper in den Modulherstellungsprozess integriert werden können. Letztlich hat sich aber gezeigt, dass eine nachträgliche Anbringung wirtschaftlicher ist. Da es schon zahlreiche ähnliche Ansätze eines eigenen Schwimmkörpers pro PV-Modul gibt, wurde die Idee nicht weiterverfolgt.

2.1.5.1 AP 5.1: Zuverlässigkeitsbewertung am Markt etablierter PV-Modultechnologien

Die kommerziellen Solarmodultypen und Technologien, die am widerstandsfähigsten gegen das Eindringen von Feuchtigkeit sind, werden wie folgt bewertet:

Modul-kategorie	Zellarchi-tektur	Typische Verkapselung und Abdichtung	Feuchtigkeitsbeständigkeit (qualitativ)	Kommentar
Glas-Glas (GG) monokristallin	PERC / TOPCon / HJT EPE, PO, EVA (mono-Si)		Am höchsten	- Die Doppelglaskonstruktion bietet eine sehr hohe Barrierewirkung. - Silikon ist selbstdichtend und stark wasserabweisend. - Keine Polymer-Rückseite, die korrodieren könnte.
GG-Tandem (Mono-	TOPCon/Si &+ Perowskit/Ge	EPE, PO, EVA	Hoch, aber risikoreicher	Die Perowskit-Schicht ist feuchtigkeitsempfindlich; erfordert eine sehr dichte Glas-Glas-Barriere

Modul- kategorie	Zellarchi- tektur	Typische Verkapselung und Abdichtung	Feuchtigkeitsb eständigkeit (qualitativ)	Kommentar
Si/Perowskit oder Si/Si⁺)				und ein Hochleistungs-Epoxidharz an den Zellrändern.
Glas-Metall (GM)	PERC TOPCon	EPE, PO, EVA Rückseitenfolie mit Metallrückseite (in Hoch der Regel Aluminium)		- Die Metallrückseite verhindert eine Delaminierung. - Die Glasfront schützt die Kontakte.
Dünnschicht (TF)	Glas- CdTe, CIGS, a-Si	EPDM/Polyurethan + Glasfront + Gut bis mäßig Metallrückseite		- Dünnschichtmodule verfügen über eine flexiblere Vergussmasse, die Bewegungen abfedern kann; allerdings ist das Polymerbindemittel oft feuchtigkeitsdurchlässiger als Epoxidharz. - CdTe weist im Glas-Metall-Format eine bessere Langzeit-Feuchtigkeitsbeständigkeit auf als CIGS.
Kantenversiegelung Polyurethan oder Silikon		3-M TM -Polyurethan- Kantenversiegelung mit integrierter rutschfester Schicht	Gut	Verhindert Mikrospalten, durch die Wasser eindringen kann – besonders kritisch an der Schnittstelle zwischen Modul und Rahmen.
Silikon- Verkapselung	PERC/TOPCO N	Silikon	Gut	Gilt als besonders stabiles Verkapselungsmaterial sowohl gegen Feuchtigkeit als auch UV, Im Markt aber nur vereinzelt zu kaufen

2.1.5.2 AP 5.2 Entwicklung, Prüfung und Charakterisierung von Modulen mit unterschiedlichen Rückseitenfolien

Es wurden zwei verschiedene Materialien zur Einkapselung für die Arbeiten im Projekt ausgewählt (vgl. Tabelle 2).

Backsheet	Verkapselung	Backsheet	Verkapselung
Glas	Heckert Standard EVA	Glas	Marktübliches POE
Heckert-Standard		Heckert-Standard	
Alu-Backsheet		Alu-Backsheet	
„wasserun- durchlässig“		„wasserun- durchlässig“	

Tabelle 2: Rückseitenfolienprüfmuster.

Es wurden in Summe 70 Minimodule mit zehn unterschiedlichen Materialkombinationen (BOM) am FHG ISE hergestellt.

Die Module wurden initial elektrisch charakterisiert. Zudem wurde eine visuelle Inspektion, Elektroluminiszenz aufnahmen sowie optische Spektroskopie und Farbmessungen durchgeführt.

Als beschleunigte Prüfungen wurde eine Auslagerung bei 85°C und 85% RH (DH) für zweimal 1000 Stunden festgelegt. Die oben beschriebene Charakterisierung wurde jeweils nach 1000 Stunden DH durchgeführt (Tabelle 3).

	Front	Encapsulant front	Encapsulant rear	Rear
BOM1	Glass	EVA UV pass	EVA UV cut	Glass
BOM2	Glass	POE UV pass	POE UV cut	Glass
BOM3	Glass	EVA UV pass	EVA UV cut	PET weiß
BOM4	Glass	POE UV pass	POE UV cut	PET weiß
BOM5	Glass	EVA UV pass	EVA UV cut	PET schwarz
BOM6	Glass	POE UV pass	POE UV cut	PET schwarz
BOM7	Glass	EVA UV pass	EVA UV cut	PET Alu schwarz
BOM8	Glass	POE UV pass	POE UV cut	PET Alu schwarz
BOM9	Glass	EVA UV pass	EVA UV cut	PET low WVTR
BOM10	Glass	POE UV pass	POE UV cut	PET low WVTR

Tabelle 3: Materialkombinationen für Minimodule (4-Zeller, 36cm x 36 cm).

Im Folgenden werden beispielhaft für ein Modul der BOM 1 die Ergebnisse der Elektroluminiszenzprüfung (Abbildung 22) sowie der visuellen Inspektion (Abbildung 23) dargestellt.

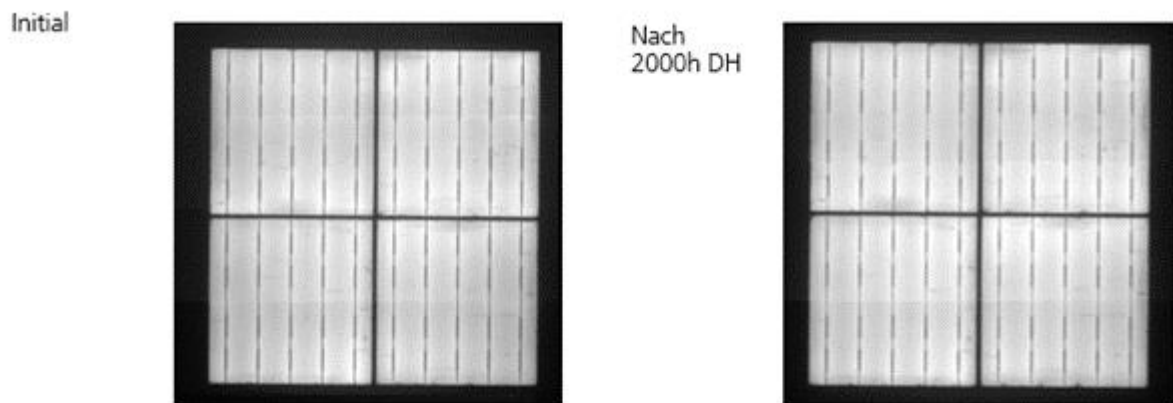


Abbildung 22: Minimodule BOM1 Ergebnisse Elektroluminiszenz initial (links) und nach 2000h 85°C, 85%RH (rechts).

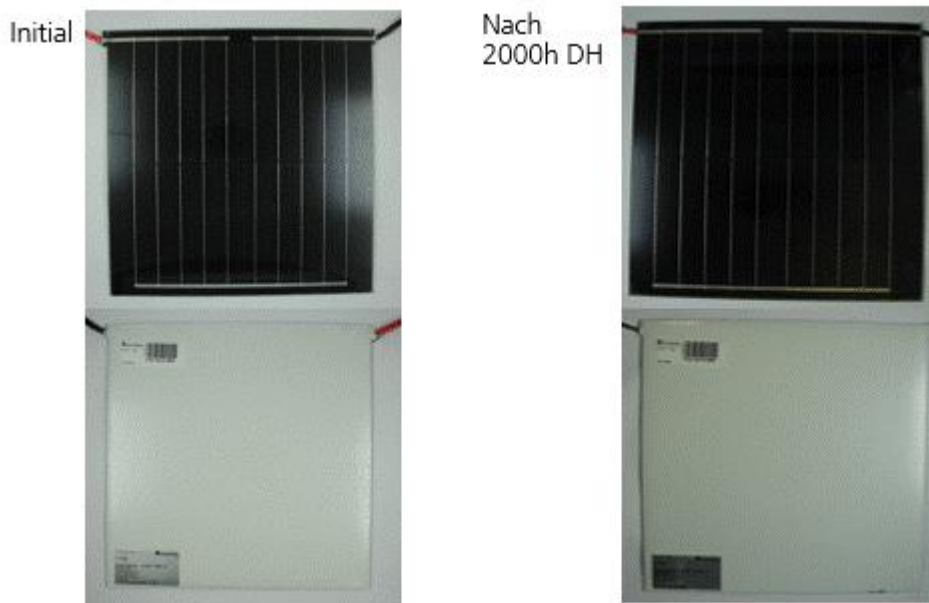


Abbildung 23: Minimodule BOM 1 Ergebnisse visuelle Inspektion initial (links) und nach 2000h 85°C, 85%RH (rechts).

Bei der elektrischen Charakterisierung der Minimodule wurden folgende grundlegenden elektrische Kenngrößen, unter Laborbedingungen (STC) gemessen:

- P_{MPP} (Maximal Power Point)
- FF (Fill Factor)
- I_{SC} (Short Circuit Current)
- U_{OC} (Open Circuit Voltage)

In Abbildung 24 sind die Ergebnisse elektrische Charakterisierung der Minimodule #61, BOM1 bis #70 BOM10 als relative Änderungen von initial zu 2000h 85°C, 85%RH dargestellt.

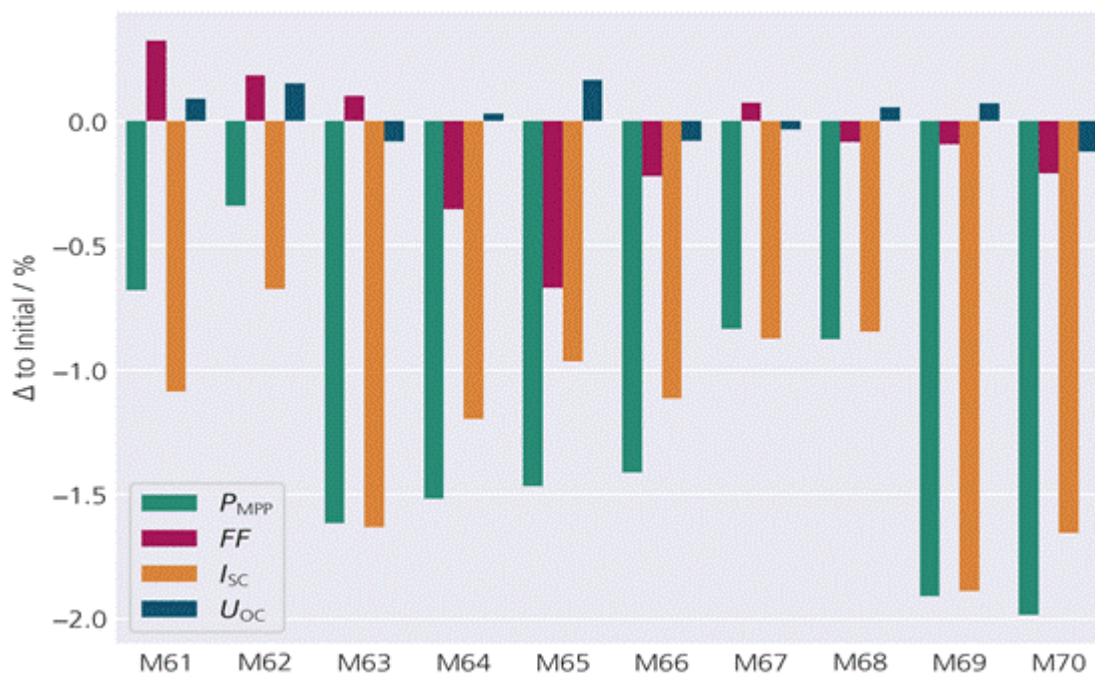


Abbildung 24: Ergebnisse elektrische Charakterisierung der Minimodule #61 bis #70 als relative Änderungen von initial zu 2000h 85°C, 85%RH.

Jeweils ein kompletter Satz der Minimodule wurde am Zimmermann-Demonstrator in Merdingen (Abbildung 25) als Referenz sowie in Lohsa auf seinem schwimmenden Zwilling (Abbildung 26) zur Exposition gebracht. Die Module werden jeweils unbestromt betrieben. Bei einer Bestrahlung durch die Sonne stellt sich an den Modulen eine Leerlaufspannung U_{oc} ein.



Abbildung 25: Exposition der Mini-Module am Merdingen-Demonstrator seit 01.09.2025.



Abbildung 26: Exposition der Mini-Module in Lohsa auf dem Zimmermann-Demonstrator seit 28.08.2025.

Es wird angestrebt, nach mindestens einem Jahr Expositionszeiten die Module wieder an das FHG ISE zurückzuholen und zu charakterisieren.

2.1.6 AP 6: Konzeption, Aufbau und Betrieb der Versuchsanlage

In diesem Arbeitspaket wurden die einzelnen Versuchsanlagen konzipiert und realisiert. Dabei handelt es sich drei schwimmende Demonstratoren auf dem Mortkasee in Lohsa mit verschiedenen Unterkonstruktionen (Floating Solar, ProFloating, Zimmermann; errichtet und betrieben von RWE und ecotec), aber gleichem Modul- und Wechselrichtersetup. Darüber hinaus wurde vom Fraunhofer ISE in seinem Outdoor Performance Lab in Merdingen ein Landzwilling des schwimmenden Zimmermann-Demonstrator errichtet und betrieben (Abbildung 27).



Abbildung 27: FPV-Demonstratoren im PV2Float-Projekt.

Begleitend wurde in Zusammenarbeit mit RWE, Diliciency und meteocontrol ein geeignetes Mess- und Monitoringkonzept erarbeitet, um die Performance von FPV im Vergleich zu landbasierter PV – und verschiedener FPV-Designs untereinander – zu untersuchen. Von besonderem Interesse war dabei der theoretische Mehrertrag von FPV durch die Verdunstungskühlung des Wassers (sowie mögliche Verschmutzungsverluste durch Vogelkot und andere organische Ablagerungen). Bei den drei schwimmenden Demonstratoren in Lohsa waren RWE, Diliciency und meteocontrol für die Beschaffung und Betrieb des thermischen sowie elektrischen Monitorings zuständig, das Fraunhofer ISE für das meteorologische Monitoring, die BTU für die hydrologischen Messungen für AP 9. Bei der Landreferenzanlage in Merdingen übernahm das ISE vollumfänglich Beschaffung und Betrieb aller Sensoren.

Die errichteten Demonstratoren wurden so einem umfangreichen Monitoring unterzogen, anfallende Wartungsarbeiten wurden am Mortkasee von RWE und in Merdingen vom ISE getragen. Von besonderem Interesse bei der Datenerhebung war der theoretische Mehrertrag von FPV durch die Verdunstungskühlung des Wassers sowie mögliche Verschmutzungsverluste durch Vogelkot und andere organische Ablagerungen.

Ergebnis / Meilenstein Nr.	Erzieltes Ergebnis	Erreicht am	Kommentar zur Einhaltung des Zeitplans
M3: Aufbau der Versuchsanlagen abgeschlossen	Mortkasee: unter RWE-Verantwortung Merdingen: unter ISE-Verantwortung	Merdingen: Januar 2025	Merdingen: 1.5 Jahre Verzug
E1: Technologisch aussichtsreichsten Varianten identifiziert	unter RWE-Verantwortung		
E2: Mess- und Monitoringkonzept erstellt	in Zusammenarbeit mit RWE, Diliciency, meteocontrol und ecotec	20.11.2024	1.5 Jahre Verzug
E3: Planung der Versuchsanlagen abgeschlossen	unter RWE-Verantwortung		
E4: Errichtung der Versuchsanlagen abgeschlossen	Demonstrator in Merdingen in Betrieb genommen	17.01.2025	1.5 Jahre Verzug
E5: O&M-Konzept erstellt	Mortkasee: unter RWE-Verantwortung Merdingen: unter ISE-Verantwortung	IV/2024	1.5 Jahre Verzug
E6: Quantitative Erhebung der Modulverschmutzungsgrade	Verschmutzungsanalyse für die 4 Versuchsanlagen durchgeführt	5.12.2025	1.5 Jahre Verzug

2.1.6.1 E2: Mess- und Monitoringkonzept erstellt

Im Rahmen von AP 6 wurde ein einheitliches Monitoring-Konzept für die Demonstratoranlagen am Mortkasee sowie die Landreferenzanlage in Merdingen entwickelt und umgesetzt. Die PV-Monitoring-Datenplattform des Fraunhofer ISE bildet das Herzstück der datenbasierten Forschung im PV2Float-Projekt. Die Konzeptentwicklung umfasste die Definition der zu erfassenden Messgrößen, die Sensorauswahl unter Berücksichtigung der spezifischen Anforderungen eines Floating-PV-Standorts (u. a. erhöhte Feuchtigkeitsbelastung, Windexposition, eingeschränkte Zugänglichkeit) sowie das Detail Engineering der Messketten. Im Einzelnen wurden folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

- Konzeptentwicklung: Erstellung eines übergreifenden Mess- und Monitoringkonzepts (Ergebnis E2) mit Definition der Messgrößen, Abstraten, Datenübertragungswege und Qualitätssicherungsmaßnahmen.
- Sensorauswahl: Auswahl geeigneter Sensorik für PV-anlagenspezifische Parameter (Stringspannung, -strom, -leistung, Modul-, Umgebungs- und Wassertemperaturen) sowie meteorologische Parameter (Globalstrahlung horizontal und in Modulebene, relative Feuchte, Betaung, Niederschlag, Wind nach Geschwindigkeit und Richtung, Sichtweiten-Erkennung).
- Detail Engineering: Auslegung der Messketten, Verkabelungsplanung, Schrank-Layout und Kommunikationsarchitektur.
- Beschaffung und Vormontage: Beschaffung aller Komponenten, Aufbau und Verdrahtung des Messschanks sowie Vorab-Inbetriebnahme und Funktionsprüfung am Fraunhofer ISE in Freiburg.
- Installation vor Ort: Installation der Sensorik an beiden Standorten (Merdingen und Mortkasee), Inbetriebnahme der Datenerfassung und Anbindung an die zentrale Monitoring-Plattform.

An den beiden Demonstratorstandorten werden Wetterdaten sowie thermische und elektrische Anlagenkenngrößen kontinuierlich aufgezeichnet, zusammengeführt, visualisiert und für die weitere

Bearbeitung zu Forschungszwecken bereitgestellt (Abbildung 28). Die erfassten Daten dienen insbesondere der Parametrisierung und Validierung der Simulationsmodelle (AP 8.1 und 8.2) sowie als Grundlage für Degradations- und Gebrauchsdauerabschätzungen (AP 4.2).

Monitoring-Konzept: Sensorik und Messtechnik

Für jede PV-Anlage im PV2Float-Projekt wurde ein einheitliches Monitoring-Konzept umgesetzt (siehe Beispiel Zimmermann-Demonstrator in Abbildung 29). Die Standardisierung der Messtechnik über alle Demonstratoren hinweg gewährleistet die Vergleichbarkeit der Messdaten und ermöglicht belastbare Rückschlüsse auf standort- und designspezifische Einflüsse.

Sensorausstattung

Je PV-Anlage:

Anzahl	Komponente	Typ / Hersteller	Messgrößen / Bemerkung
1	Wetterstation	OTT HydroMet WS510	Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Lufttemperatur, rel. Feuchte, Luftdruck
2	Einstrahlungssensoren POA	Si-Sensor, Fa. MIT (Ost + West)	Globalstrahlung in Modulebene je Ausrichtung
2	Modultemperatur-sensoren	Pt100	Modul-Rückseitentemperatur, je ein Sensor pro Ausrichtung (Ost/West)
1	Netzanalysator	Janitza UMG 96PA	AC-Leistung, Spannung, Strom, Frequenz, Leistungsfaktor, Energieerträge; direkt hinter dem Wechselrichter installiert

Je Standort (übergreifend):

Anzahl	Komponente	Typ/ Hersteller	Messgrößen / Bemerkung
1	Wetterstation	OTT HydroMet WS500	Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Lufttemperatur, rel. Feuchte, Luftdruck; gemeinsame meteorologische Referenz für alle Anlagen des Standorts

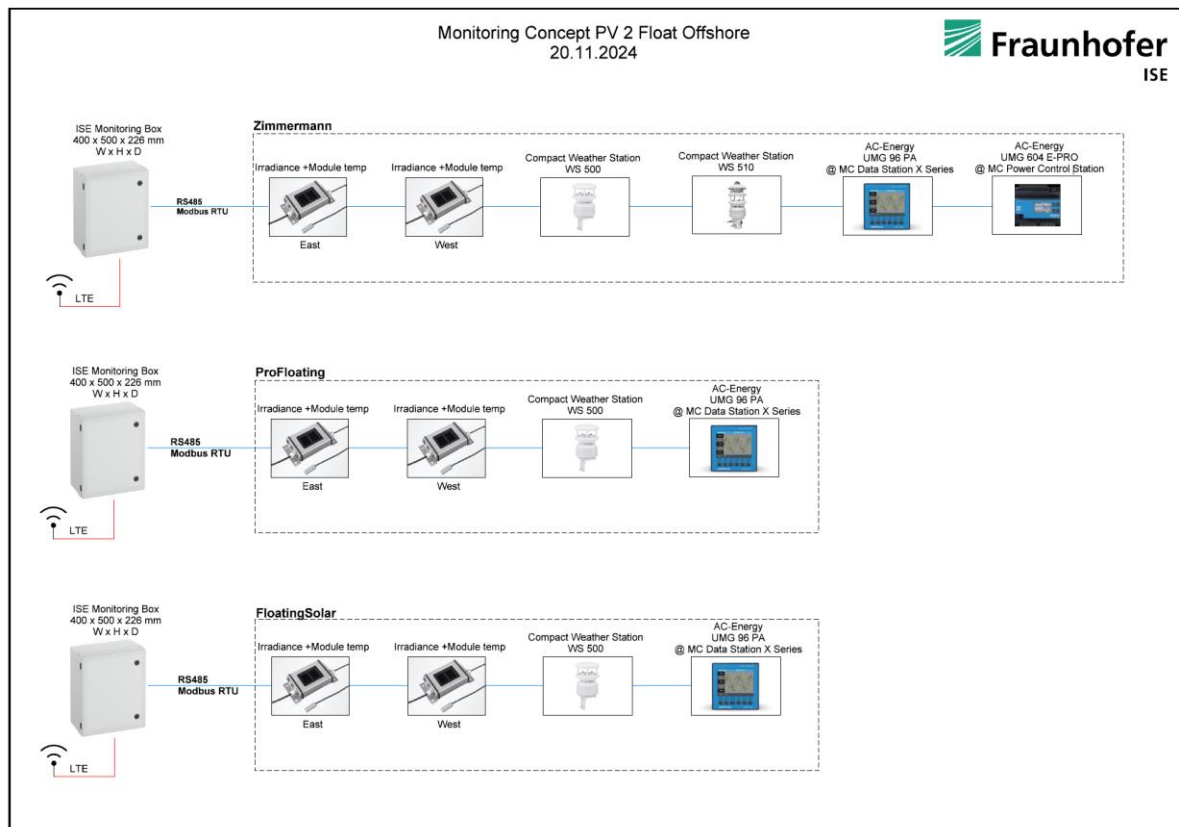


Abbildung 28. Monitoring-Konzept. Standort Mortkasee.

Begründung des Sensorkonzepts

- Die **WS510** je Anlage dient als Wetterstation für die Erfassung der Umgebungsbedingungen unter die Modulflächen.
- Die **zwei Si-Sensoren (Fa. MIT)** in Modulebene (POA) ermöglichen die Erfassung der tatsächlich auf die Ost- bzw. West-ausgerichteten Modultische auftreffenden Einstrahlung. Dies ist Voraussetzung für eine Berechnung der Performance Ratio und der spezifischen Erträge je Ausrichtung.
- Die **zwei Modultemperatursensoren** (je einer pro Ausrichtung Ost/West) erfassen die Betriebstemperatur der Module an der Modulrückseite. Diese Daten sind zentral für die Quantifizierung des FPV-spezifischen Kühleffekts sowie für die temperaturkorrigierte Ertragsanalyse und Verschmutzungsanalyse.
- Der **Netzanalysator Janitza UMG 96PA**, direkt hinter dem Wechselrichter installiert, erfasst sämtliche AC-seitigen elektrischen Parameter mit hoher zeitlicher Auflösung und Genauigkeit. Damit werden Ertrags- und Performance-Analysen auf Wechselrichterebene ermöglicht.
- Die **WS500** als übergreifende Standort-Wetterstation liefert eine gemeinsame meteorologische Referenz für alle Anlagen eines Standorts und dient der Plausibilisierung der anlagenspezifischen WS510-Messwerte sowie der Redundanz bei Sensorausfällen.

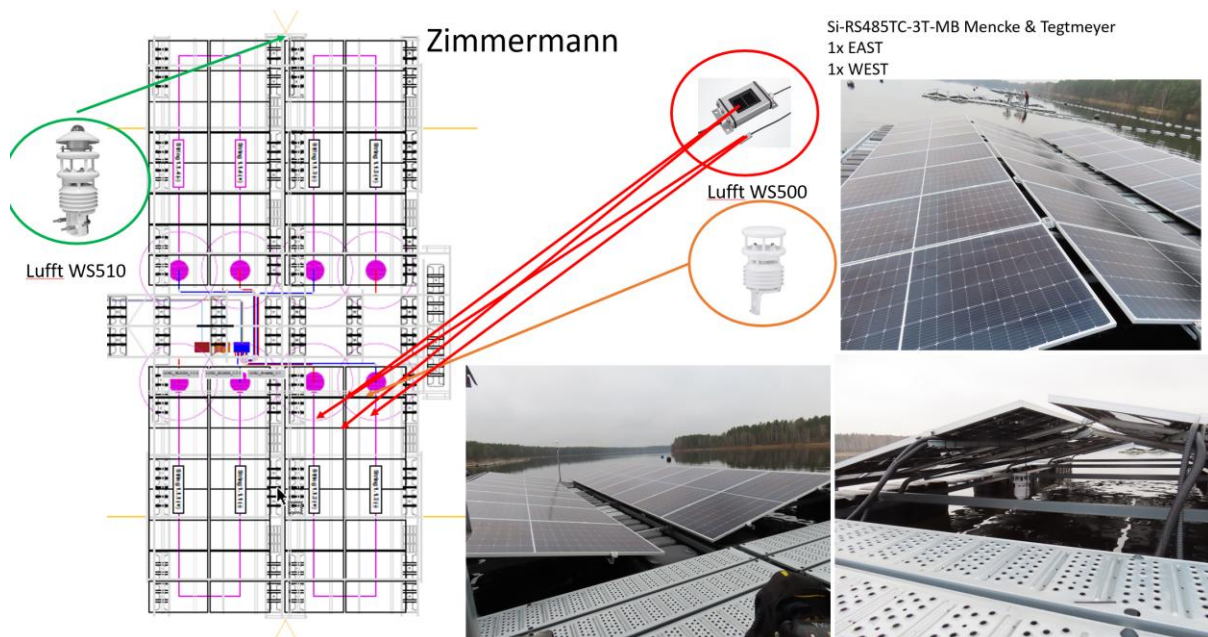


Abbildung 29. Sensorik auf der Zimmermann Demonstrator.

Datenerfassung, -übertragung und -bereitstellung

Die Messdaten werden je PV-Anlage lokal in einem Datenlogger erfasst und zwischengespeichert. Von dort erfolgt die automatisierte Übertragung auf die Laufwerke des Fraunhofer ISE, wo die Daten für die weitere wissenschaftliche Analyse bereitgestellt werden.

Zur Visualisierung der Messdaten und zum Austausch mit den Projektpartnern wurde eine zentrale Daten-Plattform implementiert (siehe Abbildung 30). Diese ermöglicht:

- Visualisierung der wichtigsten Anlagen- und Wetterdaten
- Historische Datenabfrage für vergleichende Analysen zwischen den Demonstratoren
- Partnerübergreifenden Datenzugang zur gemeinsamen Nutzung der Monitoring-Daten im Konsortium

Die PV-Monitoring-Datenplattform des Fraunhofer ISE bildet damit das Herzstück der datenbasierten Forschung im PV2Float-Projekt.

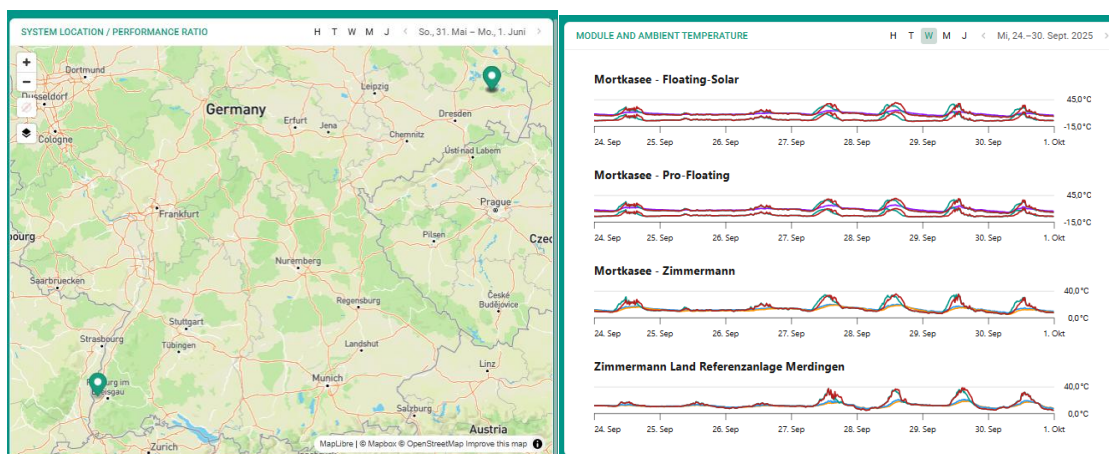


Abbildung 30. PV2FLOAT-Datenplattform. Links: Karte mit den zwei Standorten. Rechts: Temperaturmessungen (Umgebung und Modul) aller vier PV-Anlagen über eine Woche.

2.1.6.2 E4 und E5 in Merdingen: Errichtung Demonstrator und O&M-Maßnahmen

Im Rahmen von AP 6.5 übernahm das Fraunhofer ISE die Rolle des Eigners und Betreibers der Landreferenzanlage in Merdingen und setzte ein systematisches O&M-Konzept (Ergebnis E5) um.

Aufbau und Inbetriebnahme der Versuchsanlage Merdingen:

- Planung und Errichtung der PV-Referenzanlage auf dem Freiflächenstandort in Merdingen, inklusive AC-Anschlussplanung (Ergebnisse E3, E4; Meilenstein M3).
- Netzanschluss und Inbetriebnahme der Anlage einschließlich Integration in die Monitoring-Infrastruktur.
- Die Anlage ist baugleich mit dem Zimmermann-Demonstrator am Mortkasee ausgeführt, um einen belastbaren Vergleich zwischen FPV- und Landbetrieb zu ermöglichen.

O&M-Konzept und Betrieb:

Das O&M-Konzept umfasst folgende Maßnahmen:

- **Fernüberwachung:** Kontinuierliche Überwachung der Anlagenperformance über die Monitoring-Plattform mit automatisierter Alarmierung.
- **Regelmäßige Vor-Ort-Inspektionen:** Visuelle Inspektion, thermographische Untersuchung (IR-Thermographie) zur Detektion von Zelldefekten und Hotspots sowie Dokumentation des Anlagenzustands.
- **Reinigung und Instandhaltung:** Bedarfsgesteuerte Reinigung der Module, Prüfung der elektrischen Verbindungen und mechanischen Befestigungen, Vegetationkontrolle/Grünschnitt.

2.1.6.3 E6: Quantitative Erhebung der Modulverschmutzungsgrade

Im Rahmen von AP 6.4 wurde eine Methodik zur Detektion und Quantifizierung von Verschmutzungsverlusten (Soiling) an den PV2Float-Demonstratoren angewendet. Ziel war die Bestimmung standort- und designspezifischer Verschmutzungsraten ohne den Einsatz zusätzlicher Soiling-Sensoren – ausschließlich auf Basis der vorhandenen Monitoring-Daten (Modultemperatur, AC-Leistung, Einstrahlung). Die entwickelte Analyseketten zur Soiling-Detektion umfasst folgende Schritte:

1. Performance-Ratio-Berechnung (temperaturkorrigiert)

Aus den gemessenen AC-Leistungen, der Einstrahlung in Modulebene (POA) und der Modultemperatur wird eine temperaturkorrigierte Performance Ratio (PR'_{temp}) berechnet. Die Zelltemperatur wird dabei aus der gemessenen Modulrückseitentemperatur unter Berücksichtigung des Temperaturgradienten über das Modul abgeleitet:

- $\Delta T = G_{POA} \cdot (1 - \eta) / h_{back}$, mit $h_{back} \approx 300 \text{ W/(m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$
- $T_{cell} = T_{modul} + \Delta T$
- $PR_{temp} = PR / (1 - \gamma \cdot (T_{cell} - T_{STC}))$, mit γ = Temperaturkoeffizient von P_{max}

2. Datenfilterung

Zur Reduktion von Störeinflüssen werden strenge Filterkriterien angewendet:

- Einschränkung auf Sonnenhöchststand (ca. 10:00–14:00 Uhr)
- Einstrahlungsschwellen ($100\text{--}1200 \text{ W/m}^2$)
- Leistungsschwellenfilter ($P < P_{installiert} / 10$)
- Inverter-Clipping-Filter
- Clear-Sky-Filter ($\geq 85 \%$ des GHI)
- Ausreißererkennung mittels Interquartilsabstand (IQR, $k = 1,5$)
- Tagesaggregation der gefilterten Werte (Median)

3. Change-Point-Detektion (Ereigniserkennung)

Zur Identifikation von Verschmutzungs- und Reinigungsereignissen werden folgende Verfahren eingesetzt:

- Vorverarbeitung: Savitzky-Golay-Glättung, Gradientenberechnung
- Adaptive Change-Point-Algorithmen: PELT (Pruned Exact Linear Time) und KernelCPD (Radial Basis Function)
- Validierung durch adaptive Filter (Mindestdauer, Steigungsfenster, minimale Steigungsänderung)
- Klassifikation der Ereignisse: positiv (Reinigung), negativ (Verschmutzung), minimal (stabile Perioden)

4. Soiling-Ratio- und Soiling-Loss-Berechnung

- Identifikation des saubersten Zustands im ersten Betriebsjahr (Anker-PR) mittels $2,5 \times \text{Median Absolute Difference}$
- Kettenförmige Berechnung des Soiling Ratio: $SR(k+1) = SR(k) + \Delta SR(k)$
- Automatisierte Steigungsberechnung innerhalb jedes Ereignisses mittels verschiedener Machine-Learning-Algorithmen (u. a. OLS, Ridge, Lasso, Theil-Sen, Huber, RANSAC, Random Forest, SVR, Gaussian Process, Bayesian, Kalman)
- Automatische Auswahl des besten Modells anhand des Korrelationsscores

Ergebnisse

Die Soiling-Analyse wurde auf alle vier PV-Anlagen angewendet. Aufgrund der zum Zeitpunkt der Auswertung verfügbaren Datenreihen von weniger als einem Jahr sind die Ergebnisse als provisorisch zu betrachten. Für eine belastbare Soiling-Analyse mittels des entwickelten Algorithmus wäre mindestens ein vollständiges Betriebsjahr einschließlich einer Winterperiode erforderlich. Die berechneten Soiling Ratios liegen für alle vier Anlagen in einer Größenordnung von ca. 5–10 %.

Einschränkungen und Ausblick

- **Zu kurzer Beobachtungszeitraum:** Für eine belastbare Soiling-Analyse mittels des entwickelten Algorithmus ist mindestens ein vollständiges Betriebsjahr einschließlich einer Winterperiode erforderlich, was in Projektlaufzeit nicht gegeben war.
- **Strenge Filterung:** Die notwendigen Filterkriterien reduzieren die Anzahl verfügbarer Datenpunkte erheblich, insbesondere in den Wintermonaten.
- **Validierungsbedarf:** Eine Validierung der Ergebnisse mittels IV-Kennlinienmessungen vor Ort wäre wünschenswert, war jedoch im Projektrahmen nicht vorgesehen.
- **Überschätzung des Soiling Ratio:** Die bisherigen Ergebnisse könnten auf eine systematische Überschätzung des Soiling Ratio hindeuten, was auf die begrenzte Datenbasis und methodische Unsicherheiten zurückzuführen ist. Eine Validierung wäre für eine evtl. Verifizierung dieser Hypothese nötig.
- **Algorithmischer Anspruch:** Der entwickelte Algorithmus zielt auf die Detektion sowohl langsamer als auch schneller sowie homogener und inhomogener Verschmutzung ab und stellt damit einen methodischen Fortschritt gegenüber einfacheren Ansätzen dar.

Weitere methodische Verbesserungen zur Reduktion der Überschätzung und zur Erhöhung der Robustheit bei kurzen Zeitreihen sind als zukünftige Arbeiten identifiziert.

2.1.7 AP 7: Optimierung und Skalierung auf Großanlagen

In diesem AP sollten – ursprünglich in Zusammenarbeit mit Volta Solar und RWE, in der Aufstockungsphase aber allein vom ISE – die bisherigen Erfahrungen mit FPV ausgewertet und in Richtung Optimierung und Skalierung auf Großanlagen vorangetrieben. Langfristiges Ziel war die Realisierung von FPV-Anlagen im MW-Maßstab mit einem LCOE der FPV für Förderung als Konkurrenzmöglichkeit zu klassischer PV etablieren kann. Dazu sollten verschiedene Aspekte rundum den Bau, O&M, ... von FPV-Anlagen untersucht und optimiert werden.

Ergebnis / Meilenstein Nr.	Erzieltes Ergebnis	Erreicht am	Kommentar zur Einhaltung des Zeitplans
E1: Konzept zur Optimierung der Versuchsanlagen	erreicht	Herbst 2025	1.5 Jahre Verzug
E2: Entwicklung einer ausführlichen Risikobewertung	teilweise erreicht in Form zweier Leitfäden	Sommer 2025	1.5 Jahre Verzug
E3: Skalierung der Versuchsanlagen auf den MW-Maßstab	teilweise erreicht (mit Fokus auf Wirtschaftlichkeit)	Dezember 2025	1.5 Jahre Verzug

Drei Umstände bewirkten, dass in AP 7 Ergebnisse E1, E2 und E3 nur begrenzt im angedachten Umfang bearbeitet werden konnten:

1. Die Entwicklung einer ausführlichen Risikobewertung sollte in Absprache mit dem EPC im PV2Float-Projekt erfolgen. Häufige EPC-Wechsel und damit verbundene starke Verzögerungen beim Demonstratorbau ließen kaum Zeit für einen Austausch.
2. Die verzögerte Inbetriebnahme der Demonstratoren ließ kaum Erfahrungswerte bei der O&M zu und kaum Schlussfolgerungen für auf Großanlagen optimierte O&M-Maßnahmen.
3. FPV-Anlagen mit 30 kWp Nennleistung sind atypisch und bieten – auf *Systemebene* - keine Blanko-Blaupause für die Hochskalierung von Überlegungen/Ergebnissen auf den Megawatt-Maßstab. Dies betrifft die Logistik von Anlieferung, Lagerhaltung und Montage, die Dimensionierung der Verankerungslösung, die Kabelführung, die Größe und Verteilung der Wind- und Wellenlasten uvm. Davon ausgenommen sind natürlich die Ergebnisse auf *Modulebene* aus APs 4-5.

2.1.7.1 E1: Konzept zur Optimierung der Versuchsanlagen

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Überlegungen zur Optimierung bestehender FPV-Systeme und -abläufe zusammengefasst. Eine aktive Modulkühlung wird angesichts zusätzlicher Kosten, höherem Wartungsaufwand und dem großen Potenzial passiver Lösungen nicht erörtert.

Bereich	Ebene	Maßnahme	Beschreibung
Kabel (flex. AI)	Grundlegend	Standardisierte Kabelquerschnitte	Einheitliche Querschnitte für alle Stränge reduzieren

Bereich	Ebene	Maßnahme	Beschreibung
			Lagervielfalt und ermöglichen Mengenrabatte gegenüber Kupferkabeln.
Kabel (flex. AI)	Grundlegend	Vordimensionierte Kabelstränge	Strangkabel werden herstellerseitig auf Maß konfektioniert und mit Steckern geliefert; reduziert Fehlerquellen.
Kabel (flex. AI)	Weiterführend	Modulare Kabeltrassen auf dem Ponton	Integrierte Kabelkanäle direkt in die Ponton-Struktur integriert - separater Kabelschutz entfällt, schützt vor UV-Strahlung/Wasser
Kabel (flex. AI)	Weiterführend	Digitale Längenplanung per Building Information Model	3D-Modell des Schwimmsystems liefert exakte Kabellängen je Strang; verhindert Materialverschnitt und Nachbestellungen.
Logistik	Grundlegend	Just-in-Time-Anlieferung in Montagesets	Pontons, Befestigungen und Module werden als tagesgenauer Montage-Kit geliefert; minimiert Lagerfläche am Gewässer. Machbarkeit abhängig von Systemgröße.
Logistik	Grundlegend	Palettenrücklauf & Mehrwegverpackung	Standardisierte Tragrahmen als Mehrweg-Ladungsträger; Leergebinde kehren per Rücktransport zum Lieferanten zurück.
Logistik	Weiterführend	Digitales Materialverfolgungssystem (RFID)	RFID-Tags an Pontons und Modulen ermöglichen Echtzeit-

Bereich	Ebene	Maßnahme	Beschreibung
			Lagerstatus, automatisierte Entnahme-Quittierung und lückenlose Rückverfolgbarkeit.
Logistik	Weiterführend	Schwimmende Montageplattform als mobiles Lager	Ein am Ufer angekoppelter Arbeitsfloss dient gleichzeitig als Puffer-Lager für den Tagesbedarf; reduziert Kranvorgänge.
Aufbau-geschw.	Grundlegend	Klick-/Steck-Verbinder statt Schraubverbindungen	Schloss-ähnliche Schnellverbinder zwischen Ponton-Elementen ermöglichen werkzeugloses Einrasten; Montage bis zu 3× schneller als M12-Schrauben. Aber Beeinflussung der Steifigkeit/Stabilität der Unerkonstruktion muss numerisch erörtert werden.
Aufbau-geschw.	Grundlegend	Taktmontage nach Lean-Prinzip	Feste Montagestationen am Ufer mit definierten Arbeitspaketen (Ponton -> Schienen -> Modul -> Kabel) erhöhen Durchsatz und reduzieren Wartezeiten.
Aufbau-geschw.	Weiterführend	Halbautomatische Schwimmband-Montage	Förderband parallel zum Ufer zieht fertig montierte Ponton-Reihen auf das Wasser; eliminiert schwere Hebearbeiten und ermöglicht kontinuierlichen Fluss.

Bereich	Ebene	Maßnahme	Beschreibung
Aufbau- geschw.	Weiterführend	Drohnen-gestützte Qualitätskontrolle	UAV mit Wärme- und RGB-Kamera fliegt abgeschlossene Felder ab; automatische Erkennung falsch gesetzter Module oder offener Stecker.
Verankerung	Weiterführend	Adaptive Seillängen- Regelung (Gezeitenausgleich)	Motorisierte Windenmodule passen Seillänge automatisch an Pegelstand an; verhindert Überspannung bei Niedrigwasser und Durchhang bei Hochwasser.
Verankerung	Weiterführend	Simulationsgestützte Anker-Auslegung (FEM/CFD)	Strömungs- und Wellenlasten werden numerisch simuliert; Ankerpunkte und Seilgeometrie werden optimal dimensioniert statt überdimensioniert.
Reinigung	Grundlegend	Niederdruck-Reinigung mit Gewässerwasser	Pumpe entnimmt Standortwasser (ggf. Vorfilterung), setzt es als Spülmittel ein; kein Frischwasser-Transport notwendig.
Reinigung	Grundlegend	Rotationsbürsten- Reinigungsroboter (manuell geführt)	Handgeführtes Gerät mit weichen Bürsten und integrierter Wasserzufuhr
Ertrags- prognose	Grundlegend	Standortspezifische Albedo- und Reflexions- Korrekturen	Wasserflächen-Albedo (0,05–0,20) und diffuse Reflexionsanteile werden für Simulationen (PVsyst, ZENIT) kalibriergenaue eingepflegt.

Bereich	Ebene	Maßnahme	Beschreibung
Ertrags- prognose	Grundlegend	Temperatur-Daten aus Vor- Ort-Sensor statt Klimamodell	Schwimmende Mini- Wetterstation erfasst Modultemperatur, Windgeschwindigkeit und Luftfeuchte; Einspeisung in Simulations-Tool verbessert Prognose (wie in PV2Float auch passiert)
Ertrags- prognose	Weiterführend	Digitaler Zwilling mit Echtzeit-SCADA-Kopplung	Physikalisches FPV- Simulationsmodell wird kontinuierlich mit Messdaten gespeist; ML-Algorithmus lernt standortspezifische Abweichungen und korrigiert Prognosen (für PV2Float vorgesehen)
Ertrags- prognose	Weiterführend	Satellitenbasiertes Verschattungs-Monitoring	Zeitreihen aus Satellitendaten erkennen saisonale Vegetation, Algenwachstum oder Ufer-Beschattung; Prognosen werden dynamisch angepasst.
passive Kühlung	Grundlegend	Naturkonvektion durch optimiertes Unterlüftungs- Design	Erhöhter Abstand zwischen Modulunterkante und Wasserfläche (Neigungsoptimierung) fördert Konvektionsströmung; kein Energieeinsatz für Kühlung.

2.1.7.2 E2: Entwicklung einer ausführlichen Risikobewertung

Hier wurden vom ISE in zwei Parallel-Aktivitäten (Erstellung ISE-Leitfaden⁹ und IEA-Task-13-Bericht zu FPV¹⁰) eine partielle Risikobewertung abgegeben (ISE-FPV-Leitfaden) bzw. daran mitgewirkt (IEA Task 13). Der ISE-Leitfaden (Kapitel 3.3) fasst grob die wichtigsten sicherheitsrelevanten Aspekte von FPV-Anlagen zusammen, der IEA-Task-13-Bericht (Kapitel 4.3) identifiziert und wichtet nach Risikograd verschiedene Anlagen-Fehlermodi sowie relevante Lösungs- bzw. Vermeidungsstrategien.

2.1.7.3 E3: Skalierung der Versuchsanlagen auf den MW-Maßstab

Hier wurden der Blickwinkel auf die Hochskalierung in Richtung Wirtschaftlichkeit verschoben und im Rahmen einer Masterarbeit¹¹ die Fragestellung bearbeitet, welches die größten Kostentreiber für die Stromgestehungskosten (LCOE) von FPV sind und wie sie von der Anlagengröße abhängen. Die Beantwortung dieser Frage würde eine maximierte Senkung der LCOE durch gezielte Optimierung von Anlagenkomponenten/-routinen sowie Anlagengrößen ermöglichen.

Eine globale LCOE-Sensitivitätsanalyse mit Sobol'-Indizes (Sensitivität gemittelt über Wahrscheinlichkeitsverteilungen der LCOE-Eingangsvariablen) ergab, dass absteigend spezifische („pro kWp“) Erträge, spezifische Investitionskosten (CAPEX), Betriebsdauer und jährliche spezifische O&M-Kosten (OPEX) die größten LCOE-Kostentreiber sind. Eine lokale LCOE-Sensitivitätsanalyse (gradientenbasiert) zeigte, dass diese Reihenfolge nur unwesentlich davon abhängt, in welchem Regime von Eingangsgrößen man sich befindet. Spezifische Jahreserträge, Degradationsraten und Diskontierungssatz wurden als (in erster Näherung) nicht von der Anlagengröße abhängig betrachtet, wohingegen von Skaleneffekten bei CAPEX und OPEX auszugehen ist. In der Folge wurden bei der Untersuchung der Abhängigkeit der LCOE von der Anlagengröße nur CAPEX und OPEX betrachtet.

Insgesamt wurden in Fachliteratur und durch Internetrecherche für 56 FPV-Anlagen weltweit die Nennleistung, die damit verbundenen spezifischen CAPEX und andere Attribute wie Anlagentyp, Baujahr und geografische Koordinaten gesammelt. Die sehr heterogenen spezifischen CAPEX und OPEX wurde durch BIP-Deflator und geltende Wechselkurse nivelliert und vergleichbar gemacht sowie statistische Ausreißer gefiltert

Verschiedene plausible funktionale Formen für den Zusammenhang von spezifischen CAPEX (bzw. OPEX) und Anlagengröße wurden anhand folgender Kriterien postuliert: monoton abfallender Zusammenhang, nicht-negative CAPEX (bzw. OPEX) und nicht-negative Anlagengrößen. Dann wurde die entstandene Punktwolke gefittet und die Güte des Fits mit zwei Maßen bewertet: mit dem Bestimmtheitsmaß R^2 und dem Standardfehler der Regression.

⁹ Baltins, K., Ilgen, K., Götz, S., Graef, A., Heimsath, A., Röbner, J.-V., Wieland, S., Wirth, H. (2025): [Floating PV: Nachhaltige Energieerzeugung auf dem Wasser](#).

¹⁰ Selj, J., Wieland, S., Tsanakas, I. (2025): [Floating Photovoltaic Power Plants: A Review of Energy Yield, Reliability, and Maintenance](#). IEA PVPS Task 13, Report No. T13-31:2025.

¹¹ Jeske, Finn-Keno (2025): Skalierung von schwimmenden Photovoltaikanlagen (FPV) auf den MW-Maßstab: Analyse von Optimierungspotenzialen zur Reduzierung der Stromgestehungskosten und Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit. HAWK Göttingen, Fraunhofer ISE

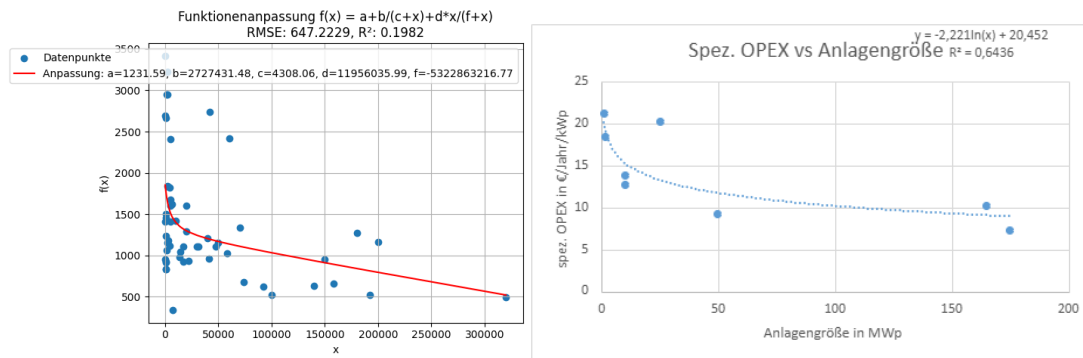


Abbildung 31: Links: CAPEX [$f(x)$] in €/kWp als Funktion von der Anlagengröße x (in kWp). Rechts: Anlagengrößenabhängiger OPEX.

Die vorläufigen Ergebnisse sind in Abbildung 31 dargestellt. In einem nächsten Schritt (Publikation in Vorbereitung) sollen die anlagengrößenabhängigen CAPEX und OPEX in den LCOE eingesetzt und dann für die besonderen FPV-Rahmenbedingungen in Deutschland (§36 WHG mit max. 15% bedeckter Seefläche und mind. 40m Uferabstand) erörtert werden, welche Anlagenkonfiguration für eine gegebene nutzbare Seefläche am wirtschaftlichsten ist¹².

¹² Wieland, S.: Local and global sensitivity analysis for levelized costs of electricity of photovoltaic installations (in Vorbereitung)

2.1.8 AP 8: Ertragsmodell, Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit

Insbesondere bei der Finanzierung neuartiger PV-Anwendungen, für die noch relativ wenige Betriebserfahrungen vorliegen, spielen möglichst genaue Ertragsprognosen eine bedeutende Rolle. Am Markt verfügbaren Simulationsprogrammen mangelt es bisher allerdings noch an FPV-spezifischen Anpassungen hinsichtlich verwendeter Modelle und Parameter. Darüber hinaus steht die Validierung der Ergebnisse entsprechender Simulationen mit Messungen noch aus. AP 8.1 widmet sich daher der Verbesserung von spezifischen FPV-Ertragsprognosen.

AP 8.2 nutzt verbesserte Modelle, um mittels Echtzeit-Simulation eine bessere Zustandsbewertung der FPV-Systeme und in Zusammenarbeit mit AP 8.3 eine wirtschaftlichere Betriebsführung zu ermöglichen.

Ergebnis / Meilenstein Nr.	Erzieltes Ergebnis	Erreicht am	Kommentar zur Einhaltung des Zeitplans
M3b: Quantifizierung Wasserkühleffekt sowie standort- und designabhängiger spezifischer Stromerträge	Kalibrierung des Ertragsmodells unter Berücksichtigung des lokalen Wasser-Mikroklimas	01.03.2026	Vollständig abgeschlossen mit initialen Zeitverzügen aufgrund von Messkampagne
M4: Validierte Ertragssimulationen für alle Versuchsanlagen verfügbar	Kalibrierung und Validierung des Ertragsmodells anhand von Messdaten	1.06.2026	Modellkette aufgebaut und für Zimmermann-Design demonstriert; Validierung über volles Betriebsjahr ausstehend aufgrund verspäteter Sensorik-Inbetriebnahme
E1: Digitale Zwillinge für Versuchsanlagen	Konzept und prototypische Umsetzung eines digitalen Zwillings	01.07.2025	Funktionsfähiger Prototyp der Simulationskette liegt vor; Integration in Mondas-Dashboard demonstriert
E2: Wirtschaftlichkeitsberechnungen für Beispielstandorte	LCOE-Bewertung verschiedener FPV-Designs	01.02.2026	Methodik entwickelt; belastbare Quantifizierung erfordert längere Datenreihen
E3 Bifazialer Mehrertrag abhängig von FPV-Unterkonstruktion berechnet	Entschlüsselung Mehrertrageffekte aufgrund von Lichtreflektionen auf Rückseiten	01.07.2025	Abgeschlossen aufgrund von simulativen und Literaturewerten, Ergebnisse im Zwilling implementiert

Das ISE erweitert in diesem Arbeitspaket seine Toolkette aus Licht-, thermischen und elektrischen Simulationen mit dem Ziel, FPV-spezifische Wärmetransfers, Strahlengänge und elektrische Leistung für jeden der vier bifazialen PV2Float-Demonstratoren akkurat zu simulieren, wobei auch Verschmutzung und Degradation der Module erfasst werden sollen. Die Bearbeitung von AP 8 war maßgeblich auf die Verfügbarkeit belastbarer Messdaten aus dem Anlagenmonitoring (AP 6) angewiesen. Aufgrund der verspäteten Inbetriebnahme der Sensorsysteme an den Demonstratorstandorten konnten statistisch repräsentative Datensätze nur eingeschränkt aufgenommen werden. Der Zeitraum, in dem alle vier Anlagen gleichzeitig liefen, beschränkte sich somit auf nur etwa 12 Wochen im Spätsommer/Herbst 2025. Für belastbare statistische Aussagen, insbesondere zum saisonalen Verhalten und zur Jahresertragsprognose, wäre mindestens ein volles Betriebsjahr mit vollständiger Sensorik erforderlich gewesen. Die Ergebnisse der nachfolgend dargestellten Analysen sind daher als vorläufig und indikativ zu bewerten. Sie zeigen dennoch klare Tendenzen und validieren die entwickelten Methoden.

2.1.8.1 AP 8.1: Verbesserung der FPV-Ertragsprognose

An jedem Demonstratorstandort werden die für die Ertragsmodellierung relevanten Größen kontinuierlich erfasst. Dazu gehören die Umgebungstemperatur auf mittlerer Modulhöhe und in 2 m Höhe, die Einstrahlung über Ost- und West-Referenzzellen in Modulebene sowie ein Pyranometer, die Windgeschwindigkeit und -richtung auf zwei Messhöhen, die Modultemperatur an der Ost- und Westseite sowie die AC-Leistung über einen Netzanalysator und ein Energiezähler.

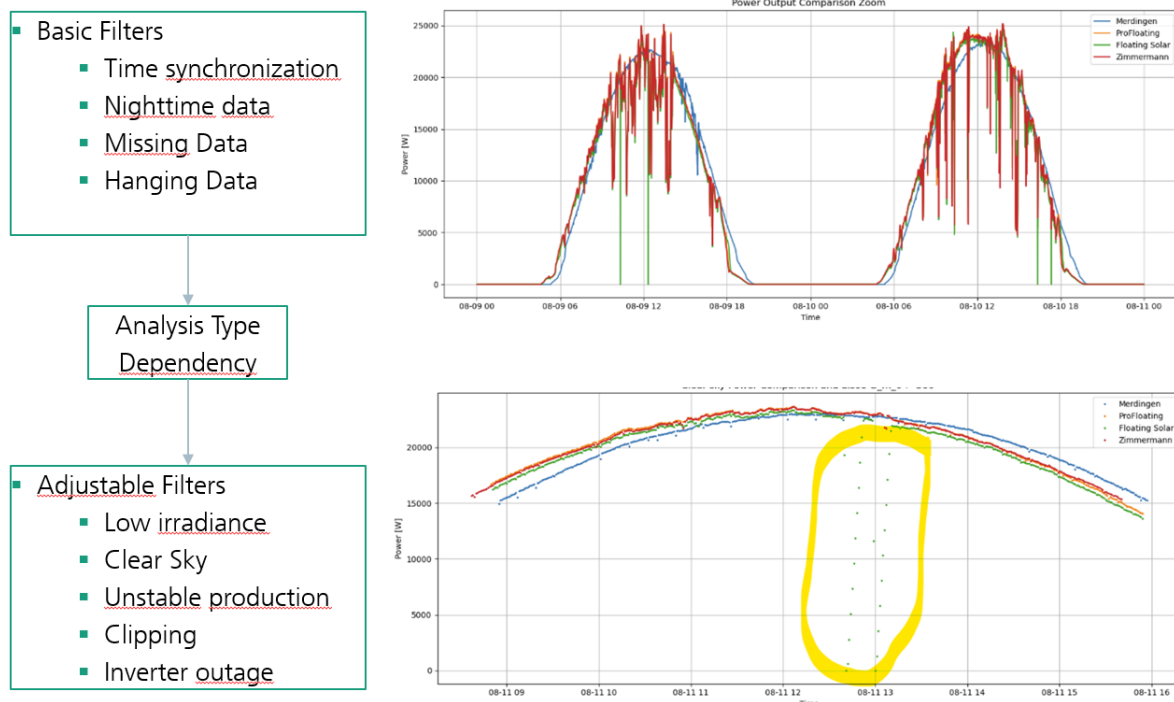


Abbildung 32: Schematische Darstellung der mehrstufigen Datenaufbereitungs- und Filterkette mit Unterscheidung zwischen Basis- und analyseabhängigen, justierbaren Filtern.

Zur Gewährleistung der Datenqualität wurde eine mehrstufige Aufbereitungs- und Filterkette implementiert (Abbildung 32: Die Basisfilter umfassen die Zeitsynchronisation aller Datenquellen, die Entfernung von Nachtdaten, die Erkennung und Behandlung fehlender Werte (Missing Data) sowie die Identifikation sogenannter „hängender“ Daten, bei denen ein Sensor trotz veränderlicher Umgebungsbedingungen konstante Werte liefert. Darüber hinaus kommen analyseabhängige, justierbare

Filter zum Einsatz: Schwellenwertfilter für niedrige Einstrahlung, Clear-Sky-Filter, Filter zur Erkennung instabiler Produktion sowie Algorithmen zur Detektion von Inverter-Clipping und Inverter-Ausfällen. Diese justierbare Architektur ermöglicht es, die Datenbasis je nach Analysezweck, etwa Temperaturcharakterisierung oder Performance-Ratio-Berechnung, optimal aufzubereiten.

Im Überlappungszeitraum aller drei schwimmenden Demonstratoren vom 06.08.2025 bis zum 01.11.2025 konnten erste vergleichende Analysen des thermischen Verhaltens und der Ertragsperformance durchgeführt werden. Die täglichen mittleren Modultemperaturen erwiesen sich über alle drei Systeme als sehr ähnlich. Relevante Unterschiede zeigten sich vorwiegend an den heißesten Tagen im August 2025, an denen die designspezifischen Wärmeabfuhereigenschaften stärker zum Tragen kamen. ProFloating war nahezu durchgängig das wärmste System, was auf die geringere Hinterlüftung der Module auf den flachen Pontons zurückzuführen sein dürfte. Zimmermann hingegen wies nahezu durchgängig die niedrigsten Modultemperaturen auf – ein Hinweis auf die bessere konvektive Kühlung durch die erhöhte, offenere Unterkonstruktion (Abbildung 33).

Diese thermischen Unterschiede schlagen sich direkt im spezifischen Ertrag nieder: Zimmermann erzielte in der Regel den höchsten täglichen spezifischen Ertrag, ProFloating lag im Mittelfeld und Floating Solar erzielte den niedrigsten spezifischen Ertrag. Diese Rangfolge korreliert mit dem thermischen Verhalten, da ein kühleres Modul aufgrund des negativen Temperaturkoeffizienten von $P_{\max}$ bei gleicher Einstrahlung mehr Leistung produziert. Der kurze Beobachtungszeitraum erlaubt jedoch noch keine abschließende Bewertung; die Ergebnisse sind als indikativ einzustufen.

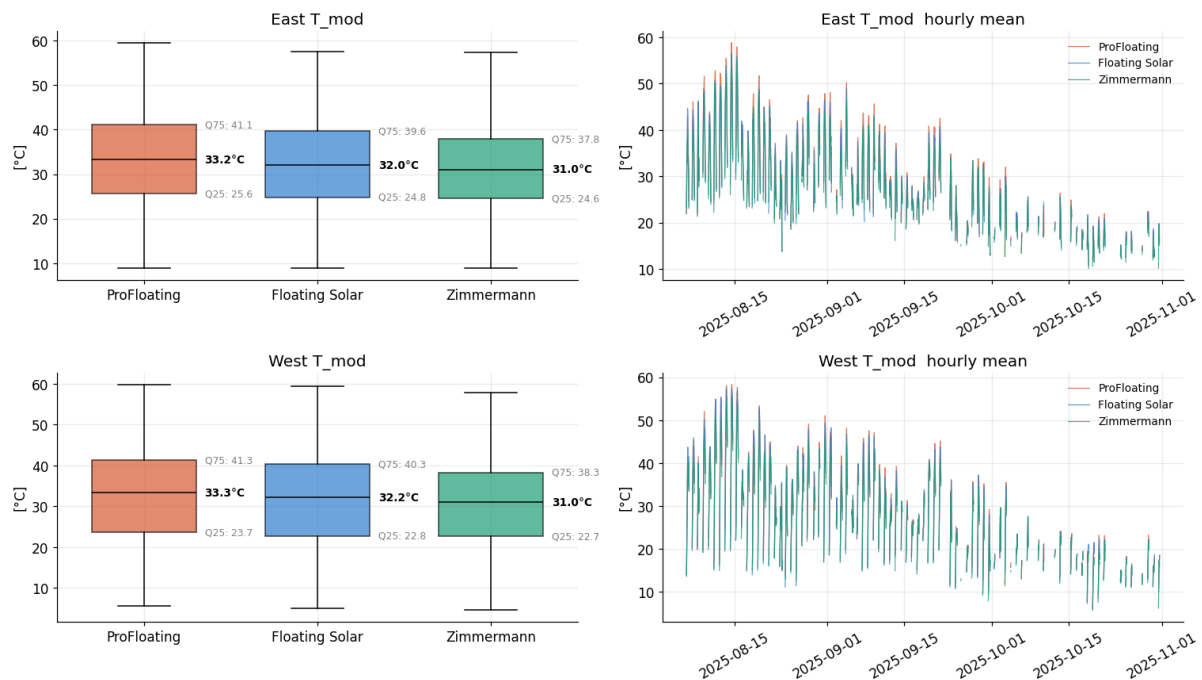


Abbildung 33: Tägliche mittlere Modultemperaturen für Ostmodule (oben) und Westmodule (unten) der drei schwimmenden Demonstratoren am Morkasee im Vergleichszeitraum 06.08.–01.11.2025. ProFloating (rot) zeigt durchgängig die höchsten Temperaturen bei mittlerem Ertrag, Zimmermann (blau) die niedrigsten Temperaturen bei höchstem Ertrag.

Die Berechnung einer belastbaren Performance Ratio (PR) war im PV2Float-Projekt nicht uneingeschränkt möglich. Der Grund liegt darin, dass alle Demonstratoren bifaziale Module verwenden, das Monitoring jedoch nur die frontseitige Einstrahlung in Modulebene erfasst. Der rückseitige Beitrag zur effektiven Einstrahlung – der bei bifazialen Modulen je nach Aufständerrhöhe und Albedo des Untergrunds

zwischen 5 und 15 Prozent der Vorderseitenbestrahlung ausmachen kann – fehlt in der Messung. Dies führt zu einer systematischen Unterschätzung der effektiven Einstrahlung und damit zu einer Überschätzung der PR. Die resultierenden PR-Werte von zum Teil deutlich über 100 Prozent bestätigen diese methodische Einschränkung. Die berechneten Werte können daher nur als relativer Vergleich zwischen den Systemen herangezogen werden – nicht jedoch als absolute Leistungskennzahl im Sinne einer IEC-konformen PR-Bewertung.

Da die Landreferenzanlage in Merdingen (Oberrheingraben, 48,0° N) und die schwimmenden Demonstratoren auf dem Morkasee (Lausitz, 51,4° N) an unterschiedlichen Standorten mit unterschiedlichem Klima betrieben werden, war ein direkter Vergleich der Messdaten ohne weitere Aufbereitung nicht zulässig. Um dennoch belastbare Aussagen zum FPV-Kühleffekt und zur relativen Performance der Systeme treffen zu können, wurde eine Methodik zur Datenharmonisierung entwickelt.

In einer ersten Methode (Methode 1, strenge zeitgleiche Übereinstimmung) werden ausschließlich Zeitstempel verwendet, an denen die meteorologischen Bedingungen – Einstrahlung, Umgebungstemperatur und Windgeschwindigkeit – an beiden Standorten innerhalb eng definierter Toleranzgrenzen übereinstimmen. Von den 125.193 verfügbaren Datensätzen je Standort erfüllten lediglich 10.880 Datenpunkte diese strengen Matching-Kriterien. Die Methode liefert die höchste Vergleichbarkeit, reduziert jedoch die Datenbasis erheblich.

Um die statistische Basis zu vergrößern, wurde eine zweite Methode (Methode 2, Nearest-Weather-Matching) entwickelt. Dabei wird für jeden Zeitstempel am Morkasee der meteorologisch nächstliegende Zeitstempel in Merdingen gesucht, wobei ein skaliertes Radius von maximal 1,0 und eine Mindesteinstrahlung von 200 W/m² als Kriterien dienen. Dieses Verfahren erhöhte die Anzahl vergleichbarer Datenpunkte auf 31.322 und ermöglicht damit robustere statistische Auswertungen bei nur geringfügig reduzierter Vergleichbarkeit der Wetterbedingungen.

Die Ergebnisse der harmonisierten Analyse zeigen ein konsistentes Bild (Abbildung 34). Alle FPV-Systeme am Morkasee laufen unter vergleichbaren Wetterbedingungen im Mittel auf einem ähnlichen Temperaturniveau wie die Landreferenz in Merdingen – teilweise sogar leicht wärmer. Ein deutlicher FPV-spezifischer Kühleffekt gegenüber der Landanlage war im kurzen Beobachtungszeitraum, der überwiegend den Spätsommer und Herbst abdeckt, noch nicht eindeutig nachweisbar. Dies war zu erwarten, da der theoretische Kühlvorteil durch Wasserverdunstung insbesondere bei hohen Einstrahlungs- und Temperaturniveaus im Hochsommer zum Tragen kommt, wofür kaum Daten vorliegen. Besonders bemerkenswert ist, dass beide Zimmermann-Designs – das schwimmende System am Morkasee und die Landreferenz in Merdingen – ein nahezu identisches thermisches Verhalten aufweisen. Dies bestätigt einerseits die Vergleichbarkeit der baugleichen Systeme und andererseits die Validität der entwickelten Harmonisierungsmethodik.

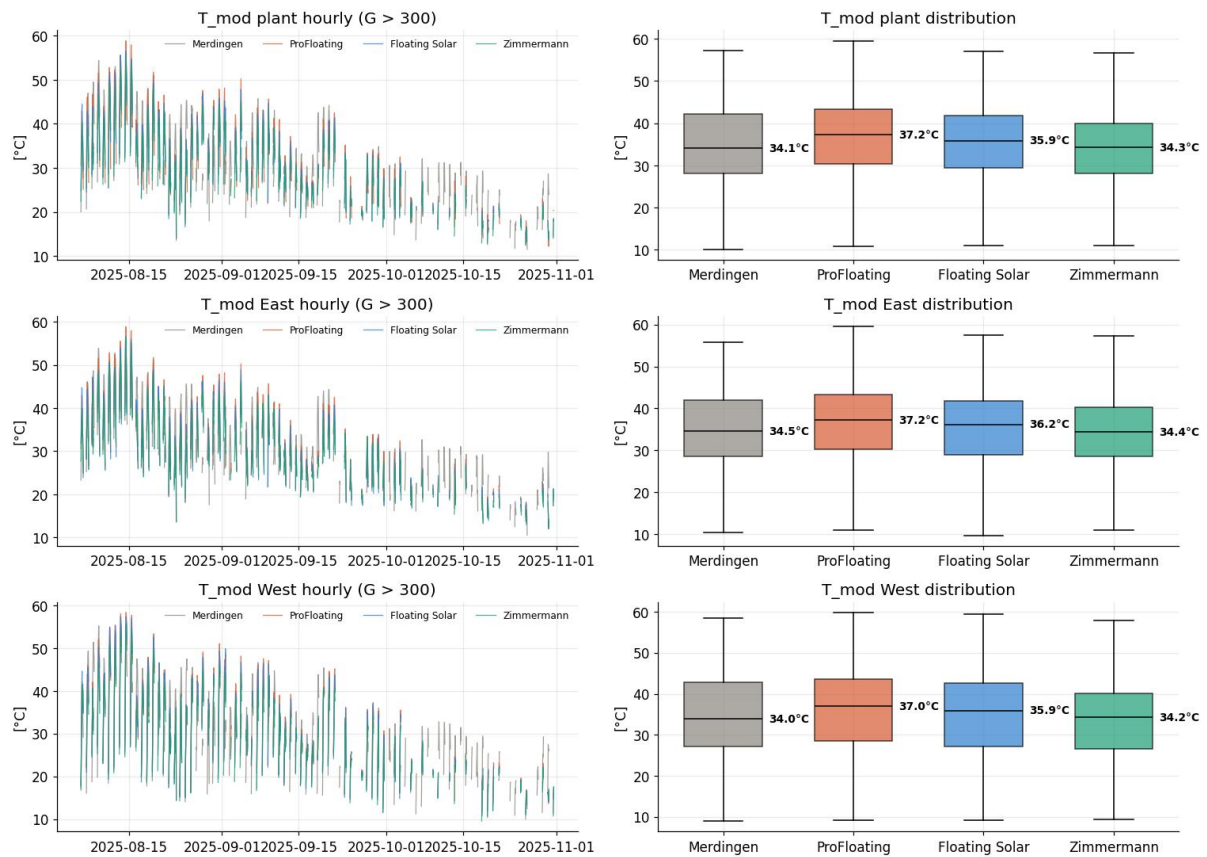


Abbildung 34: Modultemperaturdifferenz ($\Delta T_{mod} = T_{System} - T_{Merdingen}$) der drei Morkasee-Systeme gegenüber der Landreferenz in Merdingen unter harmonisierten Wetterbedingungen. Beide Zimmermann-Designs (Merdingen und Morkasee) zeigen nahezu identisches thermisches Verhalten, was die Validität der Harmonisierungsmethodik bestätigt.

Hinsichtlich der Leistung unter harmonisierten Bedingungen (Abbildung 35) ergibt sich ein klares Ranking: Zimmermann (Morkasee) und ProFloating erzielen eine Performance auf dem Niveau von oder leicht über der Merdinger Referenz, während Floating Solar unterhalb der Landreferenz liegt. Dieses Ergebnis ist konsistent über beide Harmonisierungsmethoden und korrespondiert mit den beobachteten thermischen Unterschieden.

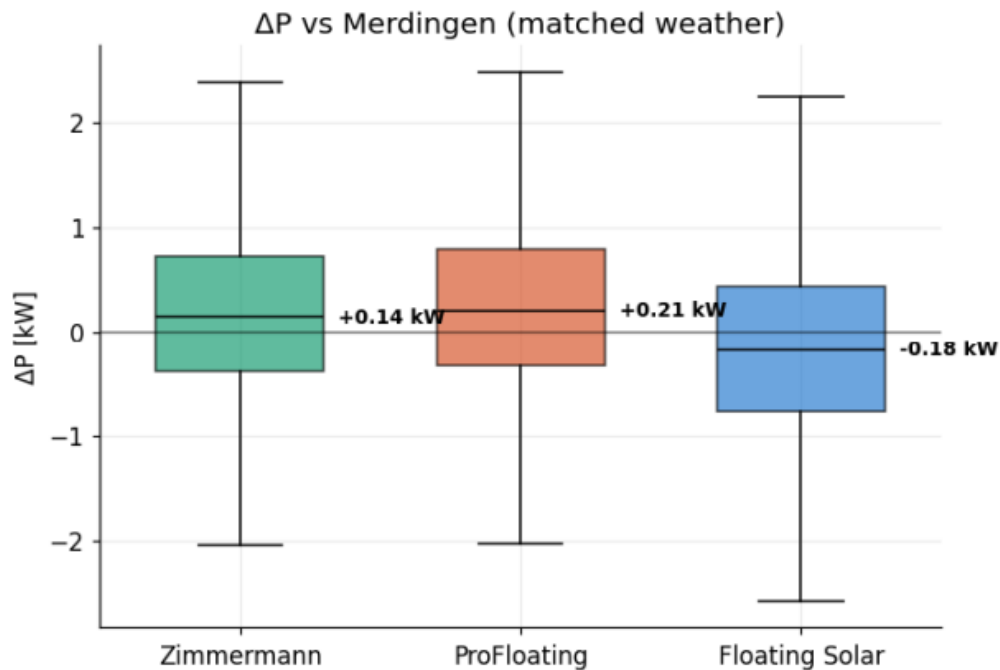


Abbildung 35: Leistungsvergleich der Demonstratoren unter harmonisierten Wetterbedingungen (Methode 2). Zimmermann und ProFloating erzielen eine Performance auf dem Niveau der Landreferenz Merdingen oder leicht darüber; Floating Solar liegt unterhalb der Landreferenz.

2.1.8.2 AP 8.2: Thermische Modellierung und Digitaler Zwilling

Zur physikalisch fundierten Charakterisierung des thermischen Verhaltens der Demonstratoren wurde das Faiman-Modell angewandt. Dieses beschreibt die Modultemperatur als Funktion der Einstrahlung G , der Umgebungstemperatur T_{amb} und der Windgeschwindigkeit v_{wind} über die Beziehung $T_{\text{mod}} = T_{\text{amb}} + G / (U_0 + U_1 \cdot v_{\text{wind}})$. Der Parameter U_0 repräsentiert dabei den kombinierten Wärmeverlustkoeffizienten in $\text{W}/(\text{°C} \cdot \text{m}^2)$, während U_1 den windabhängigen Anteil in $\text{W} \cdot \text{s}/(\text{°C} \cdot \text{m}^3)$ erfasst. Höhere U -Werte bedeuten eine bessere Wärmeabfuhr und damit niedrigere Modultemperaturen bei gegebener Einstrahlung.

Erste Anpassungen der U -Werte an die Messdaten der vier Demonstratoren ergaben plausible Ergebnisse (Tabelle 4), die in der Größenordnung der in der Literatur publizierten Werte¹³ für FPV-Systeme liegen. Die Koeffizienten spiegeln die aus dem Systemvergleich bekannte Rangfolge wider: Zimmermann zeigt die höchsten U -Werte (beste Kühlung), Floating Solar mittlere und ProFloating die niedrigsten Werte. Eine abschließende Kalibrierung und Validierung steht jedoch noch aus. Insbesondere muss der Einfluss der Windrichtung auf die konvektive Kühlung berücksichtigt werden, da die verschiedenen Unterkonstruktionsdesigns je nach Anströmrichtung unterschiedlich stark von der Windkühlung profitieren. Darüber hinaus erfordert eine belastbare Parameterisierung einen längeren Beobachtungszeitraum mit größerer saisonaler Variabilität sowie die Integration rückseitiger Einstrahlungsmessungen für eine vollständige Energiebilanz.

¹³ Dörenkämper, M., Wahed, A., Kumar, A., de Jong, M., Kroon, J., Reindl, T. (2021): The cooling effect of floating PV in two different climate zones: A comparison of field test data from the Netherlands and Singapore, Solar Energy, Volume 219

Tabelle 4: Aus Messdaten abgeleitete Faiman-Koeffizienten U_0 und U_1 der vier Demonstratoren. Die Werte liegen in plausiblen Größenordnungen im Vergleich zu Literaturwerten (Dörenkämper et al., 2021). Zimmermann zeigt die höchsten Wärmeabfuhrkoeffizienten.

System	Orientation	U_0 [W/m ² K]	U_1 [W/m ² K/(m/s)]
Merdingen	East	25.43	4.82
Merdingen	West	28.06	4.01
ProFloating	East	24.14	2.08
ProFloating	West	24.68	2.13
Floating Solar	East	26.48	2.00
Floating Solar	West	25.40	2.51
Zimmermann	East	25.48	3.66
Zimmermann	West	27.52	3.91

Im Rahmen von AP 8.2 wurde der konzeptionelle und technische Grundstein für einen digitalen Zwilling der PV2Float-Demonstratoren gelegt. Das übergeordnete Ziel besteht darin, durch den permanenten Vergleich zwischen simulierter und gemessener Anlagenperformance eine kontinuierliche Zustandsbewertung zu ermöglichen und damit den Weg zu einer prediktiven Betriebsführung zu ebnen. Die Architektur des digitalen Zwillings umfasst drei Hauptkomponenten, die in einer durchgängigen Simulationskette miteinander verknüpft sind.

Die erste Komponente bildet eine hochdetaillierte Lichtmodellierung auf Basis von Ray Tracing (Abbildung 36). Hierfür wurde ein vollständiges 3D-Modell des Zimmermann-Demonstrators erstellt, das sämtliche geometrischen Komponenten – Modulreihen, Wechselrichter, Unterkonstruktion und Horizontlinie – originalgetreu abbildet. Mittels Ray-Tracing-Algorithmen wird die auf jede einzelne Solarzelle auftreffende Einstrahlung berechnet, sowohl auf der Vorder- als auch auf der Rückseite der bifazialen Module. Der Detailgrad der Simulation ist dabei so hoch, dass er dem Anbringen eines virtuellen Sensors auf jeder einzelnen Zelle entspricht. Dadurch werden Effekte wie Reihen-Eigenverschattung, Reflexionen an der Wasseroberfläche und Horizont-Abschattungen akkurat erfasst – Effekte, die in konventionellen Ertragssimulationen üblicherweise nur pauschal über Korrekturfaktoren berücksichtigt werden.

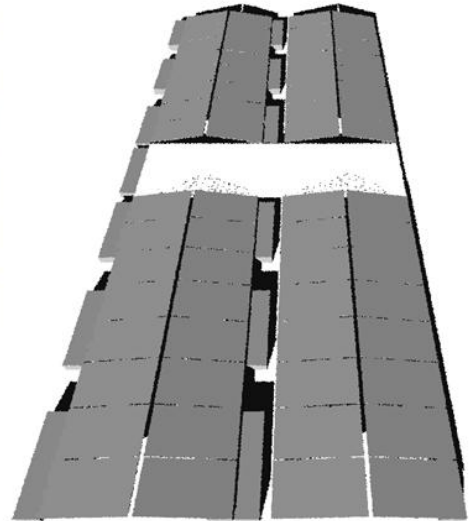


Abbildung 36: Hochdetailliertes 3D-Modell des Zimmermann-Demonstrators für die Ray-Tracing-Lichtsimation. Sämtliche geometrische Elemente (Modulreihen, Wechselrichter, Unterkonstruktion, Horizont) sind abgebildet. Die Einstrahlung wird zellenaufgelöst berechnet – vergleichbar mit einem virtuellen Sensor auf jeder einzelnen Solarzelle.

Die zweite Komponente ist die thermische Simulation auf Basis des Faïman-Modells mit den aus den Messdaten kalibrierten U_0/U_1 -Werten. Aus der berechneten Einstrahlung und den meteorologischen Randbedingungen (Umgebungstemperatur, Windgeschwindigkeit) wird die Modultemperatur vorhergesagt und damit der temperaturabhängige Ertrag bestimmt. Die dritte Komponente bildet die elektrische Ertragssimulation mittels Kopplung mit dem am ISE entwickelten Simulationswerkzeug ZENIT, das auf Basis der zellenaufgelösten Einstrahlung und Temperatur die String-Leistung und den Gesamtertrag berechnet.

Das Modell lässt sich mit Wetterprognosedaten in 15-Minuten-Auflösung speisen und reagiert dynamisch auf Wetteränderungen. Die Simulationsergebnisse werden den realen Messwerten, insbesondere den DC-Stringleistungen und der AC-Gesamtleistung, auf dem Mondas-Dashboard gegenübergestellt. Durch den systematischen Vergleich berechneter und gemessener Werte werden perspektivisch Fehlerdetektion, die Identifikation von Leistungsverlusten (PLR) sowie die dynamische Anpassung von Modellparametern an veränderte Anlagenzustände wie Degradation oder Verschmutzung möglich.

Zum Projektende liegt ein funktionsfähiger Prototyp der Simulationskette vor, der für den Zimmermann-Demonstrator die Kopplung aller drei Modellkomponenten demonstriert (Abbildung 37). Das System ist in der Lage, aus aktuellen Wetterdaten zellenaufgelöste Einstrahlungsverteilungen, Modultemperaturen und String-Leistungen vorherzusagen und diese mit den gemessenen Werten abzugleichen. Eine vollständige Validierung über ein volles Betriebsjahr, einschließlich saisonaler Extremwerte im Hochsommer und Winter, steht aufgrund der eingeschränkten Datenverfügbarkeit noch aus.

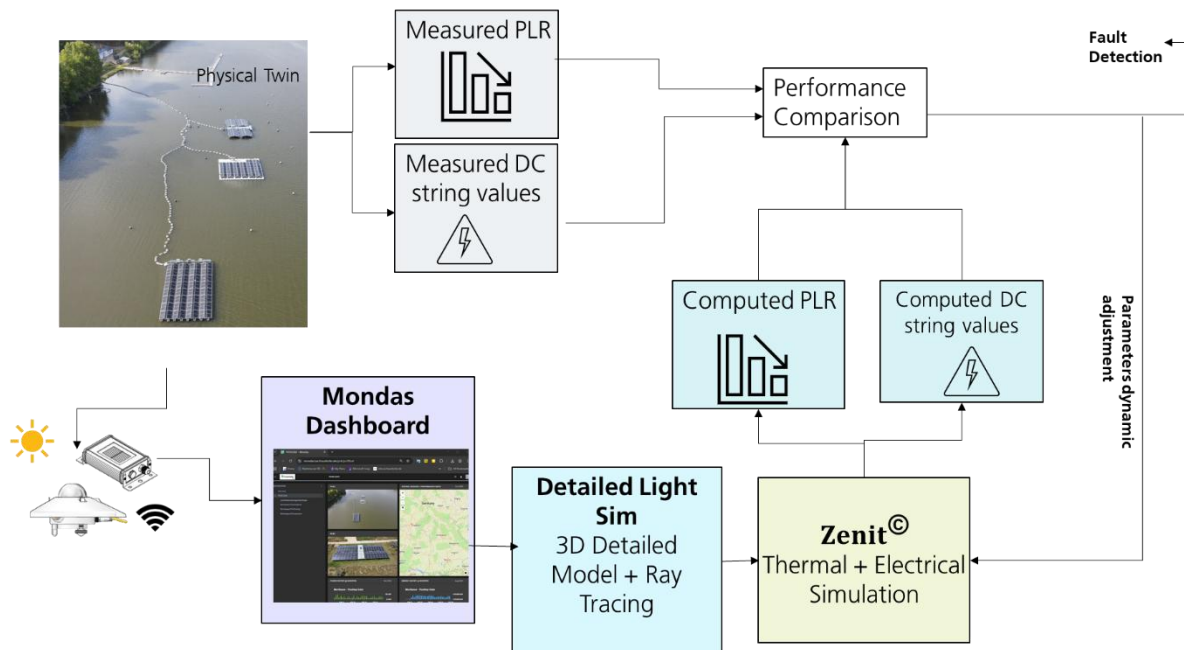


Abbildung 37: Architektur des digitalen Zwillings. Die Simulationskette verbindet ein detailliertes Ray-Tracing-Lichtmodell mit dem thermischen Faïman-Modell und der elektrischen Ertragssimulation (Zenit). Berechnete Werte werden auf dem Mondas-Dashboard mit Messdaten verglichen und ermöglichen Parameteranpassung, Fehlerdetektion und die Bestimmung von Leistungsverlusten.

Die im Rahmen von AP 8 erzielten Ergebnisse lassen sich trotz der eingeschränkten Datenverfügbarkeit als methodisch fundiert und inhaltlich richtungsweisend einordnen. Im Bereich des thermischen und energetischen Systemvergleichs (AP 8.1) konnte gezeigt werden, dass die täglichen mittleren Modultemperaturen über alle drei schwimmenden Systeme sehr ähnlich sind, sich Unterschiede jedoch vorwiegend an den heißesten Tagen manifestieren. Das konsistente Ranking, Zimmermann als kühlestes und ertragreichstes, Floating Solar als wärmstes und ertragsschwächstes System, bestätigt den erwarteten Zusammenhang zwischen thermischem Design und elektrischer Performance. Die entwickelten Harmonisierungsmethoden ermöglichen erstmals einen fairen Vergleich zwischen den räumlich getrennten Standorten Mortkasee und Mering und zeigen ein konsistentes Ergebnis: Zimmermann und ProFloating erreichen oder übertreffen die Performance der Landreferenz, während Floating Solar unterhalb liegt.

Im Bereich der thermischen Modellierung und des digitalen Zwillings (AP 8.2) wurden alle geplanten Modellkomponenten, hochdetailliertes Ray-Tracing-Lichtmodell, Faïman-Temperaturmodell und Zenit-Ertragssimulation, erfolgreich aufgebaut und zu einer durchgängigen Simulationskette verknüpft. Die ersten Faïman-Fits liegen in plausibler Übereinstimmung mit der Literatur und spiegeln die beobachteten designspezifischen Unterschiede wider. Der digitale Zwillings demonstriert das Potenzial für zellenaufgelöste Ertragsprognosen, Fehlerdetektion und prädictive Wartung.

Aufgrund des kurzen Überlappungszeitraums von nur etwa 12 Wochen für alle vier Systeme, des Fehlens von Hochsommerdaten und der fehlenden rückseitigen Einstrahlungsmessung sind alle quantitativen Ergebnisse als vorläufig zu bewerten. Kleine Unterschiede zwischen den Systemen sollten nicht überinterpretiert werden. Die zentrale Limitation bleibt die verspätete Inbetriebnahme der Sensorsysteme und die daraus resultierende unzureichende Datenbasis für eine vollständige Modellvalidierung.

Gleichwohl wurden die methodischen Grundlagen, Datenharmonisierung, thermische Modellierung, digitaler Zwillings, erfolgreich entwickelt und prototypisch validiert. Die gewonnenen Erkenntnisse und

Werkzeuge bilden eine solide Basis für weiterführende Arbeiten im europäisch geförderten Nachfolgeprojekt SuRE, in dem sowohl die Faïman-Koeffizienten unter Einbeziehung der Windrichtung weiter verfeinert als auch der digitale Zwilling mit einem vollständigen Jahresgang an Messdaten validiert werden sollen.

2.1.8.3 AP 8.3 Wirtschaftlichkeitsanalyse

In diesem AP sollten zunächst vergleichende Analysen der „Levelized Cost of Energy“ (LCOE) für verschiedene beispielhafte Standorte durchgeführt werden. Darüber hinaus sollten Ansätze zu betriebswirtschaftlich optimierten Betriebsführungskosten untersucht werden. Diese sollen Informationen zur Verschmutzung aus dem Monitoring und die Informationen des digitalen Zwillings nutzen und möglichst Wechselwirkungen zwischen Betriebsführungsaufwand und langfristiger Entwicklung der Performance Ratio der Anlagen berücksichtigen.

Für die Studie wurden 2022 drei verschieden große kommerzielle FPV-Kraftwerke in Deutschland ausgewählt und anonymisiert verglichen: eines mit einer Nennleistung kleiner als 1 MWp, eines zwischen 1 MWp und 5 MWp groß, und eines größer als 5 MWp. Die für die Analyse benötigten Eingabewerte von in Interviews mit den Kraftwerksbetreibern erfragt. Folgende FPV-spezifischen Eingabeparameter wurden verwendet:

Kostenrechnung InPV-Systeme	klein	mittel	groß
Kapazität (MWp)	<1 MWp	1MWp<?<5MWp	>5MWp
Allgemeine Parameter			
Volllaststunden (h/a)	1050	1050	1000
Spezifischer Stromertrag		1.028 kWh/kWp	
Self Consumption Rate	66%	20%	?
Investitionskosten (€/kWp)			
PV Module	244	177	269
Wechselrichter	58	221	19
Unterkonstruktion	430	309	209
Elektrik	-	-	108
Projektierung	99	31	44
Flächenvorbereitung und Installation	212	-	182
Umzäunung	-	-	-
Netzanschluss	115	96	47
Sonstige Kosten	38	38	27
Total	1195	872	905
Operative Kosten (€/MWh/a)			
Landpacht		1.0	-
Flächenpflege		-	-
Überwachung		-	-
Monitoring		5.0	-
Kaufmännische Betriebsführung		0.7	6.2
Rückstellungen Austausch Wechselrichter		-	0.7
Reparaturen		-	-
Sonstiges		3.0	10.0
Total	9.45	9.7	16.9

Die des kleinsten Kraftwerks – nicht im Interview genannt – wurde über lineare Extrapolation bestimmt. Alle weiteren Eingabeparameter stimmten für alle drei Kraftwerke überein:

Input Parameters	Unit	Values
Selling Price	€/kWh	0.0305
Retail Price	€/kWh	0.0176
Degradation (1st Year)	%	0.00%
Degradation (2-25 Years)	%	0.55%
1st Year Availability	%	99%
Availability for the other Years	%	99.5%
Lifetime	years	25
WACC (Discount Rate)	%	3.7%
Residual Value	€	0.0%

Mit der Formel

$$LCOE_{nom} = \frac{\left(CAPEX_{PV, total} + \sum \left[\frac{OPEX(t)}{(1+WACC_{nom})^t} \right] - \frac{ResValue}{(1+WACC_{nom})^N} \right)}{\sum \left[\frac{Yield(0)(1-Degradation)^t(Availability)}{(1+WACC_{nom})^t} \right]} \quad \left[\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right]$$

wurden dann die LCOE berechnet:

System Name	System Capacity (MWp)	LCOE Without Self Consumption (€/kWp)	Self Consumption Ratio	LCOE With Self Consumption (€/kWp)
klein	<1MWp	0.0852	66%	0.2164
mittel	1MWp<?<5MWp	0.0652	20%	0.0771
groß	>5MWp	0.0777	? (Assumed as 0%)	0.0777

Der LCOE-Vergleich dreier deutscher FPV-Kraftwerke im Projekt brachte keine systematischen Erkenntnisse, schaffte aber die Datengrundlage für die – aus einem wirtschaftlichen Blickwinkel in AP 7 erfolgten – Hochskalierung von Kennzahlen für Megawatt-Kraftwerke. Darüber hinaus wurde die Methodik zur Berechnung der LCOE-Berechnung in einer Publikation zu FPV-Evaluierung in Chile verwendet¹⁴ (Abbildung 38). Schließlich wurden Betrachtungen zur Fortpflanzung von Unschärfen in den LCOE-Eingabegrößen weiterverfolgt und mündeten in einer Publikation¹⁵.

Die Wirtschaftlichkeitsanalyse im engeren Sinne (d.h. für die PV2Float-Demonstratoren) konnte aufgrund des begrenzten Beobachtungszeitraums und der damit eingeschränkten Belastbarkeit der Ertragsdaten nur in vorläufiger Form durchgeführt werden. Für eine aussagekräftige Berechnung der Stromgestehungskosten (LCOE) verschiedener FPV-Designs wären mindestens ein vollständiges Betriebsjahr mit validierten Ertragsdaten sowie belastbare Informationen zu Degradationsraten und Wartungskosten erforderlich. Beide Voraussetzungen konnten innerhalb der Projektlaufzeit nicht vollständig geschaffen werden. Die aus dem Demonstratorbetrieb gewonnenen Erkenntnisse zu designspezifischen Ertragsunterschieden, Verschmutzungsverlusten und O&M-Anforderungen fließen jedoch in die laufende Weiterentwicklung von LCOE-Modellen für FPV ein und bilden eine wertvolle empirische Grundlage für

¹⁴ Jung, D., Schöneberger, F., Moraga, F., Ilgen, K., Wieland, S. (2023): [Floating PV in Chile: Potential for Clean Energy Generation and Water Protection](#). Sustainable Energy Technologies and Assessments 63, 103647. DOI 10.1016/j.seta.2024.103647

¹⁵ Wieland, S., Gürsal, U. (2026): [Uncertainty propagation in financial models of photovoltaic systems](#). Sci Rep 16, 5004. DOI 10.1038/s41598-026-38053-1

zukünftige techno-ökonomische Bewertungen im Rahmen des europäisch geförderten Nachfolgeprojekts SuRE.

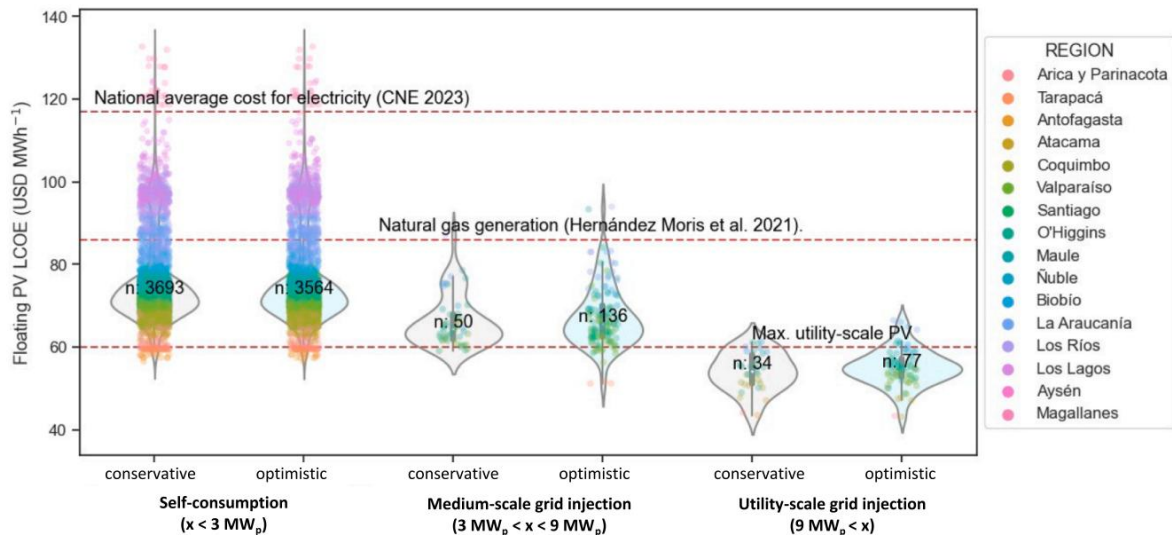


Abbildung 38: FPV-LCOEs für 2 Szenarien, differenziert nach chilenischen Regionen¹⁴.

2.1.8.4 Nachhaltigkeit, Rückbau, Recycling

Diese Zusammenfassung gibt einen Überblick über eine detaillierte Lebenszyklusanalyse (LCA), die für drei verschiedene schwimmende FPV-Unterkonstruktionen im Rahmen des PV2Float-Projekts durchgeführt wurde. Diese anonymisierten FPV-Systeme, die im Pilotmaßstab konzipiert sind, dienen als Prototypen zur Bewertung der Umweltbelastungen über ihren gesamten Lebenszyklus, von der Materialgewinnung und Herstellung bis zum Betrieb, wobei die End-of-Life-Phasen ausgeschlossen sind.

Während Studien im Pilotmaßstab wertvolle Einblicke bieten, ist es wichtig zu erkennen, dass die Übertragung dieser Ergebnisse auf größere, kommerzielle Systeme zusätzliche Komplexitäten wie bei der Konfiguration oder Energieerzeugung mit sich bringt. Die Ergebnisse von LCA-Studien variieren oft, wenn man von kleineren zu großflächigen Installationen übergeht.

Großflächige schwimmende PV-Installationen sowie Vergleichsstudien zwischen schwimmenden und bodengebundenen PV-Systemen werden derzeit untersucht. Diese Themen werden in zukünftigen Veröffentlichungen behandelt, die die hier vorgestellte umfassende Arbeit fortsetzen.

In der im Rahmen des PV2Float-Projekts durchgeführten LCA-Studie wurden nach sorgfältiger Durchsicht der Literatur und Identifizierung von Forschungslücken zwei Forschungsfragen hervorgehoben:

Primäre Forschungsfrage: Wie wirken sich verschiedene schwimmende Designs auf unterschiedliche Umweltwirkungskategorien im Rahmen einer vergleichenden LCA aus, mit besonderem Schwerpunkt auf die Unterschiede bei den Montagestrukturen?

Sekundäre Forschungsfrage: Wie sieht der Vergleich der Umweltbilanz von Materialien aus, die in verschiedenen schwimmenden PV-Technologien über jede Lebenszyklusphase hinweg verwendet werden, insbesondere unter Berücksichtigung von Schwimmer-/Fundament-, Unterbau- und Anker-/Vertäuungssystemkomponenten?

Die Eigenschaften der drei schwimmenden Lösungen sind in Tabelle 1 detailliert aufgeführt:

FPV-Demonstrator	Pontoon-Lösung	Stahl-Lösung	Folien-Lösung
Ort	Mortkasssee, Deutschland		
GHI-Einstrahlung (kWh/m ² /Jahr)	1200		
Hauptmaterial der Unterkonstruktion	HDPE	Stahl, HDPE	HDPE, PVC
Modultechnologie	540 Wp Bifacial Dual Glass Monocrystalline Module 540 W	540 Wp Bifacial Dual Glass Monocrystalline Module 540 W	540 Wp Bifacial Dual Glass Monocrystalline Module 540 W
Moduleffizienz	21.5%	21.5%	21.5%
Betriebsdauer	30 Jahre	30 Jahre	30 Jahre
Wechselrichter	SMA Sunny Tripower 25000TL	SMA Sunny Tripower 25000TL	SMA Sunny Tripower 25000TL
Wechselrichter- Lebensdauer	10 Jahre	10 Jahre	10 Jahre
Degradationsrate der Module	0.045	0.045	0.045
Performance Ratio	89%	89%	89%

Die Studie wird im Einklang mit den Prinzipien der ISO-14044-Lebenszyklusanalyse durchgeführt, um eine umfassende und standardisierte Bewertung der Umweltleistung der FPV-Systeme zu gewährleisten.

Primäre Datenquellen (bevorzugt): Das sind produktspezifische Daten aus direkten Messungen und standortspezifischen Informationen. Das Erheben primärer Daten ist zeitaufwendig und kostspielig.

Sekundäre Datenquellen: Das sind generische Daten aus veröffentlichter Literatur und Datenbanken. Die Verwendung sowohl primärer als auch sekundärer Datenquellen innerhalb der Studie ist in der folgenden Tabelle aufgeführt.

Primärquellen	Sekundärquellen
Stückliste (BoS) der Unterkonstruktion (Gewicht, Typ, Zusammensetzung)	Länderspez. Energiemix (Ecoinvent 3.8)
Zuliefererdaten für Rohmaterialien und Lieferwege	PV-Module, Wechselrichter, Stücklisteninventar

Eigenverbrauch

Transportmodus und -kapazität (Ecoinvent 3.8, Literatur)

Die Software SimaPro wird für die LCA-Ergebnisse. Als Berechnungsmethodik wird EF3.0 (angepasst) ausgewählt, da dies der PEF-konforme und von der Europäischen Kommission für die Quantifizierung der Umweltleistung empfohlene methodische Ansatz ist. Fokussierte Wirkungskategorien werden in Bezug auf die Anwendbarkeit der Ergebnisse ausgewählt.

Der Nennleistung wird mit 45 kWp für alle drei Demonstratoren gewählt, entsprechend der Größe der Anlagen im frühen Planungsstadium des Projekts. Die Funktionale Einheit (F.E.) wird auf 1 kWh Stromproduktion für die ausgewählten Umweltwirkungskategorien festgelegt. Da es sich um eine Vergleichsstudie handelt, wird die Verwendung der Energieproduktion in Wh als beste Option betrachtet (IEA PVPS, 2020¹⁶).

Die in der Studie betrachteten Systemgrenzen sind wie folgt aufgeführt:

- **Produktphase (A1-A3) (Phase 1):** Rohstoff- und Energieversorgung, Herstellung der Module, Herstellung des Montagesystems, Herstellung der Verkabelung, Herstellung der Wechselrichter, Herstellung aller weiteren Komponenten, die benötigt werden, um Strom zu erzeugen und ins Netz einzuspeisen (z. B. Transformatoren für PV-Anlagen im Versorgungsmaßstab)
- **Bauphase (A4-A5) (Phase 2):** Transporte zur PV-Anlagen-Standort, Bau und Installation der Systeme vor Ort
- **Nutzungsphase (B1-B7) (Phase 3):** Eigenbedarf, Reinigung der Module und Austausch der Wechselrichter. Außerdem sind die Datenquellen für jede Komponente der Systemgrenze in Abbildung 39 dargestellt.

In der **Phase der Rohstoffversorgung (A1)** wurden Materiallisten von Partnern zusammen mit Referenzanlagen verwendet, um die Daten für die Bewertung zu standardisieren, skaliert auf die Funktionseinheit von 1 kWh. In der **Phase des Rohstofftransports (A2)** wurden spezifische Transportmethoden und Distanzen mit standortspezifischen Daten und Worst-Case-Annahmen für fehlende Daten berechnet, wobei Nachhaltigkeitsprinzipien wie die Nutzung von Lastwagen für kürzere Strecken und Flugzeuge für längere Strecken berücksichtigt wurden. In der **Herstellungsphase (A3)** wurden die Umweltauswirkungen der Umform- und Montageprozesse aus der Ecoinvent-Datenbank übernommen. Die **Phase des Transports zum Standort (A4)** konzentrierte sich auf die Logistik zur Lieferung der Komponenten zur Baustelle mit Euro-6-Lkw, wobei die genauen Distanzen für verschiedene Materialien berechnet wurden. Während der **Bau-/Installationsphase (A5)** wurden Prozesse für jedes schwimmende PV-System detailliert beschrieben, aber der Kraftstoff- und Stromverbrauch wurde als vernachlässigbar angesehen, abgesehen von der Folien-Lösung. Die **Nutzungsphase (B1)** untersuchte Energieverluste während des Systembetriebs, einschließlich Wechselrichterverlusten und Stromverbrauch im Standby-Modus. Die **Wartung (B2)** umfasst den Wasserverbrauch für die regelmäßige Reinigung der Module. In der **Austauschphase (B4)** wurde der Austausch der Wechselrichter berücksichtigt, die aufgrund einer Lebensdauer von 10 Jahren voraussichtlich zweimal innerhalb der 30-jährigen Systemlaufzeit ausgetauscht werden müssen.

¹⁶ PVPS Methodology Guidelines on Life Cycle Assessment of Photovoltaic 2020, <https://iea-pvps.org/key-topics/methodology-guidelines-on-life-cycle-assessment-of-photovoltaic-2020/>

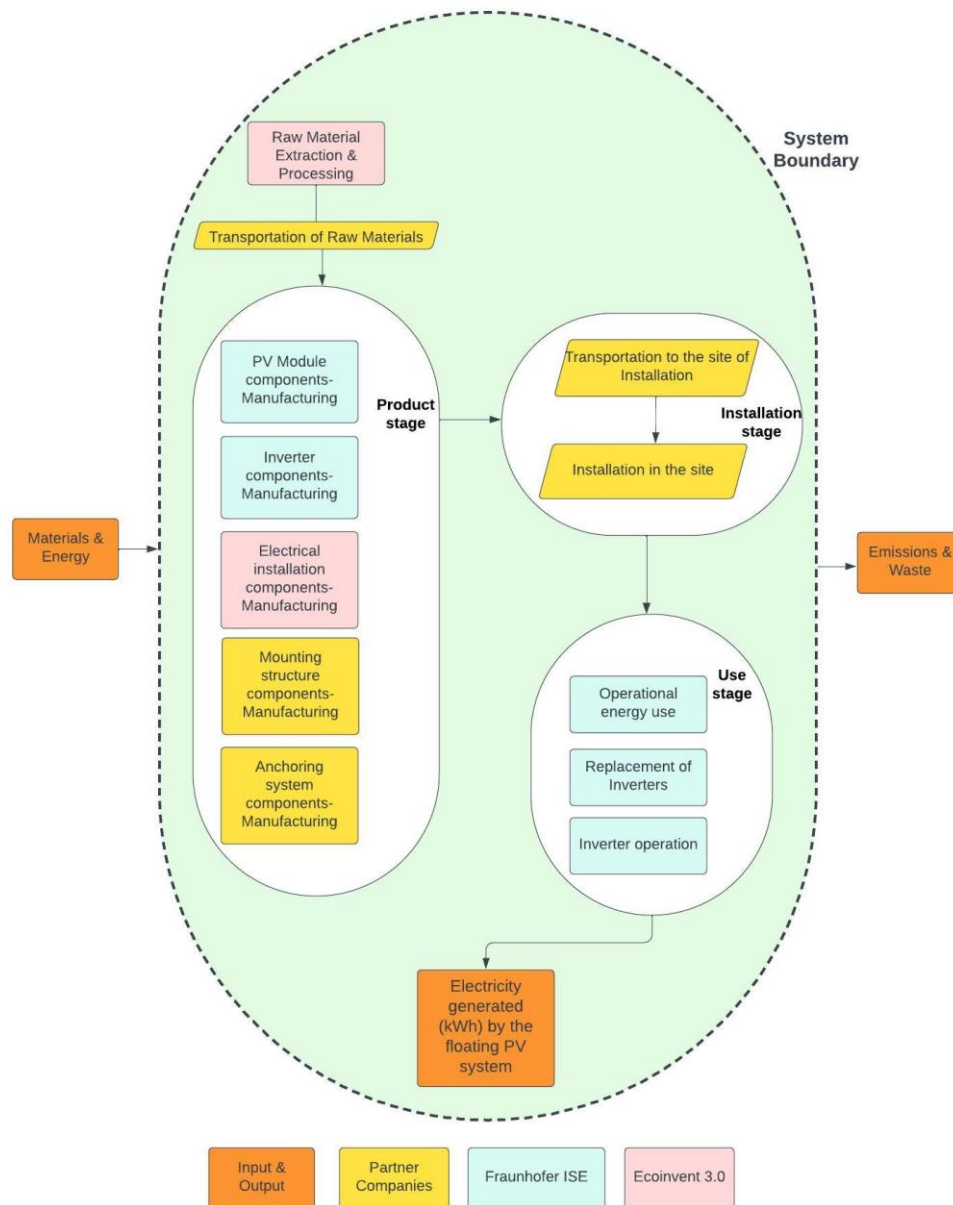


Abbildung 39: Systemgrenzen in der FPV-LCA.

In der **Phase der Rohstoffversorgung (A1)** wurden Materiallisten von Partnern zusammen mit Referenzanlagen verwendet, um die Daten für die Bewertung zu standardisieren, skaliert auf die Funktionseinheit von 1 kWh. In der **Phase des Rohstofftransports (A2)** wurden spezifische Transportmethoden und Distanzen mit standortspezifischen Daten und Worst-Case-Annahmen für fehlende Daten berechnet, wobei Nachhaltigkeitsprinzipien wie die Nutzung von Lastwagen für kürzere Strecken und Flugzeuge für längere Strecken berücksichtigt wurden. In der **Herstellungsphase (A3)** wurden die Umweltauswirkungen der Umform- und Montageprozesse aus der Ecoinvent-Datenbank übernommen. Die **Phase des Transports zum Standort (A4)** konzentrierte sich auf die Logistik zur Lieferung der Komponenten zur Baustelle mit Euro-6-Lkw, wobei die genauen Distanzen für verschiedene Materialien berechnet wurden. Während der **Bau-/Installationsphase (A5)** wurden Prozesse für jedes schwimmende PV-System detailliert beschrieben, aber der Kraftstoff- und Stromverbrauch wurde als

vernachlässigbar angesehen, abgesehen von der Folien-Lösung. Die **Nutzungsphase (B1)** untersuchte Energieverluste während des Systembetriebs, einschließlich Wechselrichterverlusten und Stromverbrauch im Standby-Modus. Die **Wartung (B2)** umfasst den Wasserverbrauch für die regelmäßige Reinigung der Module. In der **Austauschphase (B4)** wurde der Austausch der Wechselrichter berücksichtigt, die aufgrund einer Lebensdauer von 10 Jahren voraussichtlich zweimal innerhalb der 30-jährigen Systemlaufzeit ausgetauscht werden müssen.

Auswertung

Abbildung 40 veranschaulicht, für jedes der drei FPV-Designs, die phasenaufgelöste Wirkungsabschätzung pro produzierter kWh. Für die pontoon-basierte und stahlbasierte FPV-Lösung dominiert – unabhängig von der Wirkungskategorie – die Produktphase, wohingegen bei der folienbasierten Lösung die Beiträge von Bau- und Produktphase ähnlich hoch ausfallen.

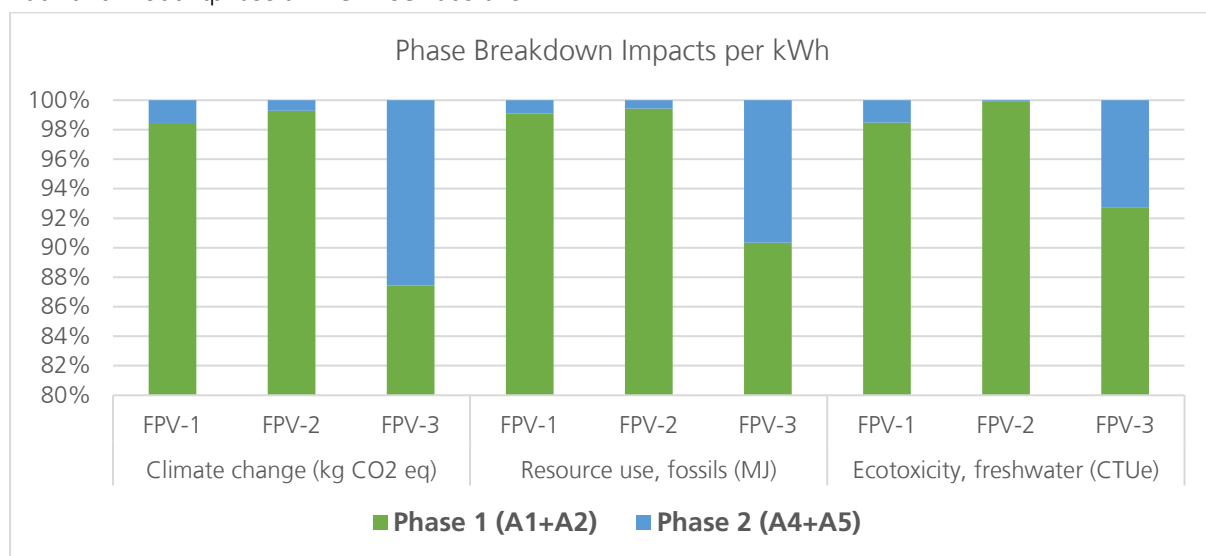


Abbildung 40: Beiträge ausgewählter Phasen in der LCA für die Pontoon-Lösung (PS), Stahl-Lösung (SS) und Folien-Lösung (FS) für drei verschiedene Wirkungskategorien.

Abbildung 41 bilanziert dagegen die Beiträge der Komponenten. Dort wird ersichtlich, dass überwiegend Module und Unterkonstruktion die größten Beiträge zu den betrachteten Wirkungskategorien beisteuern. Eine systematische und umfangreichere Auswertung der Ergebnisse in Form einer Publikation ist geplant.

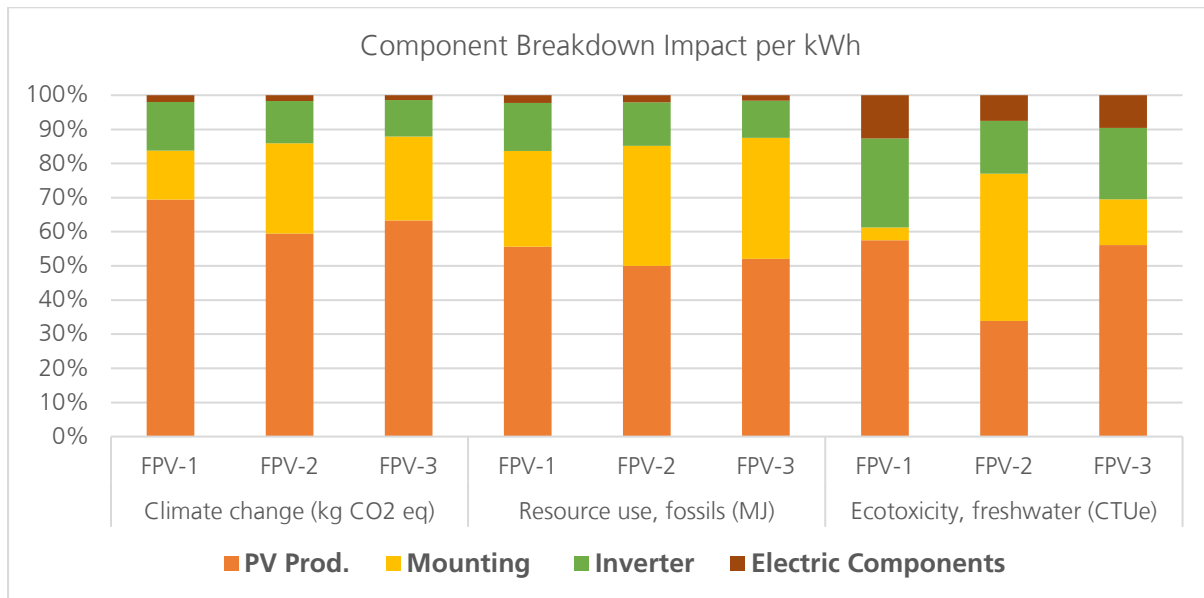


Abbildung 41: Beiträge der Komponenten in der LCA für die Pontoon-Lösung (PS), Stahl-Lösung (SS) und Folien-Lösung (FS) für drei verschiedene Wirkungskategorien.

Fazit

Die Ergebnisse dieses Berichts heben mehrere Schlüsselbereiche für weitere Forschung zu schwimmenden PV-Systemen hervor. Die langfristige Überwachung von Betriebsdaten, wie Energieertrag und Abbauraten, ist entscheidend, um die Schätzungen des CO₂-Fußabdrucks zu validieren und die Systemleistung zu verbessern. Ein Schwerpunkt auf das Verständnis von Abbaumustern, die für schwimmende PV spezifisch sind, ist entscheidend, um die Energieerzeugung und die Lebensdauer des Systems zu erhöhen. Darüber hinaus wird die Untersuchung von End-of-Life-Szenarien, insbesondere von Recyclingoptionen für Materialien wie HDPE, dazu beitragen, die Umweltbelastung zu minimieren und den Abfall im Lebenszyklus dieser Systeme zu reduzieren.

2.1.9 AP 9: Ökologie

Durch die Beschattung durch FPV-Anlagen steht dem Gewässerökosystem weniger Energie zur Verfügung. Dies hat nicht nur Auswirkungen auf den Wärmehaushalt, sondern auch auf die Primärproduktion und damit auf Stoffkreisläufe und Nahrungsnetze. Darüber hinaus stellen die FPV-Anlagen einen zusätzlichen Lebensraum insbesondere für sessile Organismen dar, was Auswirkungen auf das Gesamtökosystem haben kann. Im AP 9 werden limnologische Aspekte untersucht und im Hinblick auf die Bestimmungen der EU-Wasserrahmenrichtlinie und der nationalen Verordnungen zum Gewässerschutz bewertet. Auf Basis der physikalischen Messwerte soll unter Berücksichtigung der natürlichen Rahmenbedingungen eine modellgestützte Übertragbarkeit der Bewertung der Auswirkungen von FPV-Anlagen auf andere Gewässer ermöglicht werden. Gewässerökologische Kriterien für den Einsatz von FPV-Anlagen sollen festgelegt, ökologische Anforderungen an die Konstruktion und den Betrieb von FPV-Anlagen erarbeitet werden. In diesem Arbeitspaket unterstützt das ISE mit seiner Expertise die BTU bei der Gesamtanalyse der gewässerökologischen Veränderungen durch FPV.

Ergebnis / Meilenstein Nr.	Erzieltes Ergebnis	Erreicht am	Kommentar zur Einhaltung des Zeitplans
M5: Ökologische Anforderungen an FPV-Anlagen definiert	unter BTU-Verantwortung		
E1: <i>Ist-Zustand des Versuchsgewässers hinsichtlich seiner limnophysikalischen Eigenschaften und seiner biologischen Besiedlung erfasst</i>	unter BTU-Verantwortung		
E2: <i>Die Ergebnisse der limnophysikalischen und biologischen Untersuchungen zeigen die Auswirkungen der FPV auf das Gewässerökosystem.</i>	unter BTU-Verantwortung		
E3: <i>Durch limnophysikalische Modellierung wird eine Abschätzung der ökologischen Auswirkungen bei unterschiedlichen FPV-Anlagenskalierungen ermöglicht.</i>	unter BTU-Verantwortung		
E4: <i>Eine gemeinsame Bewertung der gewässerökologischen Auswirkungen von FPV</i>	unter BTU-Verantwortung		

<i>liegt vor, die ökologischen Anforderungen an den Einsatz von FPV wurden definiert.</i>			
---	--	--	--

Wegen der späten Installation der Demonstratoren, der späten hydrologischen Messungen darunter und der späten Auswertung letzterer durch die BTU konnte das Fraunhofer ISE nicht bei der Gesamtanalyse der gewässerökologischen Veränderungen durch FPV mitwirken. Stattdessen wurde, basierend auf Ergebnissen aus einer Publikation zum Einfluss der FPV auf die thermische Schichtung eines Gewässers¹⁷, in Ko-Autorschaft ein Buchkapitel¹⁸ über die ökologischen Auswirkungen von FPV verfasst.

¹⁷ Ilgen, K., Schindler, D., Wieland, S., Lange, J. (2023): [The impact of floating photovoltaic power plants on lake water temperature and stratification](#). Scientific Reports 13 (1), 7932. DOI 10.1038/s41598-023-34751-2

¹⁸ de Rijk, S., Wieland, S., Ilgen, K., Dionisio Pires, M., van Eck, L. (2025): Chapter 9 - Impact of floating photovoltaics on the inland aquatic ecosystem. In Progress in Floating Photovoltaic Systems, Elsevier, pp. 195217, ISBN 9780443219726

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der zahlenmäßige Nachweis erfolgt separat über die zentrale Verwaltung der Fraunhofer-Gesellschaft.

2.3 Notwendigkeit der Arbeit

Schwimmende PV ist eine tragende Säule der Energiewende¹⁹, nicht nur in Deutschland²⁰. Viele Herausforderungen, die mit ihrer wirtschaftlichen Umsetzung und gesellschaftlichen Akzeptanz verbunden sind, wurden im Projekt adressiert. Trotz zahlreicher Verschiebungen im Konsortium und Verzögerungen im Projektablauf, aber dank kostenneutraler Verlängerung und Aufstockung gelang es PV2FLOAT, Europas erstes und bisher einziges FPV-Lab aufzubauen und zu betreiben. Weiterhin fungierte dieses erste große FPV-Forschungsprojekt Deutschlands als Leuchtturm; es rief große gesellschaftliche Resonanz hervor und ermöglichte viele FPV-Folgeprojekte.

2.4 Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die im AP 4 im Rahmen des Projektes gewonnenen Erkenntnisse, insbesondere die Ergebnisse des Leaching-Versuches, fließen derzeit in die Gremien- und Normungsarbeit ein. Aktuell erfolgt eine Teilnahme an von SERIS Singapur organisierten Treffen zum Erstellen einer "Technical Specification (TS) on Floating PV systems: "Floating photovoltaic power plants – Design guidelines and recommendations", welche auf der "Technical Reference" TR100:2022 (selbst basierend auf IEC 62738:2018) aufbauen soll.

Die im AP 5 im Rahmen des Projektes gewonnenen Erkenntnisse, insbesondere die Ergebnisse der neu entwickelten Komponentenprüfungen am Stecker werden derzeit in die Gremien- und Normungsarbeit einfließen. Aktuell erfolgt eine Teilnahme an von SERIS Singapur organisierten Treffen zum Erstellen einer "Technical Specification (TS) on Floating PV systems: "Floating photovoltaic power plants – Design guidelines and recommendations", welche auf der "Technical Reference" TR100:2022 (selbst basierend auf IEC 62738:2018) aufbauen soll.

Die in AP5 entwickelten FEM-Simulationen können verwertet werden, um die Auswirkung auf spezifische Umgebungsbedingungen von FPV-Anlagen vor Errichtung abzuschätzen und ggfs. die Planung anzupassen.

2.5 Relevante Ergebnisse von dritter Seite

Kurz vor der Veröffentlichung der in AP 2 bestimmten FPV-Potenziale erschien eine Publikation, die - auch für schwimmende PV, für verschiedene FPV-Bedeckungsgrade und Gewässernutzungsszenarien – das deutsche FPV-Potenzial berechnet:

- Maier, R., Lütz, L., Risch, S., Kullmann, F., Weinand, J., Stolten, D. (2024): Potential of floating, parking, and agri photovoltaics in Germany, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 200

Dabei ergaben im Abgleich mit dem PV2FLOAT-Ansatz ähnliche Randbedingungen jeweils ähnliche Potenzialzahlen.

Parallel zu den LCA-Arbeiten in AP 8.4 wurde eine umfassende Analyse des ökolog. Fußabdrucks von kommerziellen FPV-Systemen veröffentlicht:

¹⁹ <https://www.energieforschung.de/de/aktuelles/news/2024/grosses-potenzial-fuer-schwimmende-photovoltaik-in-deutschland>

²⁰ Carlos D Rodríguez-Gallegos et al 2025 Prog. Energy 7 015001

- Kester, J., Liu, J., Binani, A. (2024): Carbon Footprint Analysis of Floating PV systems, IEA PVPS Task 12 PV, Sustainability Report IEA-PVPS T12-29:2024

In der Endphase des Projekts wurde das ISE auf eine Methode zum Heraufskalieren von LCA-Ergebnissen für Kleinanlagen auf Großkraftwerke aufmerksam – zu spät, um es auf die im Projekt erfolgte LCA für die Demonstratoren anzuwenden.

- Erakca, M., Baumann, M., Helbig, C., Weil, M. (2024): Systematic review of scale-up methods for prospective life cycle assessment of emerging technologies, Journal of Cleaner Production, Volume 451

Auch wurden zu Projektende Zweifel an der gängigen LCA-Methode laut: Ein Paper hebt die Schwierigkeiten bei der Schätzung des CO₂-Fußabdrucks von in China gefertigten PV-Modulen hervor, mit Fokus auf inhärenten Grenzen von prozessbasierten Ökobilanzen (PLCAs) – darunter Datenerhebungsprobleme, dynamische Umweltveränderungen und subjektive methodische Entscheidungen. Anhand einer Fallstudie zu Ecoinvent 3.7 unterstreicht die Studie den Bedarf an mehr Transparenz, Standardisierung und Reproduzierbarkeit in Ökobilanzen:

- Enrico Mariutti, 2025. "The Limits of the Current Consensus Regarding the Carbon Footprint of Photovoltaic Modules Manufactured in China: A Review and Case Study," Energies, MDPI, vol. 18(5)

2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Poster, Berichte und Leitfäden:

- **Nicola, M., Bewind, M.** (2026): PV2Float: Comparative Thermal and Performance Analysis of Three Floating PV Demonstrators and a Land Reference, EUPVSEC 2026) (Poster **4DV.1.34**). Rotterdam, Netherlands, 14–18 September 2026
- **Baltins, K., Ilgen, K., Gölz, S., Graef, A., Heimsath, A., Rößner, J.-V., Wieland, S., Wirth, H.** (2025): [Floating PV: Nachhaltige Energieerzeugung auf dem Wasser](#).
- de Rijk, S., **Wieland, S., Ilgen, K.**, Dionisio Pires, M., van Eck, L. (2025): [Chapter 9 - Impact of floating photovoltaics on the inland aquatic ecosystem](#). In Progress in Floating Photovoltaic Systems, Elsevier, pp. 195217, ISBN 9780443219726 .
- **Nicola, M., Berwind, M.** (2024): Comparative thermal analysis: Evaluation of system configuration differences in FPV power plants. In Proceedings of the 41st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC 2024) (Poster **4DV.1.21**). Vienna, Austria, 23–27 September 2024
- SolarPower Europe: Floating PV Best Practice Guidelines Version 1.0 (2023)
- **Gözl, S., Zuber, B.** (2023): Floating-Photovoltaik und der herausfordernde Weg zur „Schwimmerlaubnis“, in PV Magazine online, <https://www.pv-magazine.de/2023/05/11/floating-photovoltaik-und-der-herausfordernde-weg-zur-schwimmerlaubnis/>

Wissenschaftliche Artikel:

- **Wieland, S.:** Local and global sensitivity analysis for levelized costs of electricity of photovoltaic installations (in Vorbereitung)
- **Gözl, S., Ortseifen, D., Berneiser, J.:** Exploring acceptance of floating Photovoltaics in regions undergoing structural change in Germany (eingereicht)
- **Wieland, S., Gürsal, U.** (2026): [Uncertainty propagation in financial models of photovoltaic systems](#). Sci Rep 16, 5004. DOI 10.1038/s41598-026-38053-1 .

- **Nicola, M., Berwind, M.** (2024): [Improving Module Temperature Prediction Models for Floating Photovoltaic Systems: Analytical Insights from Operational Data](#). Energies 2024, 17, 4289. DOI 10.3390/en17174289 .
- Jung, D., Schöneberger, F., Moraga, F., **Ilgen, K., Wieland, S.** (2023): [Floating PV in Chile: Potential for Clean Energy Generation and Water Protection](#). Sustainable Energy Technologies and Assessments 63, 103647. DOI 10.1016/j.seta.2024.103647 .

Masterarbeiten:

- Jeske, Finn-Keno (2025): Skalierung von schwimmenden Photovoltaikanlagen (FPV) auf den MW-Maßstab: Analyse von Optimierungspotenzialen zur Reduzierung der Stromgestehungskosten und Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit. HAWK Göttingen, Fraunhofer ISE
- de Moraes Ramírez, Yasmin (2025): Finite elements method simulation of the effects of wind on floating photovoltaic systems. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br., Fraunhofer ISE
- Mpofu, Cassandra (2024): Potential Analysis of Floating Photovoltaics using GIS: A Case Study of Germany and Italy. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br., Fraunhofer ISE
- Ortseifen, Dominik (2024): Zukunftsvorstellungen im Kontext von Floating Photovoltaik in deutschen Braunkohletagebaurevieren. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br., Fraunhofer ISE
- Oztürk, Irmak (2024): Development of Eco and Circularity Audits for Materials Selection within the Circularity Engineering Framework. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br., Fraunhofer ISE
- Nicola, Monica (2023): Modelling and Validating Heat Transfer Effects in Floating PV Installations. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br., Fraunhofer ISE
- Gürsal, Utku (2022): Stochastically modelling the impact of component failures on the profitability of photovoltaic (PV) power plants. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br., Fraunhofer ISE
- Zuber, Beatrice (2022): Permitting procedure for Floating PV parks in Germany. Universität von Perugia, Fraunhofer IS