

# Schlussbericht

## Verbundvorhaben

„ORION – Organisch-Photovoltaisches Gewächshaus“

(SOLAR-ERA.NET Cofund 2 Additional Joint Call Projektnummer 56:  
Organic Photovoltaic Greenhouse)

Auf deutscher Seite

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

**Laufzeit des Vorhabens:**

01.10.2020 – 31.03.2023

**Berichtszeitraum:**

01.10.2020 – 31.03.2023

**Projektleiter:**

Dr. Sebastian Meier

Email: [sebastian.meier@armor-group.com](mailto:sebastian.meier@armor-group.com)

Tel.: +49 9321 26495-64

Fax: +49 9321 26495-41

**Zuwendungsempfänger:**

1. Landwirtschaftliche Universität Athen (Verbundkoordinator)
2. Universität Thessalien
3. Agricultural Research Organization Volcani Center
4. ASCA GmbH i. L.
5. Triangle Research and Development Center

**Förderkennzeichen:**

6\BM46MT\AP-M7A  
6\BM46MT\AP-M7A  
220-11-057  
03EE1075  
220-11-056

**Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor**

## Vorwort

Das übergeordnete Ziel des Verbundvorhabens ORION war die Entwicklung eines intelligenten und innovativen Konzepts für den Einsatz von organischer Photovoltaik (OPV) in der Gewächshausindustrie, im Speziellen in Folientunneln. Um dies zu erreichen, wurden in ORION organische Photovoltaikmodule zweckgebunden weiterentwickelt, auf der Gewächshausaußenhaut oder im Gewächshausinneren oberhalb der untersuchten Kulturpflanzen getestet und abschließend bewertet. Das Hauptaugenmerk der Studie lag auf der Erschließung eines doppelten Verwendungszwecks ein und derselben Fläche sowohl für die Stromerzeugung durch Photovoltaik als auch für die Produktion landwirtschaftlicher Erzeugnisse (Gemüse, Obst und Blumen). Durch besagten Ansatz kann die Effizienz der Landnutzung insbesondere im ländlichen Raum deutlich gesteigert. Darüber hinaus wird die Nutzung erneuerbarer Energien erhöht und der Einsatz fossiler Brennstoffe, die zur Entstehung von Treibhausgasen beitragen, verringert. Parallel dazu wurde in ORION ein drahtloses Sensorsystem für die intelligente Verwaltung des gesamten Gewächshauses (Ernte, Mikroklima und Energie aus OPV) entwickelt, sowie eine Simulationssoftware, um die Verwendung des Sensorsystems auch auf andere Gewächshaustypen, geographische Regionen und Pflanzenkulturen zu erweitern.

Zur strukturierten Durchführung des Verbundvorhabens wurden die folgenden sieben Arbeitspakete (AP) definiert:

- AP1: Entwicklung von OPV-Modulen für den Einsatz in Gewächshäusern
- AP2: Entwicklung eines Remote-Überwachungssystems für das OPV-Gewächshaus
- AP3: Monitoring des OPV-Gewächshauses
- AP4: Numerische Evaluierung von OPV-Gewächshäusern
- AP5: Bewertung von umweltlichen und ökonomischen Aspekten
- AP6: Verbreitung und Nutzung
- AP7: Projektmanagement

Das Teilvorhaben von ASCA beinhaltete einerseits die Integration von OPV-Modulen in Gewächshausfolien. Im Fokus stand hier insbesondere die Auswahl und Überprüfung von geeigneten Schmelzklebstoffen als Verbindungsschicht zwischen OPV und Gewächshausfolie. Der Einfluss dieser zusätzlichen Schmelzklebstoffe und von besseren Barrierefolien auf die Modullebenszeit wurde ebenfalls bestimmt. Andererseits wurden die elektrischen Anschlüsse der OPV-Module weiterentwickelt, um den Anforderungen der Gewächshausanwendung gerecht zu werden. Neben diesen Hauptarbeitsschwerpunkten war ASCA auch noch in folgende Aspekte involviert:

- Entwicklung eines Remote Überwachungssystems für das OPV-Gewächshaus
- Monitoring des OPV-Gewächshauses

ASCA konnte ihre Aufgabenstellungen in den einzelnen APs erfolgreich abarbeiten. Es wurden innovative Anschlusspunkte in verschiedenen Ausführungen entwickelt, die den

Anforderungen der untersuchten Gewächshausumgebung gerecht wurden. Ferner konnten neuartige, kommerziell erhältliche Barrierefolien mit niedrigerer Wasserdampfdurchlässigkeit identifiziert und erfolgreich getestet werden, wodurch die Lebensdauer von OPV-Modulen signifikant gesteigert werden konnte. Zudem wurde ein innovativer Ansatz zur direkten Verheiraturung von OPV-Modul und Gewächshausfolie mittels Schmelzklebstoff demonstriert. Für den Gewächshausdemonstrator in Israel stellte ASCA die Module zur Verfügung, beteiligte sich an der Konzipierung der elektrischen Verschaltung und am Monitoring, sowie der Ergebnisauswertung.

# Schlussbericht

**Zuwendungsempfänger:**

ASCA GmbH i. L.  
Steigweg 24  
97318 Kitzingen

**Förderkennzeichen:**

03EE1075

## Teilvorhaben

„Integration von organischen Photovoltaikmodulen in Gewächshäuser“

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

**Laufzeit des Vorhabens:**

01.10.2020 – 31.03.2023

**Berichtszeitraum:**

01.10.2020 – 31.03.2023

**Projektleiter:**

Dr. Sebastian Meier

Email: [sebastian.meier@armor-group.com](mailto:sebastian.meier@armor-group.com)

Tel.: +49 9321 26495-64

Fax: +49 9321 26495-41

**Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor**



**Inhaltsverzeichnis**

1. Personal .....	8
2. Gerätschaften .....	8
3. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse .....	8
3.1. Einleitung .....	8
3.2. Weiterentwicklung des Anschlusspunktes .....	8
3.3. Integration von OPV-Modulen in Gewächshausfolien .....	20
3.4. Lebenszeitmessung (integrierter) OPV-Module .....	31
3.5. Entwicklung eines Remote-Überwachungssystems und Monitoring der OPV-Module im Gewächshaus .....	36
3.6. Zusammenfassung .....	44
4. Stand des Vorhabens .....	45
5. Verwertung .....	45
5.1. Publikationen .....	45
5.2. Entwicklungen auf Grund des Projekts .....	45
5.3. Patente .....	46



## 1. Personal

Das Projekt wurde, wie ursprünglich geplant, mit einem Aufwand von 42 Personenmonaten (PM) bearbeitet.

## 2. Gerätschaften

Wie ursprünglich vorgesehen mussten für das Erreichen der Ziele des ORION-Projekts keine neuen Gerätschaften angeschafft werden. Die vorhandene Infrastruktur an Klimakammern, Solarsimulatoren, Mess-, Druck- und Laminierungsequipment war für die Durchführung der angedachten Arbeiten ausreichend.

## 3. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

### 3.1. Einleitung

Das Teilvorhaben von ASCA beinhaltete schwerpunktmäßig die Prozessentwicklung zur Integration von OPV-Modulen in Gewächshäuser sowie die Weiterentwicklung der elektrischen Anschlüsse von OPV-Modulen, um den Anforderungen der Gewächshausanwendung gerecht zu werden. Die zugehörigen Arbeiten von ASCA im Verbundvorhaben waren primär den Arbeitspaketen (AP) 1 und 3 zuzuordnen. Folgende wissenschaftliche und technische Arbeitsziele sollten vorrangig erreicht werden:

- Neu-/Weiterentwicklung des Anschlusspunktes
  - Spritzgegossene Kontaktkappen (Variante A)
  - Aufgeklebte Kontaktkappen (Variante B)
  - Flachkontakte (Variante C)
- Prozessentwicklung zur nahtlosen Integration von OPV-Modulen in Gewächshausfolien auf Basis von Schmelzklebstoffen
- Weiterentwicklung der Einkapselung von OPV-Modulen unter Verwendung neuartiger Barrierefolien mit geringer Wasserdampfdurchlässigkeit
- Herstellung von OPV-Modulen mit unterschiedlichen spektralen Charakteristiken und Konzipierung des elektrischen und optischen Moduldesigns für den Einsatz im Gewächshaus
- Herstellung von OPV-Modulen zur Installation im Gewächshaus, elektrische Systemauslegung und Elektrisches Monitoring der Pilotinstallation

### 3.2. Weiterentwicklung des Anschlusspunktes

Den israelischen Projektpartnern wurden bereits in der Vergangenheit im Rahmen einer trilateralen Zusammenarbeit OPV-Module zur Verfügung gestellt. Diese waren mit einfachen Kontaktkappen ausgestattet. Besagte Kappen sind erforderlich, um die Kontaktstellen abzudichten, an denen die externen Kabel mittels Lötunkten an den elektrischen Kontakten des Moduls angebracht sind. Die Abdichtung soll sowohl die Lötstelle als auch das OPV-Modul vor direktem Kontakt mit Feuchtigkeit und Sauerstoff schützen, wodurch eine Korrosion der Lötstelle als auch eine Degradation der OPV-Module in der Nähe der Kontaktstelle verhindert werden soll.

Die erste Version einer Kontaktkappe war eine Abdichtung der Lötstelle mit einem Einkomponenten-Silikondichtmittel, welches in Umgebungsluft aushärtet. Besagtes Dichtmittel war einfach aufzutragen, konnte manuell in die gewünschte Form gebracht werden, erforderte keine zusätzlichen Werkzeuge für dessen Applikation, haftete gut auf der Barrierefolie und blieb nach dem Aushärten flexibel. Zu den Nachteilen dieser Kappe gehörten unter anderem die fehlende Zugentlastung der Kontaktkabel (das Dichtmittel ist zu weich, um das Kabel zu halten), das mäßige optische Erscheinungsbild und die nicht reproduzierbare Aufbringungs- methode. Der schwerwiegendste Nachteil war jedoch die schlechte Barrierewirkung gegenüber Sauerstoff- und Wasserdiffusion, da sich insbesondere die Abdichtung um das Kabel, aufgrund der hohen Viskosität des Dichtmittels, als schwierig erwies.

Für die Weiter- bzw. Neuentwicklung von Anschlusskappen für organische PV-Module gibt es eine Vielzahl an Ansätzen, zum Beispiel mittels Spritzgießen (Variante A) oder durch Aufkleben vorgeformter Kappen (Variante B). Ebenso sind flachere und flexiblere Anschlusspunktvarianten denkbar (Variante C). Je nach OPV-Anwendung und Produktionsschritt kann die eine oder andere Kappenvariante passender sein. Aus diesem Grund werden Anschlussvarianten ständig parallel weiterentwickelt. Die unterstehende Kriterienliste in Tabelle 1 hilft dabei, um sowohl den Entwicklungsfortschritt innerhalb einer Variante zu bewerten als auch die verschiedenen Vor- und Nachteile der Varianten untereinander vergleichen zu können (siehe Tabelle 2).

**Tabelle 1:** Kriterien für Anschlusskappen auf OPV-Modulen.

Kriterium	Umschreibung
Ästhetisches Design	Kappen müssen gleichmäßig und wie ein finales Produkt aussehen
Kundenspezifische Anpassung	Formgebung der Kappe soll einfach an Kundenwünschen anpassbar sein
Einfache Applikation	Kappe muss in wenigen einfachen Produktionsschritten applizierbar sein
Kappe sofort stabil	Kappe muss sofort nach Auftragen beansprucht werden können
Anzahl Arbeitsschritte	Möglichst niedrige Anzahl der Einzelschritte für die Kappenherstellung
Niedrige Werkzeugkosten	Geringe Fixkosten für Werkzeug ermöglichen kostengünstige Designanpassung
Niedrige Materialkosten	Maximaler Zielpreis ist rund € 1 pro Kappe an Materialkosten
Stückzahl für Einzelpreis € 1	Fixkosten werden umgelegt auf die Anzahl der produzierten Kappen

Gute Dichtigkeit	Kappe muss Eindringen von Wasser und Sauerstoff ins Modul verhindern
Haftung zum Untergrund	Kappe muss zum Untergrund gut haften und abschließen
Kabelzugentlastung	Zug am Kabel darf nicht an die Lötstellen weitergeleitet werden
Flexible Kappe	Für biegbare OPV-Module ist eine flexible Kappe wünschenswert
Einseitige oder dünne Kappe	Für manche Anwendungen ist eine dünne oder einseitige Kappe notwendig

**Tabelle 2:** Bewertung verschiedener spritzgegossenen Anschlusskappen (Variante A) und der aufgeklebten Kappen (Variante B). Bewertung ist von sehr schlecht (– –) bis sehr gut (+ +). §: Nur bei Eigenfertigung. Nähere Erläuterungen finden sich in Kapitel 3.2.1 und 3.2.2.

Kriterium	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3
Ästhetisches Design	– –	++	++	++	++	– –	++	+
Anpassung Kundenwünsche	– –	++	++	++	+	– –	0	++
Einfache Applikation	+	++	0	0	–	++	0	–
Kappe sofort stabil	++	++	++	++	– –	++	– –	–
Anzahl Arbeitsschritten	1	1	2	2	4	1	1	1
Niedrige Werkzeugkosten	++	+	0	–	++	++	– –	(+)§
Niedrige Materialkosten	++	++	++	+	0	++	–	–
Stückzahl für Einzelpreis € 1	>1	>150	>300	>400	>500	>1	>10k	(>1)§
Gute Dichtigkeit	– –	– –	–	– –	+	– –	+	++
Haftung zum Untergrund	– –	– –	+	0	++	0	++	++
Kabelzugentlastung	– –	– –	– –	– –	+	– –	++	++
Flexible Kappe	– –	– –	– –	– –	– –	– –	– –	– –
Einseitige oder dünne Kappe	+	+	+	– –	+	+	+	+

### 3.2.1. Spritzgegossene Kontaktkappen (Variante A)

Variante A – das Spritzgussverfahren – hat für die Herstellung der Anschlusskappen generell den großen Vorteil der einfachen Applikation. Der Produktionsmitarbeiter muss nur in einem

Arbeitsschritt ein thermoplastisches Material auf das OPV-Modul auftragen. Neben der richtigen Temperatureinstellung der Spritzgusspistole muss der Arbeiter nur auf die Abkühlzeit vom Thermoplast achten. Es gibt jedoch einige Untervarianten der spritzgegossenen Kappen (siehe Abbildung 1), welche hierunter näher beschrieben werden und deren Bewertungen in Tabelle 2 zusammengefasst sind. Generell sind alle spritzgegossenen Varianten sofort nach Auftragung stabil und beanspruchbar (für Variante A5 – siehe weiter unten – gilt dies wegen einer extra Klebstoffschicht nicht). Dieser große Vorteil gegenüber z.B. den aufgeklebten Kappen (Variante B) bedeutet auch einen geringen Platzbedarf in der Produktion, weil ein extra Aushärteschritt wegfällt.



**Abbildung 1:** Spritzgegossene Kontaktkappen der ersten (Variante A1; links), zweiten (Variante A2; Mitte) und dritten (Variante A3; rechts) Generation.

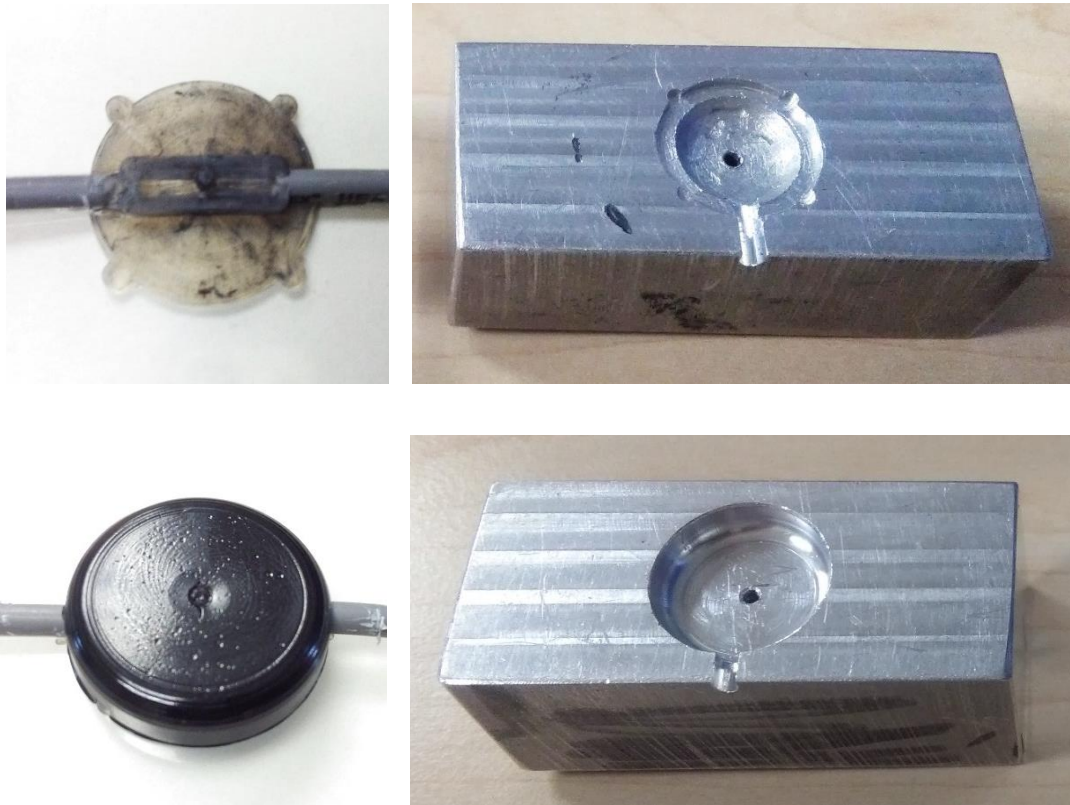
Für Variante A1 – die erste Generation spritzgegossener Anschlusspunkte – wurde der Thermoplast ohne eine Spritzgussform direkt auf das OPV-Modul aufgetragen und die Kappen waren dementsprechend weder homogen ausgeformt noch optisch ansprechend. Da es hier aber keine Fixkosten für ein Spritzgusswerkzeug gibt, können diese Kappen sehr kostengünstig produziert werden und dies schon ab Stückzahl 1 (siehe Tabelle 2). Der witterungsstabile schwarze Thermoplast für das Spritzgussverfahren kostet pro Kappe lediglich etwa € 0,10 bis € 0,30 je nach Größe des Anschlusspunktes.

Die ansehnlicher aussehende Kappe der zweiten Variante A2 wurde mit Hilfe einer Spritzgussform hergestellt. Somit wurde das Kriterium „Ästhetisches Design“ gezielt erfüllt, wobei andere Kappendesigns, jenseits der kreisrunden Kontaktkappen in Abbildung 1, selbstverständlich möglich sind. Das Werkzeug kann ebenso leicht an einen uni- oder einen bipolaren Anschlusspunkt (vergleiche Variante A2 und A3 in Abbildung 1) angepasst werden. Hierzu muss nur die Aussparung für das Kabel im Spritzgusswerkzeug entsprechend modifiziert werden. Eine einfache Spritzgussform kostet allerdings wenige Hundert Euros, sodass sich dieses Verfahren erst ab einer Stückzahl von wenigen 100 Kappen lohnt (siehe Tabelle 2). Ein weiterer Vorteil der Spritzgussform besteht darin, dass alle Kappen schnell, reproduzierbar und einheitlich gefertigt werden können im Gegensatz zu Verfahren A1.

Problematisch blieb hingegen die Haftung des schwarzen Thermoplasts sowohl auf der PET-basierten Verkapselungsfolie des OPV-Moduls, als auch auf Oberflächen bestehend aus Polycarbonat (PC). Auf der ersteren Oberfläche ist die Haftung gering während auf PC keine

Haftung besteht. Für die spritzgegossenen Anschlusskappen wurden daher mehrere Lösungsrichtungen entwickelt.

Die erste Lösung ist Variante A3 und besteht aus einem Überspritzverfahren. Der Anschlusspunkt wird zunächst mit einem Thermoplast umspritzt, welcher gut auf der Barrierefolie des Moduls haftet (siehe Abbildung 2). Dieser Thermoplast hat jedoch materialklassenbedingt eine geringe UV-Stabilität und Shore-Härte, sodass dieses Material nur als Haftvermittlungsschicht in Frage kommt und somit nochmals in einem extra Schritt mit dem schwarzen witterungsstabilen Thermoplast überspritzt werden muss. Da nun zwei Spritzgussformen benötigt werden, verdoppeln sich dementsprechend auch die Werkzeugfixkosten. Insgesamt bleiben die Materialkosten pro Kappe dennoch niedrig und vergleichbar mit Variante A2, sodass Variante A3 sich ab einer doppelten Anzahl an Kappen rechnet (siehe Tabelle 1). Die Applikation ist im Vergleich zu Variante A2 nicht nur zeitaufwendiger, sondern auch anspruchsvoller: Neben insgesamt zwei Produktionsschritten muss beim zweiten Mal Spritzgießen die Form sehr präzise zum ersten Spritzling ausgerichtet werden. Als manueller Prozess ist das Überspritzen daher eher ungeeignet. Im finalen Zustand erkennt man den Unterschied zwischen Variante A3 und A2 (in Abbildung 1) am Kappenäußeren nicht.



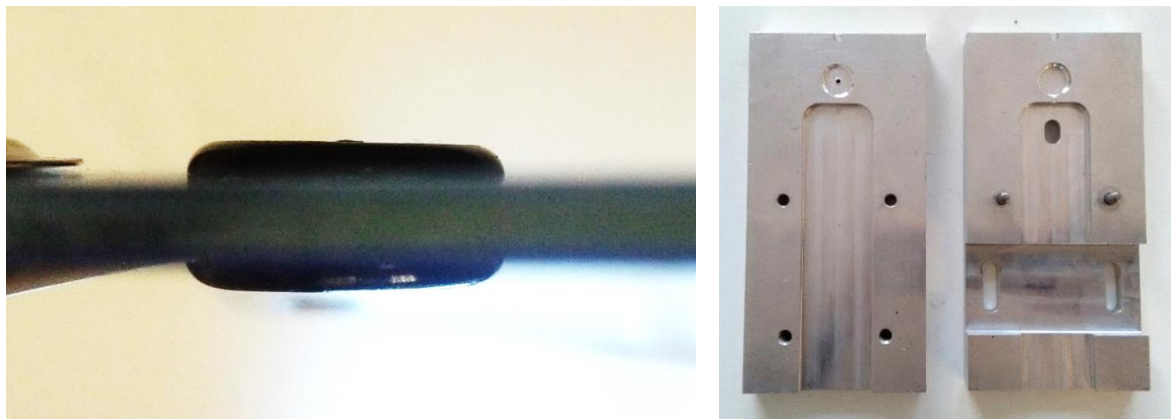
**Abbildung 2:** Herstellung der Kontaktkappe A3 mittels Überspritzgießen. Oben ist der erste Schritt dargestellt, wobei zunächst ein haftender Thermoplast spritzgegossen wird. Im zweiten Schritt (unten) wird die UV-stabile Außenseite aufgetragen. Rechts wird die jeweilige Spritzgussform gezeigt.

Bei Variante A3 sorgt die erste Schicht aus weißem Thermoplast tatsächlich für eine größere Kappenhaftung auf dem Modul und sie ummantelt das Anschlusskabel ein wenig mehr im Vergleich zum schwarzen Thermoplast. Dennoch gab es Probleme mit der Dichtigkeit der Anschlusskappen, sodass mit der Zeit Wasser und Sauerstoff durch die Kappe in die Verpackung

von Modulen eindrang, welche dem Wetter ausgesetzt waren. Bei diesen Modulen bleichte die farbige photoaktive Schicht radial von der Anschlussstelle aus. Ebenso delaminierte die Verpackung dieser Module durch Ansammlung von Wasser, welches an warmen Tagen verdampfte und in der Verpackung einen Druck auf die Barrierefolie aufbaute.

Eine Lösung des Haftungsproblems erreicht man durch das Durchspritzgießen (Variante A4). Hierbei werden zunächst Öffnungen in einem (stabilen) Untergrund (z.B. einem PC-Laminat) eingebracht. Eine Spritzgussform bestehend aus zwei Hälften, wie in Abbildung 3 dargestellt, wird danach ober- und unterhalb dieser Öffnungen platziert. Der Thermoplast wird von oben in die Form zugeführt und fließt danach durch die Öffnungen im OPV-Modul in die untere Seite der Form. Somit ist die Kappe stabil durch die OPV-Verpackung verankert und bietet einen zuverlässigen Kontaktschutz. Ein Nachteil besteht darin, dass diese Kappe nicht mit dem Untergrund verklebt, sodass sie genauso schlecht zum Untergrund abdichtet wie Variante A2. Für Moduldesigns, bei denen sich der Anschlusspunkt mehrere Zentimeter von der photoaktiven Fläche entfernt befindet, kann diese Anschlussvariante dennoch interessant sein. Ein zweiter großer Nachteil ist die doppel- bzw. beidseitige Gestaltung, sodass Module mit Kappenvariante A4 nicht flach auf einem Untergrund appliziert werden können oder der Untergrund müsste Aussparungen für die Anschlusspunkten enthalten.

Die Fertigungsprozedur von Kappe A4 ist im Vergleich zu Variante A3 fast genauso zeitaufwendig, da auch hier zwei Schritte – für Löcher und Spritzgießen – benötigt werden. Die Registrierung der beiden Formhälften ist wegen der Passstifte (siehe Abbildung 3 rechts) einfacher als bei Variante A3. Die Werkzeugkosten für diese Kappenvariante sind aber etwas höher im Vergleich zu Variante A3, da diese Form im Wesentlichen aus zwei Teilen besteht und zudem noch Passstifte und -Hülsen benötigt.



**Abbildung 3:** Herstellung der Kontaktkappe A4 mittels Durchspritzgießen. Die Kappe befindet sich oberhalb und unterhalb des OPV-Moduls (links) und wird mit einer zweiteiligen Spritzgussform (rechts hergestellt).

Die Spritzgusskappe A5 wurde gleich mehrfach verbessert. Die Haftung zur Modulverpackung und auch zu Polycarbonat wurde erhöht indem zunächst eine Haftvermittlungsschicht auf den Untergrund aufgetragen wird. Diese Methodik ähnelt der von Variante A3, aber die dünne Schicht besteht diesmal aus einem Flüssigklebstoff, der deutlich besser haftet. Verschiedene Klebstoffe wurde hinsichtlich Viskosität, Haftung und Flexibilität getestet. Zum Beispiel wurden

Klebstoffe auf Basis von Epoxidharzen frühzeitig wegen der hohen Brüchigkeit ausgeschlossen. Anschlusskappen mit einem Epoxidklebstoff waren anfänglich wasserdicht, aber nach einem Frost-Tau-Wechseltest (engl. „humidity freeze cycle“) konnte Wasser in der Kappe mittels eines Leckstromtests nachgewiesen werden. Hierzu wurden die Anschlusskappen in ein Salzwasserbad getaucht, eine Spannung zwischen Anschlusskabel und Wasserbad angelegt und der resultierende Leckstrom gemessen. Für diese Tests wurden außerdem Klebstoffe mit niedrigeren Viskositäten bevorzugt, da sie die Lötstellen und das Kontaktloch in der OPV-Verpackung besser umfließen und abdecken.

Für Variante A5 wurde in einem zweiten Schritt ein sogenannter Kabelhalter auf dem Klebstoff platziert. Das Anschlusskabel wurde hierbei festgepresst in der Vorderseite vom Kabelhalter, worin sich kleine Zähnnchen befinden, die leicht in den Kabelmantel schneiden und verzahnen (siehe Abbildung 4). Dieser Kabelhalter wurde 3D-gedruckt und kann an verschiedenen Kappendesigns angepasst werden. Im dritten Schritt wurden die Lötstellen und das Kabel mit dem Flüssigklebstoff überdeckt. Einerseits ist hierdurch eine gute Zugentlastung für das Anschlusskabel gewährleistet. Andererseits bewirkt dieser Klebstofffilm einen extra Schutz gegen Eindringen von Wasser und Sauerstoff zu den Lötstellen und weiter in das Modul hinein. Im vierten Schritt wurde die Spritzgussform auf der Klebstoffschicht und über den Kabelhalter platziert und mit dem schwarzen Thermoplast ausgespritzt.



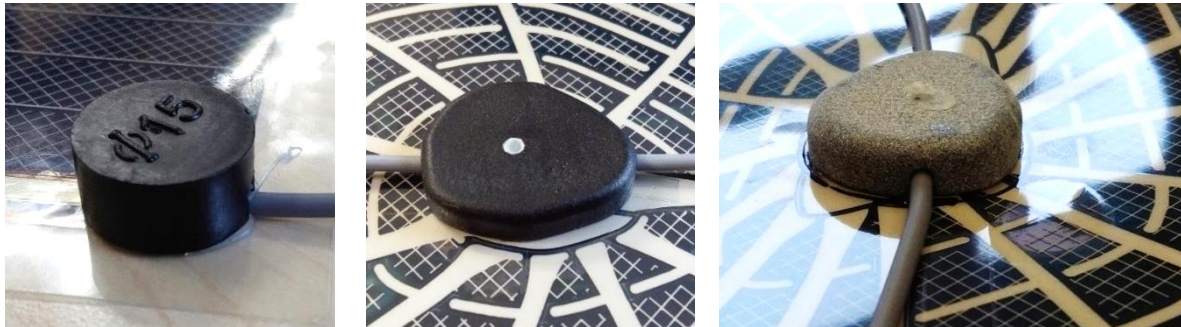
**Abbildung 4:** Herstellung der Kontaktkappe A5. Kabelhalter samt Anschlusskabel (links) wird komplett umspritzt um die fertige Kappe (rechts) zu erhalten. Die rechte Seite vom Kabelhalter hält das zweiadrigte Anschlusskabel mittels Zähnnchen fest; in diesem besonderen Kappendesign umklammert der Kabelhalter zusätzlich eine Metallhülse für eine extra Verankerung.

Die Kosten für Anschlusskappe A5 fallen wesentlich höher aus im Vergleich zu den anderen spritzgegossenen Kappen. Erstens kostet der strukturelle Klebstoff je nach Kappengröße zwischen € 0,20 und € 0,50. Der extra 3D-gedruckten Kabelhalter kostet rund € 0,50. Dazu kommen wieder € 0,10 bis € 0,20 an Kosten für den schwarzen Thermoplast. Als Fixkosten gibt es hier aber nur eine Spritzgussform, genau wie bei Variante A2.

Weitere möglichen Verbesserungen in den spritzgegossenen Anschlusskappen bestehen darin, zum Beispiel ohne extra Haftvermittlungsschicht die Haftung vom Thermoplast durch ein geeignetes Material zu verbessern. Somit können die hohen Kappenkosten der Variante A5 stark verringert werden in Richtung des Einzelpreises von Variante A2. Außerdem gibt es flexiblere Thermoplaste, womit gegebenenfalls neuartige, biegbare Kappen ermöglicht werden könnten.

### 3.2.2. Aufgeklebte Kontaktkappen (Variante B)

Ein komplett anderer Produktionsweg für Anschlusskappen ist Variante B. Diese Prozedur besteht aus dem Aufkleben einer vorgefertigten Kappe (siehe Abbildung 5). Die allererste und simpelste Variante B1 ist eine gekaufte Kappe von der Stange, welche etwa zwischen € 0,10 und € 0,20 kostet. Die Kappe wird mit einem Heißsiegelmaterial (in der gleichen Preisklasse) auf das OPV-Modul geklebt. Somit ist Kappe B1, zusammen mit Variante A1, die kostengünstige Anschlusskappe ab dem ersten Stück. Andererseits können solche Kappen nicht an die Kundenwünsche bzw. die Modulform angepasst werden und sie sind optisch wenig ansprechend.



**Abbildung 5:** Aufgeklebte Kontaktkappen der ersten (Variante B1; links), zweiten (Variante B2; Mitte) und dritten (Variante B3; rechts) Generation.

Für Variante B2 (Abbildung 5 Mitte) kann das Design der Kappe dem des OPV-Moduls angeglichen werden. Hierzu wird die Kappe zunächst in einem CAD-Programm gezeichnet und ein entsprechendes Spritzgusswerkzeug für die industrielle Fertigung gekauft. Die Herstellung mittels Spritzgießen fand hier extern statt. Wegen der sehr hohen Werkzeugfixkosten ist dieses Herstellungsverfahren nur ab 10.000 identischen Kappen kostengünstig (siehe Tabelle 2). Für kleine Projekte mit wenigen OPV-Modulen ist diese Variante daher ungeeignet, aber die Applikation dieser Kappe in der Serienproduktion ist wiederum recht aufwendig. Zwar wird die Kappe nach Befüllung mit Klebstoff in einem Schritt über der Lötstelle und dem Kabel platziert, aber der überschüssige, austretende Klebstoff muss im Nachgang entfernt werden. Der Klebstoff härtet danach schnell aus, dennoch ist die Anschlusskappe in den ersten Stunden empfindlich gegenüber Stößen und Erschütterungen, sodass extra Platzbedarf und Ruhezeit in der Produktion berücksichtigt werden müssen. Ein weiterer Nachteil ist der hohe Verbrauch an Klebstoff, weil er in dieser Kappenvariante auch als Dichtmasse verwendet wird. Die Klebstoffkosten sind dadurch ungefähr doppelt so hoch wie bei Variante A5.

Die aufgeklebte Kappe B2 hat allerdings auch wichtige Vorteile. Erstens lassen sich die Kappen über die Auswahl des strukturellen Klebstoffes auf unterschiedlichsten Untergründen fixieren. Durch Haftungstests wurde zum Beispiel eine Materialklasse identifiziert, welche besonders gut für PC- und PET- (Außenseite OPV-Verpackung) Oberflächen geeignet ist. Zweitens dichtet der Klebstoff im Vergleich zu den obengenannten Thermoplasten besser um das Anschlusskabel und zum Untergrund ab. Mehrere Leckstromtests wiesen daher eine sehr gute Abdichtung dieser Kappenvariante gegenüber Wasser aus.

In der nachfolgenden Variante B3 wurden einige Nachteile der Kappe B2 behoben. Die Kappen wurden diesmal in einem 3D-Druckverfahren sowohl intern als auch extern hergestellt, mit dem Vorteil, dass keine teuren Spritzgussformen benötigt und Kappen für Prototypen und

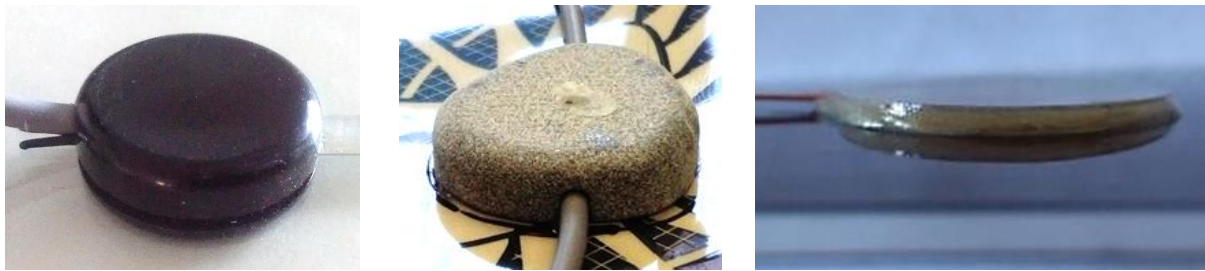
Nullserien erschwinglich werden. Der Einzelpreis bei Eigenfertigung liegt deutlich unter € 1,00, weil die Materialkosten fürs Filament unter etwa € 0,25 pro Kappe betragen und die Anschaffungskosten eines einfachen 3D-Druckers sich über weniger als 1000 Kappen amortisieren. Wird der 3D-Seriendruck der Kappen jedoch extern vergeben, dann ist ein Einzelpreis von € 1,00 kaum zu erzielen.

Die zweite Verbesserung bei Kappenvariante B3 ist der geringere Klebstoffverbrauch. Tests zeigten, dass der übergroß dimensionierte Hohlraum in der Kappe für eine gute Verteilung des Klebstoffs um das Anschlusskabel herum nicht notwendig ist. Zudem ist der ausgewählte Klebstoff ab einer Stärke von einigen Millimeter nicht mehr flexible, sodass andere Probleme, wie zum Beispiel eine Delamination der OPV-Verpackung rundum der Anschlusskappe, auftreten. Aus diesen Gründen wurde das Hohlraumvolumen um das Kabel stark reduziert und beim Anpressen der mit Klebstoff befüllten Kappe wird der Klebstoff nur noch als dünne Schicht auf dem Untergrund appliziert. Somit konnten auch die Klebstoffkosten um einen Faktor zwei reduziert werden.

### 3.2.3. Flachkontakte (Variante C)

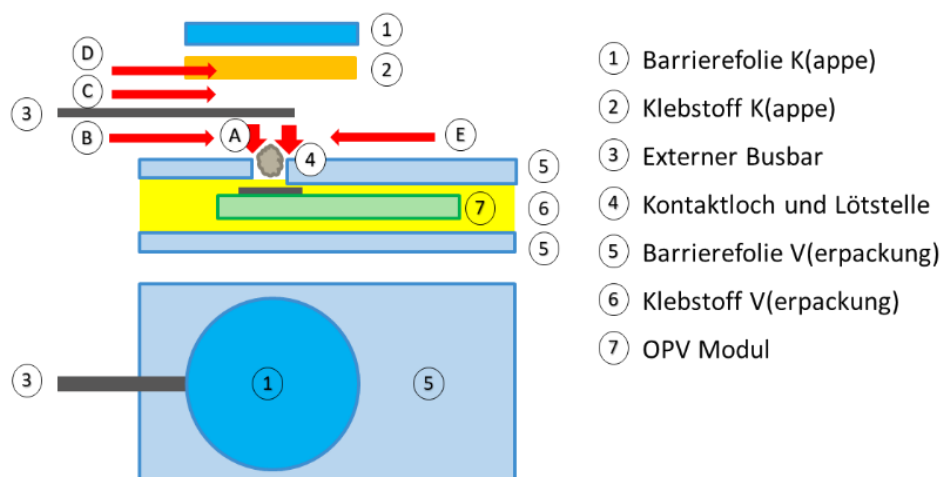
Sehr dünne Anschlusskappen konnten bislang nicht mittels der beiden vorher vorgestellten Verfahren – Spritzgießen (A) und Aufkleben (B) – hergestellt werden. Zudem waren Kappen der Varianten A und B auf runde Anschlusskabel ausgelegt. Eine dritte Variante C wurde deswegen angestrebt und untersucht, wodurch zum Beispiel Flachbandkabel wasser- und sauerstoffdicht auf dem OPV-Modul appliziert werden können. Flachere Anschlusspunkte für die OPV können zudem vorteilhaft für die nahtlose Integration von Modulen direkt in Gewächsfolien sein. Tatsächlich gibt es heutzutage dünne flexible Folienkabel (engl. flexible flat cable, FFC), die aus einem flexiblen Kunststoffträgermaterial und meistens geätzten Kupferleiterbahnen bestehen. Deren Enden können zudem direkt auf dafür bestimmte Steckverbinder aufgesteckt werden, welche wiederum auf einer starren Platine oder aber flexiblen Leiterplatten (engl. flexible printed circuit, FPC) angelötet sind. Nichtsdestotrotz weisen diese marktüblichen Steckverbinder für Folienkabel zwei großen Nachteile auf. Erstens haben sie trotz der geringen Folienkabelstärke eine wesentliche Profilhöhe im Bereich von 1 bis 2 mm. Zweitens werden jene Steckverbinder hauptsächlich innerhalb von Gerätegehäusen verwendet, sodass sie nicht wasserdicht ausgelegt sind. Außerdem gibt es keine Notwendigkeit, solche Anschlusspunkte vor Eindringen von Sauerstoff zu schützen, was aber bei OPV-Modulen zu einem Ausbleichen der aktiven Schicht führen würde. Aus diesen Gründen wurden flachen Anschlusspunkte (Kappenvariation C) eigens von Grund auf neu entwickelt.

Der erste Schritt hinzu flacheren Anschlusspunkten ist die Verwendung von dünneren (verzinneten) Kupferbusbars anstelle dicker Kabel mit 2,4 mm Außendurchmesser (wie bei den Anschlussvarianten A und B). Hierdurch kann die Gesamthöhe der Anschlusskappe um mehr als 2 mm reduziert werden. Oberhalb des Kabels in den Varianten A und B befinden sich noch etwa 2 mm Kappenmaterial (siehe Abbildung 6). Bei Variante A verhindert dieser dickere Auftrag, dass das Kabel bzw. die Lötstelle versehentlich aus der Vergussmasse herausragt. Die vorgefertigte Anschlusskappe B benötigt ebenso eine Mindestwandstärke für ihre Stabilität sowie eine Klebstoffschicht zwischen Lötstelle und der Kappenoberseite für eine gute Abdichtung. Bei der dünnen Anschlussvariante C wird für die Abdeckung der Lötstelle jedoch eine nur ca. 0,1 mm dünne Barrierefolie eingesetzt, wodurch die Gesamthöhe der Anschlusskappe um weitere 2 mm reduziert werden kann. Durch diese zwei Änderungen beträgt die Höhe des Flachkontaktes insgesamt nur wenige zehntel Millimeter (siehe Abbildung 6 rechts).



**Abbildung 6:** Höhenvergleich der Anschlussvariante A (links; 4,4 mm), B (mittig; 4,5 mm) und C (rechts; 0,7 mm).

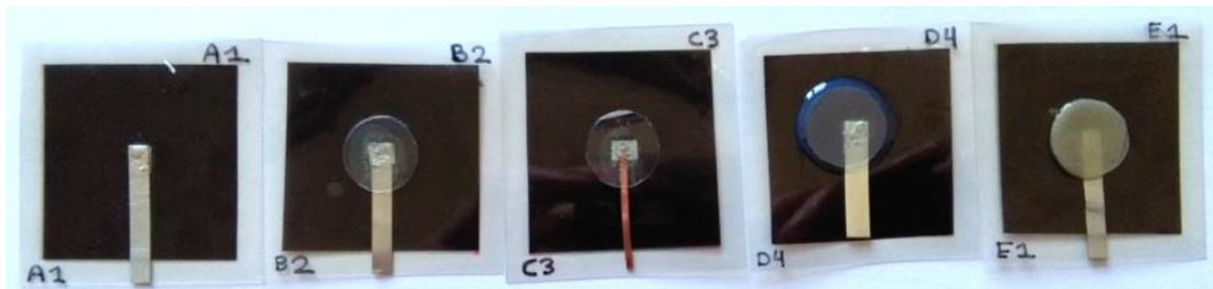
Der Aufbau der ersten Flachkontakte ist in Abbildung 7 dargestellt. In diesem Querschnitt ist das OPV-Modul zu sehen, welches zwischen zwei Barrierefolien „B“ mittels eines flüssigen Klebstoffes „B“ einlaminiert ist. Die Barrierefolie sowie der Klebstoff schützen vor Eindringen von Wasserdampf und Sauerstoff in die Verpackung. Für die elektrische Kontaktierung des Moduls muss jedoch ein sogenanntes Kontaktloch in einer der Barrierefolien „B“ eingebracht werden, an dessen Stelle der externe flache Busbar angelötet werden kann. Dieses Kontaktloch verursacht einen kurzen Diffusionsweg für Wasserdampf und Sauerstoff zum OPV-Modul hin (siehe roter Pfeil „A“ in Abbildung 7), wo dann der eingedrungene Sauerstoff die aktive Schicht ausbleichen kann. Mehrere Tests zeigten aber, dass das OPV-Modul über mehrere Monate nicht ausbleicht, wenn das Kontaktloch vorsichtig ausgeführt wird ohne dabei die Barrierefolie ringsherum zu delaminieren. Sobald jedoch der externe Busbar angelötet wird, kann die Verklebung der Barrierefolie schnell durch Erwärmung und Druck angetastet werden, so dass in den Langzeittests einige dieser Proben tatsächlich wegen eingedrungenen Sauerstoffs ausbleichten.



**Abbildung 7:** Aufbau eines Flachkontaktes und verschiedene mögliche Diffusionswege für Wasserdampf und Sauerstoff (angedeutet mit roten Pfeilen) als Querschnitt (oben) und Draufsicht (unten).

Das Eindringen von Sauerstoff konnte verhindert werden, indem eine kreisrunde Kappe (siehe „K“ in Abbildung 7), welche ebenso aus Barrierefolie besteht, über die Lötstelle geklebt wurde.

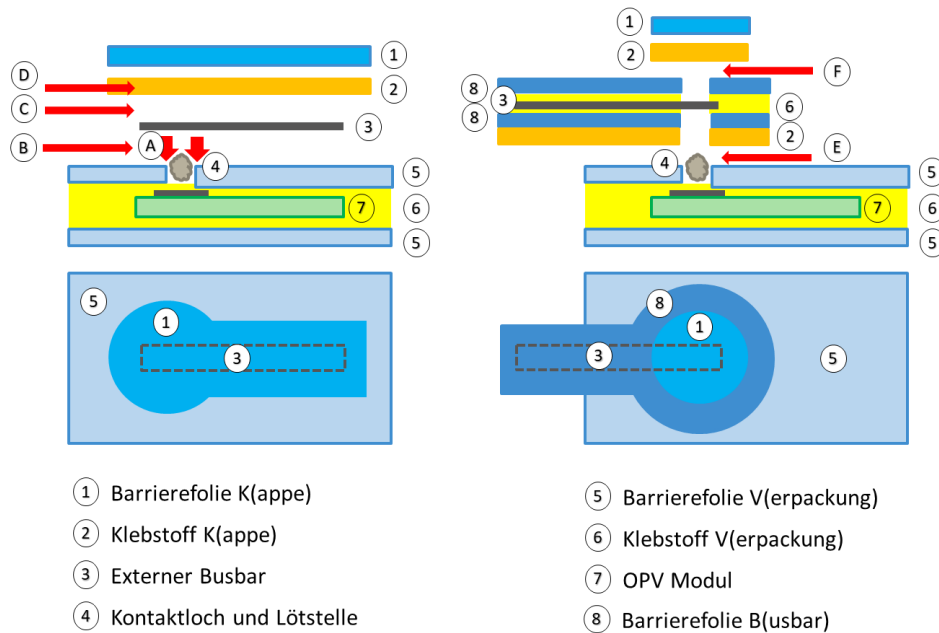
Hierzu wurde zwei verschiedene Klebstofftypen untersucht. Zum einen wurden zwei beidseitig haftende Klebefolien (engl. pressure sensitive adhesive transfer films) verwendet, wobei sich die Polymerklassen des Klebstoffes unterschieden. Zum anderen wurden zwei verschiedene flüssige Klebstoffe mit unterschiedlicher Viskosität und chemischer Zusammensetzung getestet. Nachdem die Busbars angelötet und die Kappen aufgetragen waren, wurden die OPV-Muster (siehe Abbildung 8) einem Langzeittest (d.h. Dauerbeleuchtung) unterworfen. Ziel dieses Experiments war es, herauszufinden, welche Eigenschaften der Klebstoff für eine gute Abdichtung um dem Busbar herum haben muss. OPV-Muster mit angelötetem Busbar aber ohne Flachkappe dienten als Referenz.



**Abbildung 8:** OPV-Muster mit unterschiedlichen, angelöteten Busbars und verschiedenen Klebstoffen zum Einsatz in Flachkontakten. Von links nach rechts: Referenz (keine Kappe), Klebefolie 1, Klebefolie 2, dünnflüssiger Klebstoff und pastöser Klebstoff.

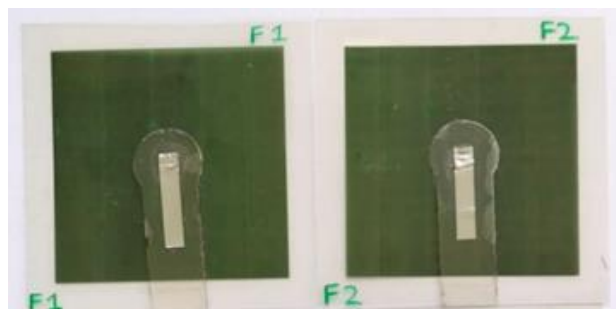
Erste Ergebnisse dieses Langzeittests nach 1000 Stunden Dauerbeleuchtung zeigten, dass drei von vier Referenzmustern ohne Kappe ausbleichten, d.h. dass Sauerstoff über Diffusionsweg „A“ (siehe Abbildung 7) einfach in die Verpackung eindringt. Eine extra Flachkappe reduziert Diffusionsweg „A“, da nur noch 50 % bis keine der untersuchten Muster ausbleichten. Die beste Abdichtung (keine ausgebleichten Proben) wurde mit dünnflüssigem Klebstoff erzielt, welcher den Busbar sehr gut einbettet, eine gute Haftung auf der Barrierefolie („K“) aufweist und einen niedrigen intrinsischen Diffusionskoeffizienten hat, sodass Diffusionswege in der Reihenfolge „B“ und „C“, „E“ und „D“ unterbunden werden. Wird jedoch ein zu pastöser Klebstoff verwendet, dann wird der Busbar nicht ausreichend ummantelt, sodass bei der Hälfte der besagten Proben Sauerstoff über Diffusionswege „B“ und „C“ eindringen konnte. Eine Wiederholung dieses Experimentes bestätigte die gemachten Beobachtungen.

Trotz der guten Ergebnisse mit dem dünnflüssigen Klebstoff ist eine gute Abdichtung vor allem mit den Klebefolien erwünscht, weil man solche „Flachkappen“ im Vorfeld fertigen kann, indem die Klebefolie auf Verpackungsfolie „K“ laminiert und im Nachhinein in der richtigen Form ausgeschnitten wird. Der Kunde kann diese Art Flachkappen sogar selbst durch Anpressen auftragen. Allerdings wurde ein Viertel bzw. die Hälfte der Proben mit den zwei verschiedenen Klebefolien infolge der Dauerbeleuchtung stark ausgebleicht. Alle Diffusionswege „B“ bis „E“ werden also unzureichend verhindert. Da sich keine Klebefolie (Schicht 7) zwischen Barrierefolie „V“ und dem externen Busbar befindet, wird vor allem Weg „B“ schlecht abgedichtet sein (siehe Abbildung 7). In einem weiteren Experiment wurde daher vor allem das Design der Flachkontakten mit Klebefolien optimiert. Hierbei entstanden die Varianten wie in Abbildung 9 skizziert.



**Abbildung 9:** Flachkontakte mit Design C1 (links) und Design C2/C3 (rechts).

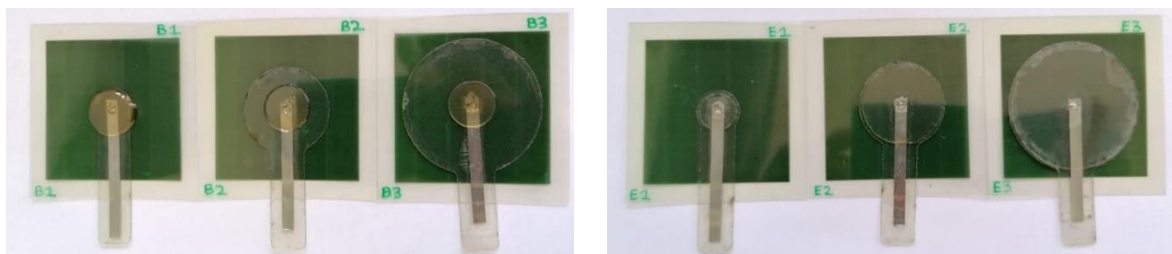
In der ersten Variante C1 wird der problematische Diffusionsweg „B“ komplett beseitigt. Der externe Busbar wird angelötet und danach von allen Seiten mit Klebefolie (Schicht 2) und Barrierefolie (Schicht 1) überdeckt (siehe Abbildung 9 links). Demnach ist der Busbar rundherum versiegelt (siehe Abbildung 10) und Sauerstoff kann nur noch über Wege „D“ bzw. „E“ ins Modul gelangen. Sollte die Klebefolie einen niedrigen Diffusionskoeffizienten haben, dann ist die Diffusion entlang Weg „D“ sehr gering. Wenn zudem die Folie außerdem gut auf der Verpackung (Schicht 5) haftet, wird Diffusionsweg „E“ ebenso minimiert bzw. verhindert. Flachkontakte wurden mit vier unterschiedlichen Klebefolien hergestellt und tatsächlich blieble keine dieser Proben während der 1700 Stunden Dauerbeleuchtung aus. Der Überlapp zwischen Klebefolie und Barrierefolie „V“ kann auch nur wenige Millimeter betragen, um eine Sauerstoffdiffusion zu unterbinden.



**Abbildung 10:** Flachkontaktvariante C1 mit Klebefolie, wobei der externe Busbar vollständig ummantelt ist.

Obwohl Variante C1 zeigt, dass Klebefolien tatsächlich für Flachkontakte geeignet sein können, ist dieses Design nicht gerade zweckmäßig, da der Busbar quasi niemals komplett zwischen Modulverpackung und Barrierefolie eingeschlossen werden kann. Außerdem ist der externe Busbar nicht elektrisch isoliert. Bei der Weiterentwicklung von C1 wurde der externe Busbar

zwischen zwei Barrierefolien (Schicht 8) mittels Klebstoffes „V“ (Schicht 6) laminiert. Hierauf wurde die Klebefolie (Schicht 2) kaschiert und das fertige Laminat zugeschnitten, in der Form wie in Abbildungen 9 (Design C2/C3) und 11 dargestellt. Das Busbarlaminat ist tatsächlich den herkömmlichen flexiblen Folienkabeln sehr ähnlich. In die obere und untere Barrierefolie werden Löcher eingebracht, um den Busbar freizulegen, sodass letzterer durch das Kontaktloch „4“ in Abbildung 9 angelötet werden kann. Das oberste Loch im Busbarlaminat, das für das Anlöten benötigt wurde, muss allerdings mit einer Endkappe abgedichtet werden. Hierzu wird ein Kreis aus Barrierefolie aufgeklebt entweder mit einem flüssigen Klebstoff (Variante C2) oder mittels einer Klebefolie (Variante C3). Für den Langzeittest wurden Proben mit unterschiedlichem Durchmesser des Busbarlaminats und der Endkappe sowie mit verschiedenen Klebefolien hergestellt (siehe Abbildung 11). Keine der Proben war nach 1700 Stunden Dauerbeleuchtung ausgebleicht. Auch dieses Experiment bestätigte die Effektivität der Flachkontakte. Sogar die schmalen Flachkontakte bieten genügend Widerstand gegen Sauerstoff, so dass die Anschlussfläche minimiert werden kann.



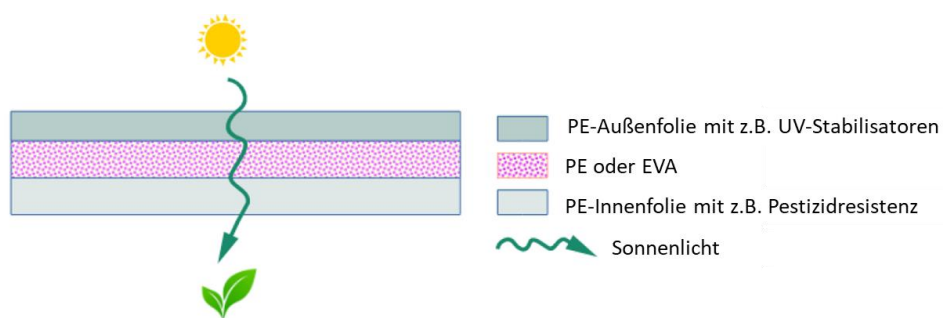
**Abbildung 11:** Flachkontaktvarianten mit Klebefolien, wobei die oberste Endkappe entweder mit einem flüssigen Klebstoff (linke drei Proben; Variante C2) oder mit einer Klebefolie fixiert wird (rechte drei Proben; Variante C3).

Variante C3 der Flachkontakte ist vielsprechend und basiert komplett auf vorfertigbaren und aufklebbaren Anschlusspunktelementen. Im Hinblick auf das ORION-Projekt war es allerdings noch nicht umsetzbar diesen Anschlusspunkt vor Ort am Gewächshaus zu applizieren, da der Busbar bei diesem Konzept noch angelötet werden muss und mehrere Arbeitsschritte involviert sind. Wünschenswert ist daher ein Flachkontakt, den man zum Beispiel in einem Schritt festpressen kann, wodurch gleichzeitig die elektrische Kontaktierung und eine Abdichtung gegen Wasserdampf und Sauerstoff hergestellt werden. Außerdem fehlen noch weiterführende Alterungstests (mit Feuchtwärme und Temperaturzyklen) um die Witterungsbeständigkeit und die kontinuierliche Dichtigkeit der Klebefolien zu bestätigen.

### 3.3. Integration von OPV-Modulen in Gewächshausfolien

Neben der Weiterentwicklung der Anschlusspunkte wurde im Rahmen des ORION-Projekts die Integration von OPV-Modulen in Foliengewächshäuser untersucht. Folientunnel bestehen in der Regel aus 100 bis 300 µm dicken Plastikfolien, die sich wiederum aus mehreren (oft zwischen 3 bis 8) Schichten zusammensetzen. Häufig werden hier Schichten aus Polyethylen (PE) und Ethylen-Vinylacetat-Copolymer (EVA) eingesetzt. In Abbildung 12 ist ein Querschnitt einer Gewächshausfolie vereinfacht dargestellt. Jede Schicht hat dabei einige Aufgaben:

1. Erhöhung der Reißfestigkeit und Durchstichfestigkeit
2. Erhöhte Antikratzfunktion
3. Längere Lebenszeit durch UV-Stabilisierung
4. Hohe Transparenz im sichtbaren Wellenlängenbereich (0,4 bis 0,7  $\mu\text{m}$ ) für das Pflanzenwachstum
5. Anpassung der UV-Transmission an Pflanzenbedürfnissen
6. Lichtstreuung für mehr diffusives Licht, um Sonnenbrand bei Pflanzen zu vermeiden
7. Temperaturkontrolle durch niedrige Transmission im kurzwelligen (0,8 bis 1  $\mu\text{m}$ ) und langwelligen (8 bis 14  $\mu\text{m}$ ) Infrarotbereich
8. Antistatbeffekt z.B. durch eine apolare und sehr glatte Außenoberfläche
9. Antibeschlag- und Betauungsschutz
10. Pestizidresistenz insbesondere gegen schwefel- und chlorhaltigen Pestizide

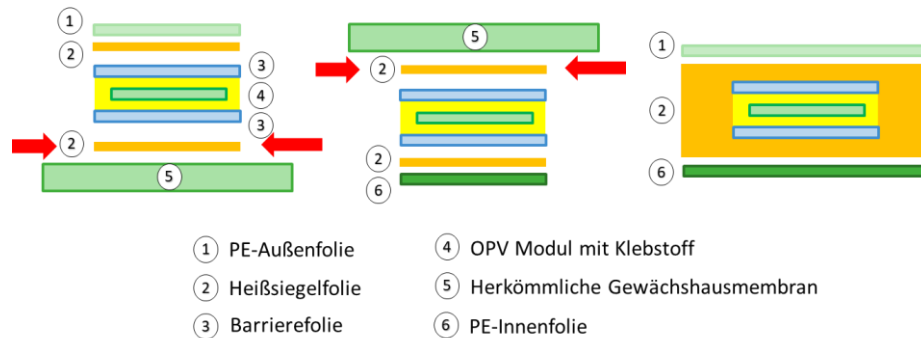


**Abbildung 12:** Vereinfachter Querschnitt einer Gewächshausfolie bestehend aus mehreren Einzelfolien.

Für eine Integration von OPV-Modulen in Gewächshausfolien wurden schwerpunktmäßig drei verschiedene Ansätze, wie auch in Abbildung 13 dargestellt, untersucht:

- A) Aufbringung auf der Außenseite einer (bestehenden) Folien
- B) Aufbringung auf der Innenseite einer (bestehenden) Folie
- C) Einbetten direkt in das Folienlaminat selbst

Die ersten beiden Integrationsvarianten erscheinen einfacher in der Ausführung, weil die Fertigung solcher OPV-Gewächshausfolien größtenteils von der Herstellung herkömmlicher Gewächshausfolien entkoppelt ist. Es müssen in einem letzten Schritt „nur“ die verkapselten OPV-Module mit der Gewächshausfolie verklebt werden. Allerdings besitzt die Verpackung eines OPV-Moduls nicht unbedingt die Eigenschaften, die zum Einsatz in einem Gewächshaus erforderlich sind, insbesondere nicht die vor genannten Aspekte 2, 5, 8, 9 und 10. Deswegen müssen wahrscheinlich extra Schichten über dem OPV-Modul appliziert werden, um den zusätzlichen Anforderungen gerecht zu werden (siehe Abbildung 13). Wenn die Module nicht vollflächig aufklebt werden, entstehen zudem Ränder worunter sich Dreck und Staub ansammeln können, wodurch eine Delamination der OPV-Module unter Windeinfluss erleichtert wird. Somit wäre eine vollflächige äußere Schutzschicht von Nöten, welches einem vollständigen Einbetten der OPV-Module gleichkäme.



**Abbildung 13:** Verschiedene Wege für die Integration von OPV-Modulen in Gewächshausfolien, u.a. die Aufbringung auf der Außenseite (links) oder Innenseite (Mitte), oder das Einbetten in das Folienlaminat (rechts). Rote Pfeile deuten Angriffspunkte für Dreck und Wind an, was zu einer Delamination der aufgeklebten Module führen kann.

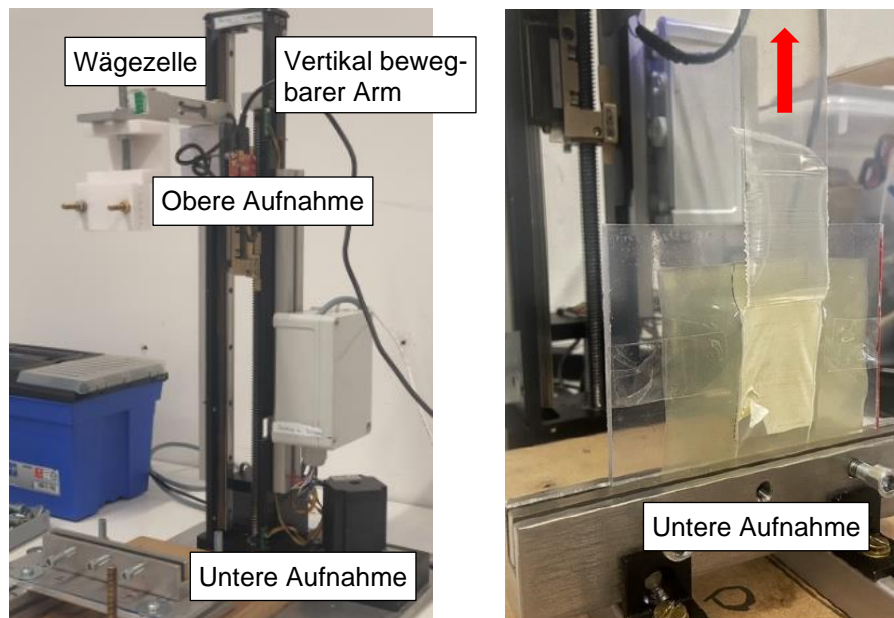
Aus oben genannten Gründen wurden die ersten Experimente auf ein vollständiges Einbetten der OPV-Module hin ausgerichtet. Hierdurch entsteht eine Laminatstruktur, wobei die eingesetzten PE-Außenschichten die richtigen Eigenschaften für einen Einsatz im Gewächshaus aufweisen. Für die Verklebung bzw. das Einbetten können unter anderem Heißeigelfolien, selbstklebende Folien oder flüssige (2-Komponenten) Klebstoffen verwendet werden. Bei der Herstellung klassischer Gewächshausfolien werden die einzelnen PE- und EVA-Schichten entweder direkt aufeinander koextrudiert oder einzeln extrudiert und anschließend mit Temperaturunterstützung zusammenlaminiert. Deshalb wurden die ersten Integrationsversuche an die bereits bestehenden Herstellungsverfahren angelehnt.

Schichten aus EVA werden oft für Gewächshausfolien verwendet, um die Transmissionseigenschaften zu ändern und die Reißdehnung bzw. Durchstichfestigkeit zu erhöhen. EVA wird demgegenüber in der PV-Industrie häufig als Heißeigelfolie eingesetzt, um die Solarzellen einzubetten. Grund ist die bessere Haftung von EVA im Vergleich zu PE oder anderen thermoplastischen Polyolefinen (TPOs), welche keine funktionellen Gruppen und somit auch keine hohen Oberflächenenergien besitzen. Dies wurde auch durch erste Tests bestätigt, bei denen verpackte OPV-Module mit einer PET-ähnlichen Außenseite gegen EVA-Folien und die PE-Oberfläche verschiedener Gewächshausfolien laminiert werden sollten. Die PE-Folien haften selbst bei sehr hohen Laminationstemperaturen bis 160°C nicht an den OPV-Modulen. Bei diesen hohen Temperaturen fand vielmehr eine Art Blasenbildung (siehe Abbildung 14) im OPV-Modul statt. Die Temperaturstabilität der OPV-Module (primär infolge eines Erweichens der verwendeten PET-Folien) begrenzt ohnehin die Laminationstemperatur auf zirka 120°C. Unterhalb einer Prozesstemperatur von 110°C ist die Haftung von EVA wiederum ungenügend, sodass verschiedene Heißeigelfolien im Temperaturbereich von 110°C bis 125°C geprüft wurden. Eine Verweildauer der Muster in der beheizbaren Presse von etwa 8 bis 10 Minuten reichte für eine gute Haftung aus.

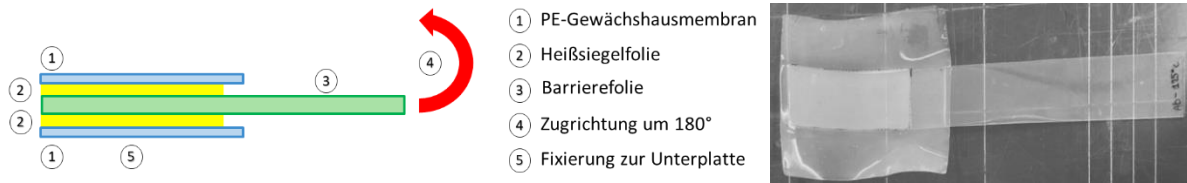


**Abbildung 14:** Blasenbildung (Delamination) in OPV-Modulen bei zu hohen Laminationstemperaturen von 150°C (links) und 160°C (rechts).

Die Haftung zwischen einzelnen Schichten in einer Laminatprobe wurde mittels eines selbstgebautes Aufbaus gemessen. Der Aufbau besteht aus einem beweglichen Arm, welcher von unten nach oben mit konstanter Geschwindigkeit bewegt wird. Am Arm befindet sich eine Wägezelle, welche die Zugkraft an der Probe misst. Eine Seite der Probe wird unten am Aufbau festgeklebt bzw. -geklemt, während die andere Seite an der Wägezelle mittels einer Folieneaufnahme befestigt wird (siehe Abbildung 15). An den ersten Laminatproben wurden 180° Schältest durchgeföhrt (siehe Abbildung 17, rechts), wobei eine Seite um 180° umgebogen und nach oben mit einer konstanten Geschwindigkeit von 5 mm/s abgezogen wurde. Die Proben bestanden aus einem langen Streifen aus Barrierefolienlaminat laminiert zwischen zwei PE-Gewächshausfolien mittels zweier Schichten Heißsiegelfolie, wie in Abbildung 16 dargestellt.

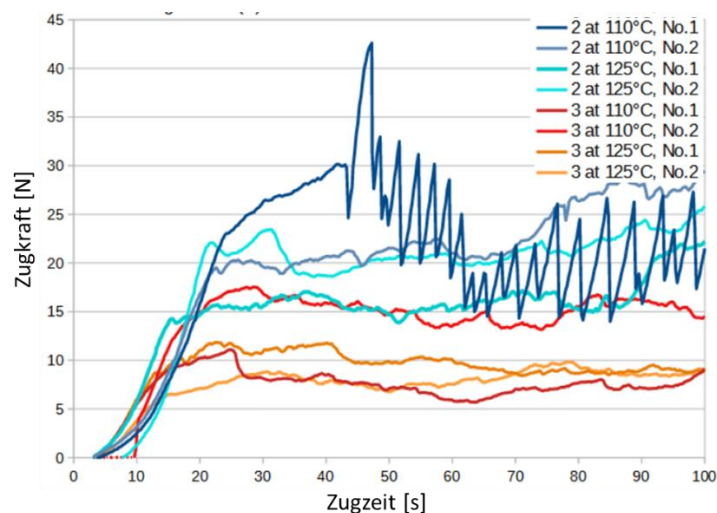


**Abbildung 15:** Aufbau für Schältest (links) und eine eingebaute Laminatprobe, wobei eine Seite zur vertikalen Unterplatte fixiert ist und die andere Seite nach oben abgezogen wird (roter Pfeil, rechts)



**Abbildung 16:** Querschnitt (links) und Draufsicht (rechts) der ersten Laminatproben.

Die ersten Testmuster wurden bei zwei unterschiedlichen Temperaturen und unter Verwendung von zwei verschiedenen EVA-Folien hergestellt. Unterhalb einer Laminationsemperatur von 110°C ist die Haftung von EVA ungenügend, sodass die Heißsiegelfolien nur im Temperaturbereich von 110°C bis 125°C geprüft wurden. Eine Verweildauer der Muster in der beheizbaren Presse von etwa 8 bis 10 Minuten reichte für ein komplettes Aufschmelzen der Heißsiegelfolien aus. Abbildung 17 zeigt einige der Ergebnisse der 180°-Schältesten, wobei die Zugkraft gegen die Zugzeit (korreliert mit dem Zugweg) aufgetragen ist. Die Schältesten ist die Zugkraft normiert auf die Breite der Probe (Klebfugenbreite war 30 mm). Wie in Abbildung 17 zu sehen, variierte diese zwischen 0,26 und 0,73 N/mm. Es gab hier einen deutlichen Unterschied in der Schältesten der beiden EVA-Folien (Vergleich der blauen mit den roten Kurven), jedoch ist diese Differenz für unterschiedliche Laminationstemperaturen weniger stark ausgeprägt. Daher wurden standardmäßig alle weiteren Laminatproben 8 Minuten lang bei 120°C in der Presse erhitzt und während weiterer 10 Minuten in der Presse unter Druck abgekühlt.

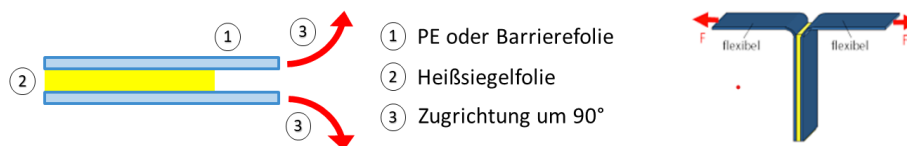


**Abbildung 17:** 180°-Schältesten an OPV-Gewächshauslaminaten hergestellt unter Verwendung zweier unterschiedlicher EVA-Folien und Laminationstemperaturen.

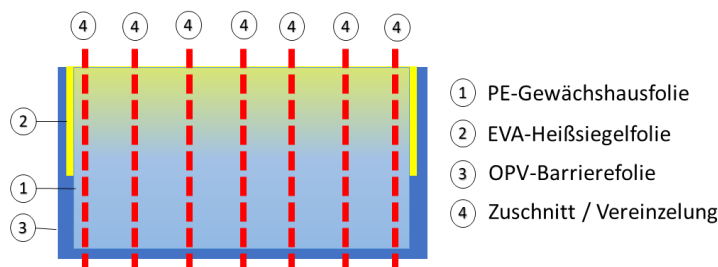
Die vorherigen Laminatmuster zeigten, dass die Haftung erstens vom EVA-Folientyp abhängt und zweitens die Barrierefolie bei allen Laminatproben frei von EVA-Resten war. Letzteres deutet darauf hin, dass die Versagensstelle immer zwischen EVA und der OPV-Barrierefolie war. Deshalb wurden in einem weiteren Schritt drei verschiedene EVA-Folien untersucht, um die Haftung zwischen EVA und OPV-Modul zu erforschen:

- EVA1 ist ein Standard EVA der PV-Industrie ohne besondere (chemische) Adaption
- EVA2 besteht aus einem polarerer Ethylen-Vinylacetat-Maleinsäureanhydrid-Terpolymer
- EVA3 wird in der PV-Industrie verwendet und besitzt Silanseitengruppen

Durch die chemische Modifikation von EVA in den Folien EVA2 und EVA3 wird eine bessere Haftung zwischen der PET-ähnlichen Oberfläche des OPV-Moduls und der EVA-Heißsiegelfolie erwartet. Die nachfolgenden Schältestfestigkeitstests waren allesamt T-Schältests, wobei hier beide Enden der Probe um zirka 90° auseinandergezogen werden, wie in Abbildung 18 dargestellt. Die Laminatproben für jene Tests konnten etwas schneller hergestellt werden, indem sie aus einem größeren Masterlaminat zugeschnitten bzw. vereinzelt wurden, wie in Abbildung 19 skizziert. Die Lamine waren asymmetrisch aufgebaut: eine Seite PE-Gewächshausfolie, die andere Seite OPV-Barrierefolie und dazwischen EVA-Heißsiegelfolie.



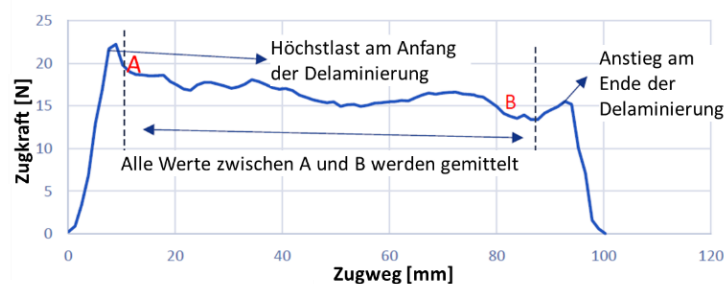
**Abbildung 18:** Probequerschnitt (links) und Zugrichtung (rechts) für einen T-Schälversuch.



**Abbildung 19:** Das Masterlaminat für einen T-Schältest kann nach der Laminierung in einzelne Laminatproben mit den Maßen 25 x 100 mm zugeschnitten werden. Die Klebelänge von EVA in dem Teststreifen beträgt etwa 50 mm.

Das schwächste Glied im Laminat ist die Verbindung zwischen der Heißsiegelfolie und dem OPV-Modul. Deshalb wurden Masterlamine (wie in Abbildung 19) mit den drei vorgenannten EVA-Folien hergestellt. Wie oben erwähnt, kann es aber durchaus sein, dass auch PE-Gewächshausfolien hinsichtlich chemischer Zusammensetzung, Oberflächenenergie und Rauigkeit unterschiedliche Oberflächen aufweisen, was wiederum die Haftung zur Heißsiegelfolie beeinflussen könnte. Sicherheitshalber wurden deshalb auch Lamine mit vier verschiedenen PE-Gewächshausfolien gefertigt, die nachfolgend mit GH1, GH2, GH3 und GH4 benannt werden. Obwohl die exakten Details dieser PE-Folien vom Hersteller nicht preisgegeben werden, kann dennoch untersucht werden, ob PE-Folien an sich überhaupt einen Einfluss auf die Haftung im Laminat haben. Ist das nicht der Fall, können weitere Haftungsprüfungen vereinfacht und mit nur einer vorselektierten PE-Folie als Referenz durchgeführt werden.

Abbildung 20 zeigt, wie die Schälfestigkeit aus der Auftragung der Zugkraft über den Zugweg berechnet wird. Häufig befinden sich am Anfang (Punkt A) und am Ende (Punkt B) der Messung ein Ausreißer in der Zugkraft. Dazwischen ist die Zugkraft relativ konstant und wird über diesem Bereich gemittelt und auf die Probenbreite (in diesem Fall 25 mm) normiert, um die Schälfestigkeit zu erhalten.



**Abbildung 20:** Bestimmung der Schälfestigkeit einer Laminatprobe als Mittelwert aus Zugkraft gemessen zwischen den „Ausreißern“ A und B.

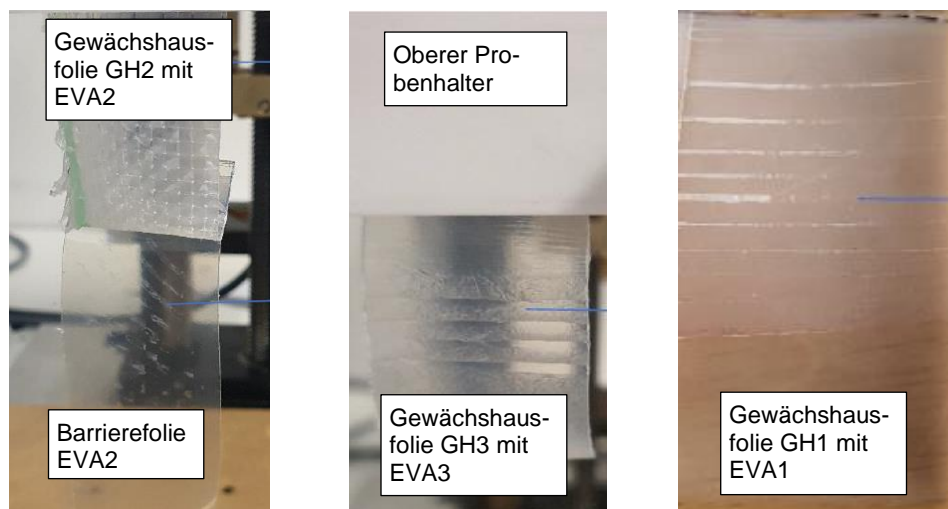
Tabelle 3 fasst die Schälfestigkeiten aller Kombinationen aus PE-Gewächshausfolien und EVA-Folien zusammen, wobei jeweils mit der gleichen OPV-Barrierefolie getestet wurde. Die „Bruchstelle“ befand sie bei allen untersuchten Proben immer zwischen der EVA-Schicht und der Barrierefolie. Im Umkehrschluss heißt das, dass die Schälfestigkeit für die Verbindung zwischen PE-Gewächshausfolie und EVA zufriedenstellend ist. Vergleicht man nun die Schälfestigkeit aller Proben der gleichen Gewächshausfolie (z.B. GH2), so ist eine deutliche Wirkung der EVA-Variante auf die Haftung zur Barrierefolie zu sehen. Wie erwartet weist EVA1 (ohne besondere Eigenschaften) eine schlechte Haftung zu der recht polaren Barrierefolie auf. Die chemisch modifizierten EVAs mit erhöhter Polarität haften dahingegen um ein Vielfaches besser, wobei EVA3 besonders gut abschneidet. Diese Reihenfolge spiegelt sich ebenfalls bei den anderen Gewächshausfolienkombinationen wider.

**Tabelle 3:** T-Schälfestigkeit in N/mm gemessen für verschiedene Laminatproben als Kombination aus EVA-Folientyp EVA1 bis EVA3 und PE-Gewächshausfolien GH1 bis GH4. Werte hierunter sind Mittelwerte von 3 bis 6 Proben unter Berücksichtigung der Standardabweichung. (R) steht für ein regelmäßiges Messwertrauschen bei der Bestimmung der Zugkraft.

	GH1	GH2	GH3	GH4
EVA1	0,18 ± 0,05 (R)	0,35 ± 0,09 (R)	0,12 ± 0,03	0,16 ± 0,03 (R)
EVA2	0,56 ± 0,13	0,73 ± 0,13 (R)	0,62 ± 0,05	1,02 ± 0,14
EVA3	Nicht geprüft	1,45 ± 0,11	1,13 ± 0,24 (R)	1,12 ± 0,10

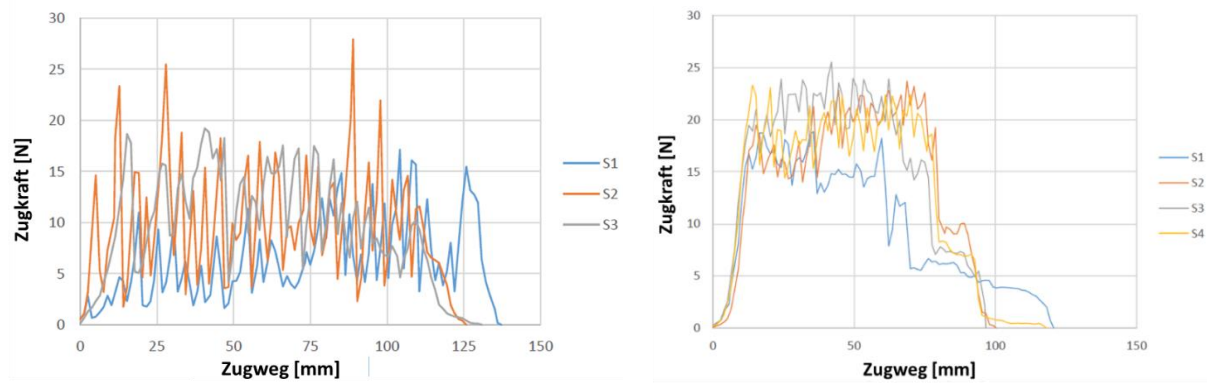
In Tabelle 3 ist noch eine weitere Tendenz sichtbar: Die Gewächshausmembran scheint eine (noch unerklärliche) Rolle in Bezug auf die Schälfestigkeit des Laminats zu spielen. Zum Beispiel wird eine bessere Haftung eher mit GH2 erzeugt. Allerdings geben die oben genannten

T-Schältests nur die Haftung zwischen EVA und Barrierefolie und nicht zwischen EVA und PE-Membran wieder. Die offene Frage lautet daher: Wie kann die PE-Membran die Haftung auf der anderen Seite der Laminatprobe beeinflussen (siehe dazu Abbildung 18 links)? Als offensichtlicher Unterschied in den Folien kann nur genannt werden, dass GH2 ein geflochtenes PE-Material war (Abbildung 21 links), während die anderen drei Folien eine glatte Oberfläche aufwiesen. Im Gegensatz zu vielen anderen Laminatproben, gibt es bei der Variation GH2 mit EVA2 sehr kleine Spuren von EVA auf der Barrierefolie (Abbildung 21 links), was darauf hindeutet, dass die Haftung im ähnlichen Flechtmuster sehr gut ist. Möglicherweise bewirkt die unebene Struktur von GH2 während der Lamination lokale Stellen mit erhöhtem Druck, welche wiederum die Haftung fördern.



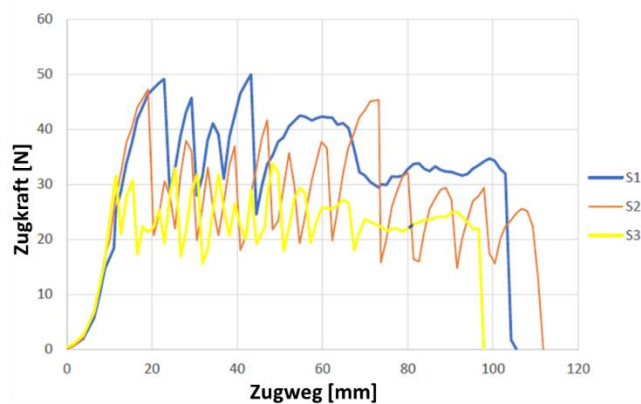
**Abbildung 21:** Laminatproben nach dem T-Schältest; links ist eine Probe mit GH2 und EVA2, mittig eine Probe mit GH3 und EVA3, und rechts die Kombination aus GH1 und EVA1.

Außer der Unterschiede in der Schälfestigkeit gibt es auch ein unterschiedliches Verhalten beim Abschälen. Bei manchen Kombinationen aus EVA-Heißsiegelfolie und PE-Gewächshausfolie ist ein regelmäßiges Messwertrauschen bei der Bestimmung der Zugkraft zu verzeichnen. Dieses Verhalten ist exemplarisch in Abbildung 22 dargestellt. Der in Abbildung 22 rechts dargestellte Messverlauf gehört zur Kombination EVA2 mit GH2, bei der geringe Rest EVA auf der Barrierefolie sichtbar waren (siehe Abbildung 21 links). Die regelmäßigen Ausreißer nach oben in der Zugkraft entsprechen daher vermutlich den äquidistanten Stellen mit EVA-Resten.



**Abbildung 22:** Stark fluktuierende Zugkraft gemessen für mehrere Laminatproben der Variation EVA1 mit GH2 (links) und der Variation EVA2 mit GH2 (rechts).

Des Weiteren wurde ein ähnliches Messwertrauschen für die Kombination EVA3 mit GH3 beobachtet (Abbildung 23). Allerdings scheint die Ursache für diese Schwankungen eine andere zu sein. In Abbildung 21 Mitte sieht man das dazugehörige und regelmäßige Streifenmuster in der abgezogen PE-Folie samt EVA-Folie. Auch für die Variante EVA1 mit GH1 wurde ein ähnliches Streifenmuster in der Heißsiegelfolie beobachtet (siehe Abbildung 21 rechts). Die Barrierefolie war in beiden Fällen frei von jeglichen EVA-Resten. Der Verdacht liegt nahe, dass ein Zusammenhang besteht zwischen jenem Muster und der Fluktuation in der Zugkraft. Allerdings ist bislang unbekannt, wie ein solches regelmäßiges Muster beim Abschälen entsteht.

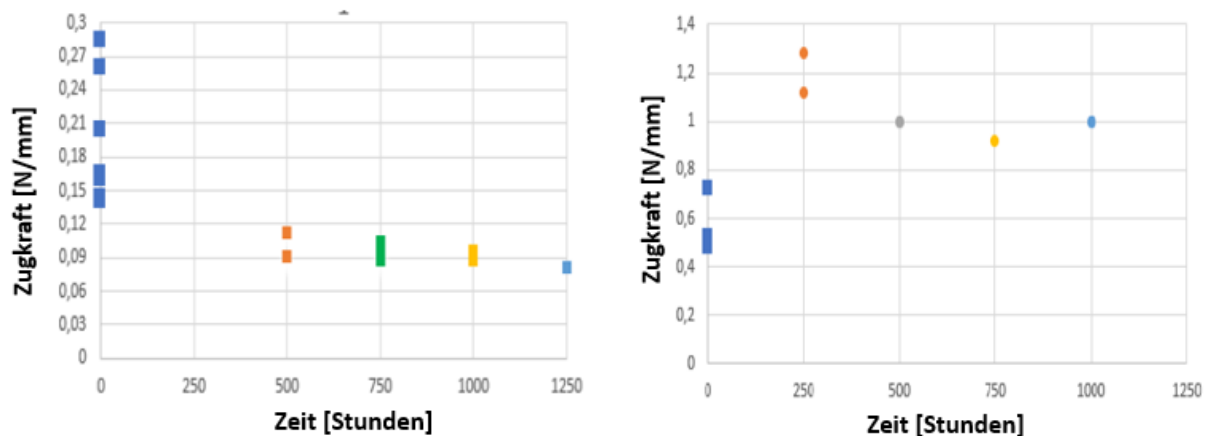


**Abbildung 23:** Fluktuierende Zugkraft bei den Laminatproben bestehende aus EVA3 und GH3.

Eine ausreichende Anfangshaftung zwischen dem PE-Außenfilm und der Barrierefolie des OPV-Moduls mit manchen EVA-Heißsiegelfolien als Haftschrift ist demnach möglich. Daher wurden weitere Laminatproben mit folgendem Aufbau hergestellt: PE-Gewächshausfilm (GH) / EVA-Haftschrift / OPV Barrierefolie (BF). Insgesamt wurden vier unterschiedliche Gewächshausfilme (GH1 bis GH4) und zwei verschiedene EVA-Heißsiegelfolien (EVA1 und EVA2) und deren Kombinationen geprüft. Pro Variation wurden mehrere identische Muster für Zugversuche gefertigt. Alle Lamine wurden bei 120°C für 8 Minuten gefolgt von einer 10-minütigen Abkühlung unter Aufrechterhaltung des Laminationsdrucks hergestellt. besagte Proben wurden anschließend beschleunigt im Klimaschrank bei 65°C und 85% relativer Feuchte gealtert, um die Beständigkeit der Anfangshaftung im Laminat zu überprüfen. In fixen Zeitintervallen

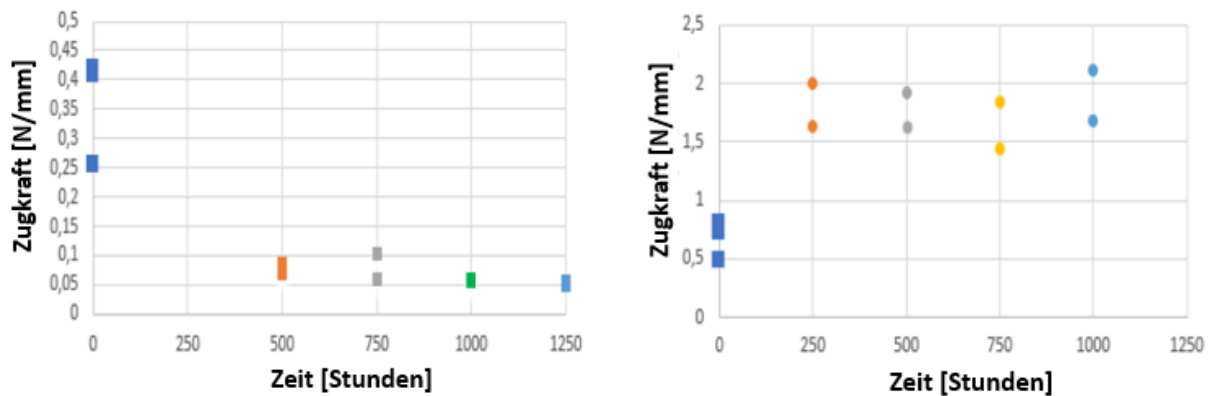
wurden einige Proben dem Klimaschrank entnommen und deren Haftung mittels eines 180°-Schältestes gemessen.

Abbildung 24 zeigt den Verlauf der Haftung von Laminaten basierend auf Gewächshausfilm GH1 und den zwei EVA-Folien EVA1 und EVA2. Abgesehen von der auffälligen Streuung in der Anfangshaftung für das Laminat GH1/EVA1/BF, waren die Messwerte reproduzierbar. Bei besagten Mustern fand eine Delaminierung an der Grenzfläche zwischen der EVA-Schicht und der Barrierefolie statt. Die schon zu Anfang geringe Haftung von EVA1 nahm in den 1250 Stunden Testzeit weiter kontinuierlich ab. Demgegenüber blieb die höhere Haftung der EVA2-basierten Proben im Test relativ konstant. Die Haftung verbesserte sich sogar in den ersten 250 Stunden in der Klimakammer. Dieser Effekt von EVA2 wurde auch in Kombination mit anderen Gewächshausfilmen beobachtet. Alle gealterten Laminatmuster sahen nach den Tests optisch gut aus und zeigten keine Vergilbung oder Blasenbildung.



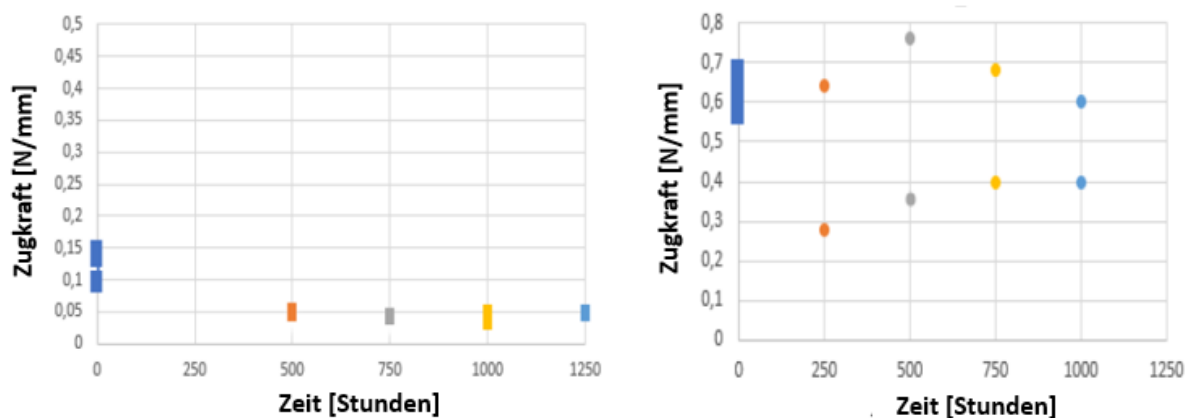
**Abbildung 24:** Veränderung der Haftung über die Zeit als Folge eines 65°C/85% Feuchte-Wärme-Tests. Der Laminataufbau war: GH1 / EVA1 / BF (links) und GH1 / EVA2 / BF (rechts).

Der Alterungstest wurde mit Gewächshausmembran GH2 wiederholt. In Kombination mit EVA1 wurde erneut eine schlechte Haftung festgestellt, die im Feuchte-Wärme-Test auch wieder abnahm (siehe Abbildung 25). Demgegenüber war die Haftung der EVA2-Proben während des Tests sehr stabil und auch hier gab es wieder eine signifikante Verbesserung der Anfangshaftung. Im Zusammenspiel mit GH2 erhöhte sich diese sogar um einen Faktor 1,5 bis 2 im Vergleich zum GH1-Laminat (vgl. Abbildungen 24 und 25). Optisch sahen alle gealterten Laminatmuster nach den Tests wiederum gut aus und zeigten keine Vergilbung oder Blasenbildung.



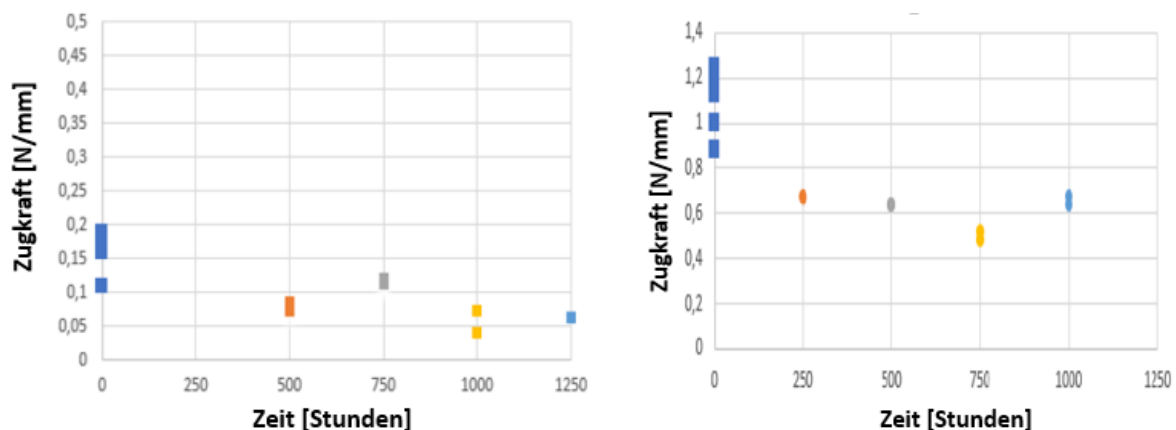
**Abbildung 25:** Veränderung der Haftung über die Zeit als Folge eines 65°C/85% Feuchte-Wärme-Tests. Der Laminataufbau war: GH2 / EVA1 / BF (links) und GH2 / EVA2 / BF (rechts).

Mit Gewächshausfolie GH3 wurden ebenfalls Lamine mit Hilfe von EVA1 und EVA2 gefertigt und bei 65°C und 85% relativer Feuchte gealtert. Wie bei den vorherigen Tests eignete sich EVA1 schlecht als Haftschrift (siehe Abbildung 26 links). Die Haftung der EVA2-Proben betrug vor dem Alterungstest im Mittel 0,65 N/mm und war damit vergleichbar mit den Laminaten basierend auf den Gewächshausfolien GH1 und GH2. Die Streuung in der EVA2-Haftung infolge der ALT-Tests war bei der Folie GH3 leider recht groß. Dennoch ist die geringere Haftung im Zusammenspiel mit GH3 im Vergleich zu GH1 und GH2 deutlich zu erkennen (vgl. Abbildungen 24, 25 und 26). Alle gealterten Laminatmuster sahen nach den Tests optisch gut aus und zeigten keine Vergilbung oder Blasenbildung.



**Abbildung 26:** Veränderung der Haftung über die Zeit als Folge eines 65°C/85% Feuchte-Wärme-Tests. Der Laminataufbau war: GH3 / EVA1 / BF (links) und GH3 / EVA2 / BF (rechts).

Schlussendlich wurden auch noch Lamine mit Gewächshausfolie GH4 hergestellt. Eine bessere Haftung von EVA1 war auch in dieser Kombination nicht erkennbar (siehe Abbildung 27 links). Die EVA2-Proben hingegen schnitten hinsichtlich Anfangshaftung mit einem Mittelwert von 1,1 N/mm am besten aller Kombinationen ab. Allerdings verringerte sich die Haftung im Alterungstest deutlich und war nach 1000 Stunden in der Klimakammer vergleichbar mit der Haftung der GH3-Lamine (vgl. Abbildung 26 und 27). Optisch sahen alle gealterten Laminatmuster nach den Tests wiederum gut aus und zeigten keine Vergilbung oder Blasenbildung.



**Abbildung 27:** Veränderung der Haftung über die Zeit als Folge eines 65°C/85% Feuchte-Wärme-Tests. Der Laminataufbau war: GH4 / EVA1 / BF (links) und GH4 / EVA2 / BF (rechts).

Insgesamt konnte durch die Schältests eine gute Haftung aller EVA-Heißsiegelfolien auf allen ausgewählten PE-Gewächshausfolien nachgewiesen werden, was im Hinblick auf den sehr ähnlichen chemischen Aufbau der beide Polymertypen, erwartet wurde. Es wurden dennoch sicherheitshalber verschiedene Kombinationen geprüft, da die Möglichkeit bestand, dass die Gewächshausfolien unterschiedliche Oberflächen hinsichtlich chemischer Zusammensetzung, Oberflächenenergie und/oder Rauheit aufweisen, was wiederum die Haftung zum EVA-Schmelzklebstoff beeinflussen könnte. Eine gute Adhäsion von EVA auf PE war auch noch nach beschleunigten Alterungstests an den Prüfkörpern gewährleistet, sodass EVA ein sehr geeignetes Material für die Integration von OPV in Gewächshausfolien zu sein scheint.

Die freie Wahl der EVA-Folie hinsichtlich Haftung auf PE ist enorm wichtig, denn die Schältests zeigten auch, dass die Laminatmuster immer zwischen EVA-Schicht und der PET-basierten OPV-Barrierefolie versagten. In diesem Zusammenhang spielte dann jedoch die genaue chemische Zusammensetzung der verschiedenen getesteten EVA-Folien eine ausgeprägte Rolle. Heißsiegelfolie EVA1 haftete zum Beispiel sehr schlecht auf der Barrierefolie, wohingegen die Adhäsion der Folien EVA2 und EVA3 wesentlich besser war. Auch anschließende beschleunigte Alterungstests mit EVA1 und EVA2 bestätigten diese Ergebnisse.

Infolge der deutlich besseren Adhäsion von EVA2 gegenüber EVA1, wurde in den nachfolgend diskutierten Lebensdauerermessungen nur noch EVA2 näher untersucht. Weitere Entwicklungsarbeit ist jedoch erforderlich, um einerseits EVA-Heißsiegelfolien mit sehr guten Adhäsionseigenschaften zu PET zu identifizieren und um andererseits bestimmen zu können, welche minimale Haftungswerte tatsächlich für die OPV-Integration notwendig sind.

### 3.4. Lebenszeitmessung (integrierter) OPV-Module

Im Projektverlauf wurden auch Lebensdauerermessungen an funktionalen OPV-Modulen integriert in Gewächshausfolie durchgeführt. Dadurch sollte eine mögliche Wechselwirkung zwischen der OPV und dem EVA-Schmelzklebstoff (genauer gesagt die durch Alterung von EVA gebildete Essigsäure) untersucht werden, wodurch die Modulleistung in Mitleidenschaft gezogen werden könnte. Die OPV-Testmodule wurden zunächst in Barrierefolie verpackt und danach zwischen zwei Gewächshausfolien GH4 mittels der Haftschiicht EVA2 laminiert (siehe

Abbildung 28 links). Der Aufbau GH4/EVA2/OPV/EVA2/GH4 entspricht dabei der anvisierten Schichtanordnung einer OPV-Gewächshausfolie. Als Referenz dienten standardmäßig in Barrierefolie verpackte OPV-Module (siehe Abbildung 28 rechts). Jeweils drei Referenz- und fünf Testmodule wurden daraufhin beschleunigt gealtert, einerseits bei 65°C und 85% relativer Feuchte (in einem Klimaschrank) und andererseits bei einer Temperatur von 65°C im Ofen. Von Zeit zu Zeit wurden alle Module vermessen und folgende Kenngrößen aus den Strom-Spannungskurven extrahiert: Kurzschlussstromdichte ( $J_{sc}$ ), Leerlaufspannung ( $V_{oc}$ ), Füllfaktor (FF) und die Effizienz (PCE). Für eine einfachere Vergleichbarkeit wurden alle Kenngrößen auf ihren Anfangswert normiert. Der Mittelwert und die Standardabweichung wurden pro Variation berechnet und gegen die Testzeit aufgetragen.

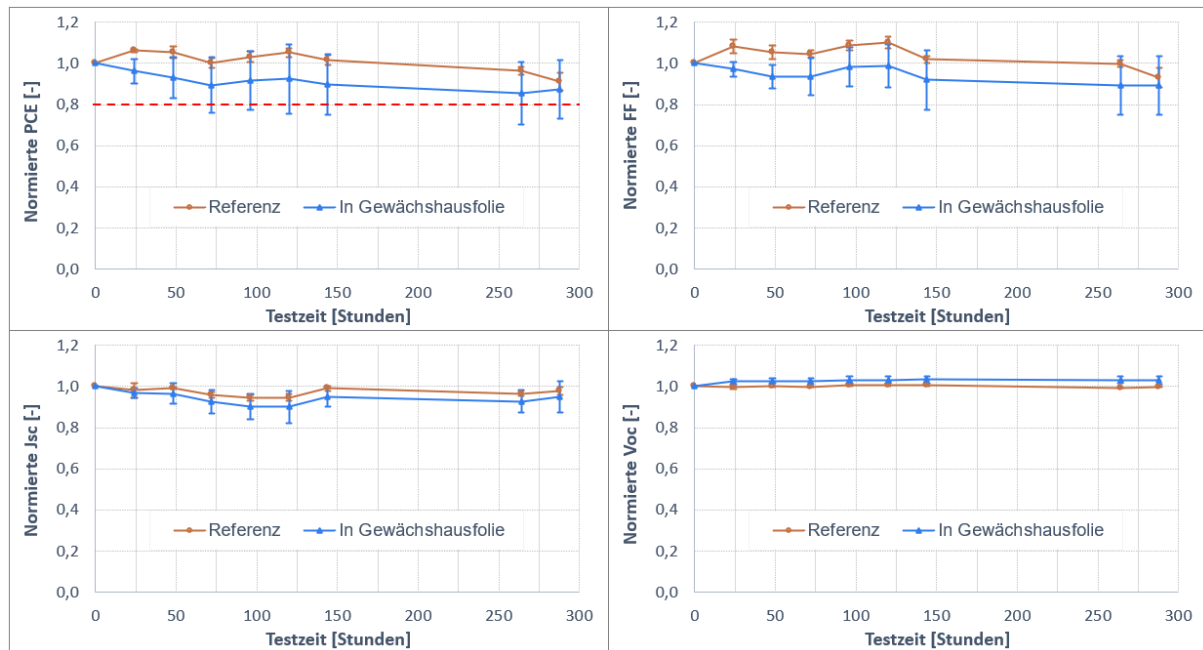


**Abbildung 28:** Verkapseltes OPV-Testmodule laminiert zwischen zwei Lagen Gewächshausfolie GH4 mittels EVA2-Schmelzklebstoff zur Untersuchung der chemischen Kompatibilität von OPV und EVA2 (links) und OPV-Referenzmodule verpackt in Barrierefolie (rechts).

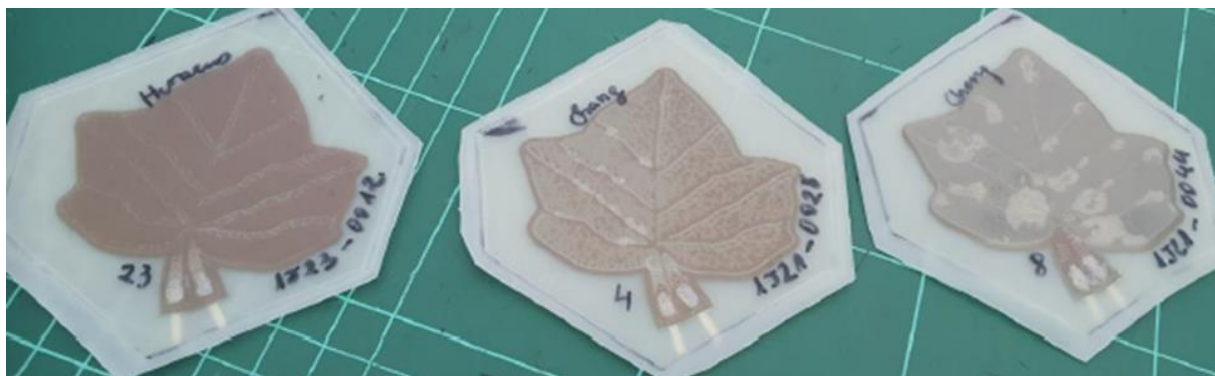
Der beschleunigte Alterungstest in trockener Luft bei 65 °C führte über einen Zeitraum von 300 Stunden zu praktisch keiner Verschlechterung sowohl bei den Referenz- als auch bei den Testmodulen (siehe Abbildung 29). Bei zwei integrierten Testmodulen gab es elektrische Kontaktierungsprobleme im Zusammenhang mit den verwendeten Crimpverbindern, die zum Durchstoßen der zusätzlichen GH4- und EVA2-Schichten erforderlich waren (siehe Kontaktierung in Abbildung 28 links). Diese beiden „Ausreißer“ sind verantwortlich für die ausgeprägte Standardabweichung in den Messwerten. Andererseits verbesserten sich die Referenzmodule während des ersten Tages im Alterungstest. Eine solche Verbesserung wird häufig beobachtet und ist auf die Hitzeeinwirkung zurückzuführen, die den Füllfaktor (FF) verbessert. Die Testmodule zeigten dieses Phänomen nicht, da sie bereits während ihrer Laminierung zwischen Gewächshausfolien hohen Temperaturen ausgesetzt waren. Der Degradationstrend ist sowohl für Referenz- als auch für Testmodule sehr ähnlich, weshalb dem Schmelzklebstoff EVA2 keine zusätzlicher Degradationseinfluss zugeschrieben werden kann.

Im Gegensatz zum vorherigen Alterungstest kam es beim Feuchte-Wärme-Test bei 65 °C und 85 % relativer Luftfeuchtigkeit in der Klimakammer zu optischen Degradationseffekten bei den in Gewächshausfolie verpackten Testmodulen. Bei einigen Testmodulen löste sich das EVA von der OPV-Barrierefolie, was als matte Blasen oder Blasen im Inneren des Laminats erkennbar ist (siehe Abbildung 30). Dies hängt möglicherweise mit einer Abnahme der Haftung zwischen EVA-Schmelzklebstoff und OPV-Modul zusammen. Bei den Proben für die

Schälfestigkeitstests wurden interessanterweise aber keine Blasen oder Delaminierungen beobachtet, obwohl auch diese in 65°C und 85% relativer Feuchte gealtert wurden. Möglicherweise spielt die höhere Steifigkeit des OPV-Moduls im Vergleich zu einer einzelnen Barrierefolie eine zusätzlich beschleunigende Rolle bei der Delaminierung. Da alle Testmodule im Trockenhitzetest weder Delaminierung noch Blasenbildung innerhalb des Laminats aufwiesen, scheint es, dass auch die zusätzliche Feuchtigkeit in diesem Alterungstest die Delaminierung beeinflusst und beschleunigt.



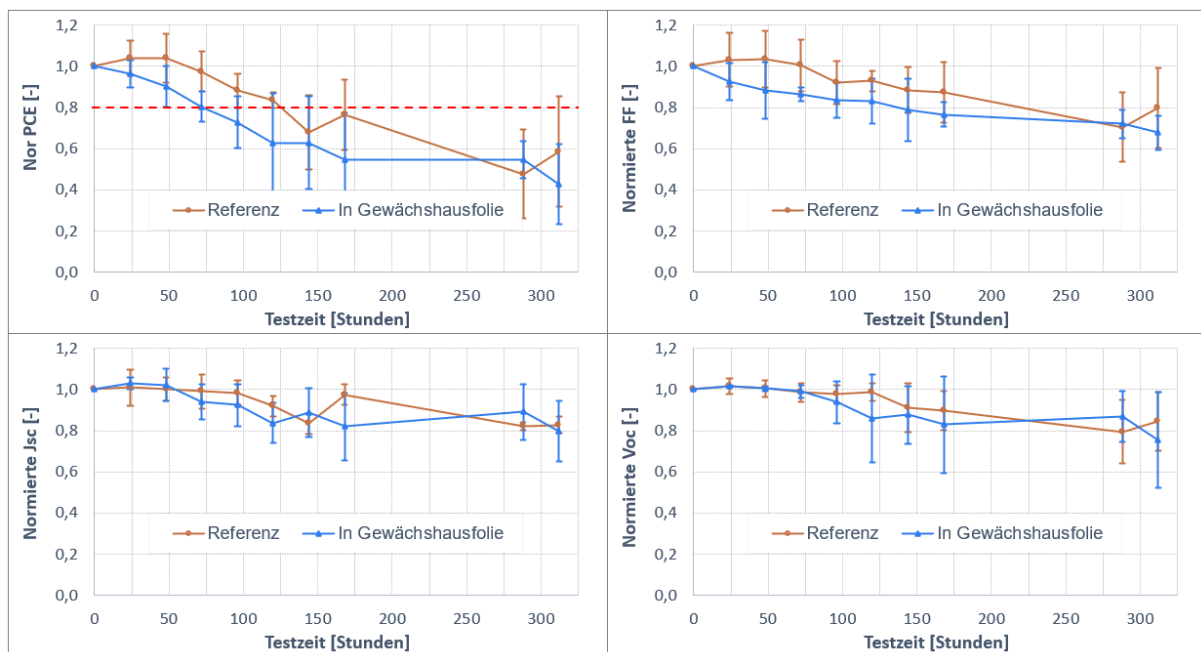
**Abbildung 29:** Zeitlicher Verlauf der normierten OPV-Modulkenngrößen PCE, FF, Jsc und Voc von OPV-Referenzmodulen und in Gewächshausfolie GH4 mittels EVA2 laminierter Module während der beschleunigten Alterung bei einer Temperatur von 65°C in trockener Luft.



**Abbildung 30:** Blasenbildung in den OPV-Testmodulen (laminert zwischen GH4 und EVA2) infolge des Feuchte-Wärme-Alterungstests bei 65°C und 85% relativer Luftfeuchtigkeit.

Die Kombination von Feuchtigkeit und Wärme führte bei diesem Alterungstest erwartungsgemäß zu einem stärkeren und schnelleren Abfall der Modulparameter (vergleiche Abbildungen 29 und 31). Leider war die Streuung der Werte recht groß (siehe Abbildung 31), was eine

konkrete Aussage erschwert. Bemerkenswert ist jedoch, dass die leistungsschwächeren Module sowohl mehrere Test- als auch Referenzmodule umfassten. Die anfängliche Leistungsverbesserung, die bei den Referenzmodulen während der ersten beiden Tage des Alterungstests beobachtet wurde, ist identisch mit dem in Abbildung 29 beobachteten Phänomen. Unter Berücksichtigung beider Effekte kann man schlussfolgern, dass der zusätzliche EVA-Schmelzklebstoff in den Testmodullaminaten keine negative Auswirkung auf die OPV-Lebensdauer hatte. Die beobachtete schnellere Degradation für beide Variationen in Abbildung 30 ist somit nur auf die in die OPV eindringende Feuchtigkeit zurückzuführen. Es sei angemerkt, dass im vorliegenden Experiment eine Barrierefolie mit relativ hoher Wasserdampfdurchlässigkeit gewählt wurde, um das Experiment zu beschleunigen.

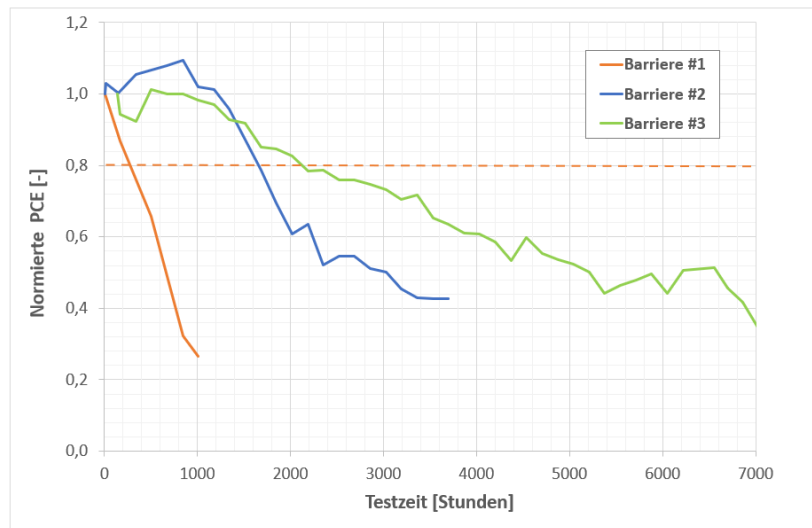


**Abbildung 31:** Zeitlicher Verlauf der normierten OPV-Modulkenngrößen PCE, FF, Jsc und Voc von OPV-Referenzmodulen und in Gewächshausfolie GH4 mittels EVA2 laminierter Module während des beschleunigten Feuchte-Wärme-Alterungstests bei 65°C und 85% relativer Feuchte.

Das Eindringen von Feuchtigkeit in das OPV-Modul verursachte neben dem schnellen Performanceverlust ebenso eine Farbveränderungen im OPV (siehe Abbildung 30). Die Degradation kann jedoch durch Einsatz besserer Barrierefolien mit geringerer Wasserdampfdurchlässigkeit verlangsamt werden. Abbildung 32 zeigt deutlich den Einfluss dreier unterschiedlicher Barrierefolien auf die Alterung von OPV-Modulen in der Klimakammer (hier jedoch ohne die zusätzliche Lamination zwischen Gewächshausfolien). Die Reduzierung der Wasserdampfdurchlässigkeit (von Barrierefolie 1 zu 3) bewirkte eine deutliche Verlängerung der OPV-Lebensdauer. Mit einer Hightech-Folie zeigen OPV-Module selbst bei schroffen, beschleunigten Bedingungen von 85°C und 85% relativer Luftfeuchte nach mehr als 2000 Stunden Versuchsdauer nur einen Leistungsabfall von weniger als 80%.

Feuchtigkeit beeinflusste jedoch auch die Lichtdurchlässigkeit der PE-Gewächshausfolie, wie in Abbildung 33 dargestellt. Die PE-Folie GH4 wurde zunehmend milchiger bzw. trübe indem sich eine dünne, pudrige Schicht auf der Oberfläche bildete, die jedoch abgewischt werden

konnte. Dieser Effekt war bei 85°C besonders stark und schnell und scheint mit der Diffusion von Weichmachern oder anderen Zusatzstoffen an die Oberfläche der PE-Folie zusammenzuhängen. Daher ist es interessant, den Feucht-Wärme-Test der Gewächshausfolienlaminare (vgl. Abbildung 31) mit verschiedenen Barrierefolien und PE-Gewächshausfolien bei insbesondere höheren Temperaturen zu wiederholen. Denn es besteht die Möglichkeit, dass die PE-Folie am Ende schneller altert als die integrierten OPV-Module und somit die Lebenszeit des Gesamtsystems entscheidend beeinträchtigt.



**Abbildung 32:** Zeitlicher Verlauf der normierten PCE von OPV-Modulen, die in drei verschiedene Barrierefolien mit unterschiedlicher Wasserdampfdurchlässigkeit verpackt waren und danach bei 85°C und 85% relativer Feuchte beschleunigt gealtert wurden.

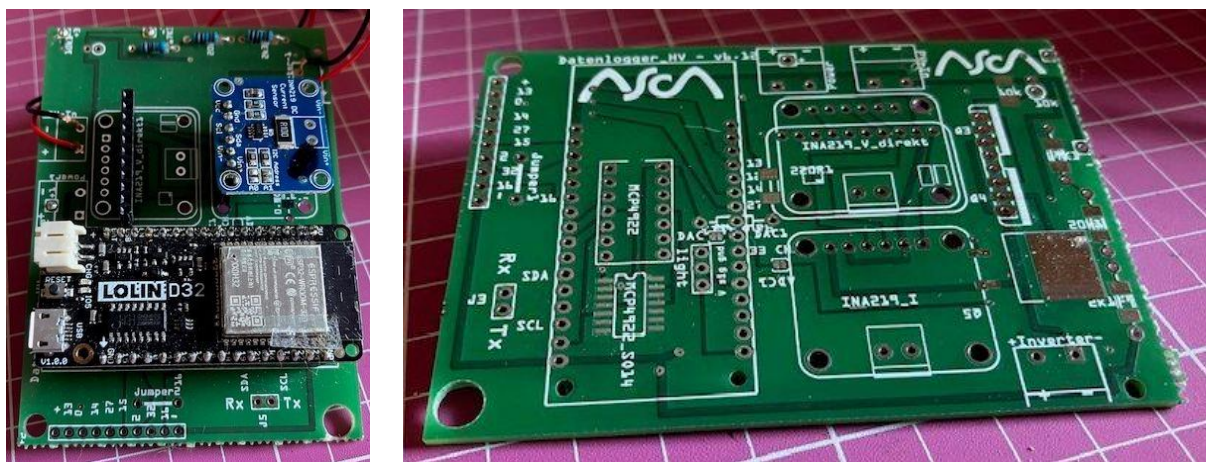


**Abbildung 33:** Änderungen der Lichtdurchlässigkeit eines zwischen Gewächshausfolie GH4 laminierten Moduls vor dem Feuchte-Wärme-Test (links), nach 5 Tagen Lagerung bei 65°C und 85% relativer Feuchte (Mitte) und nach weiteren 25 Tagen bei 85°C und 85% relativer Feuchte (rechts).

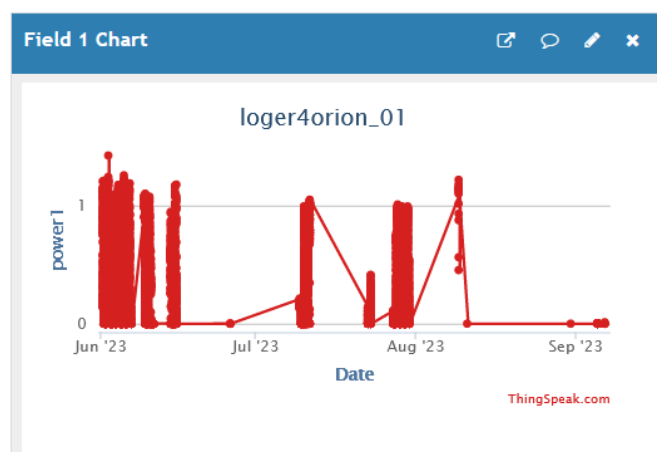
### 3.5. Entwicklung eines Remote-Überwachungssystems und Monitoring der OPV-Module im Gewächshaus

Neben den oben beschriebenen Entwicklungen der Anschlusskappen und des OPV-Integrationsverfahren in AP1 arbeitete ASCA mit den anderen Projektpartnern an der Entwicklung eines Überwachungssystems für die OPV-Module am Gewächshaus (AP2) sowie am anschließenden Monitoring dieser Module (AP3).

ASCA stand mit der Universität Thessaloniki im Austausch, um das Monitoringsystem des Gewächshauses zu entwerfen. Hierzu entwickelte ASCA eigens einen Datenlogger (Abbildung 34), der Module mit unterschiedlicher Leistung zwischen 10 mW und einige 100 W vermessen kann und die Messdaten (siehe Abbildung 35) anschließend per WLAN an einen ThingSpeak Cloudserver schickt. Den Partnern wurde Zugriff auf eine von ASCA genutzte Softwareumgebung gewährt. Zudem wurden OPV-Module zur Verfügung gestellt, die genutzt wurden, um die Monitoring-Fähigkeit des entwickelten Systems zu testen.



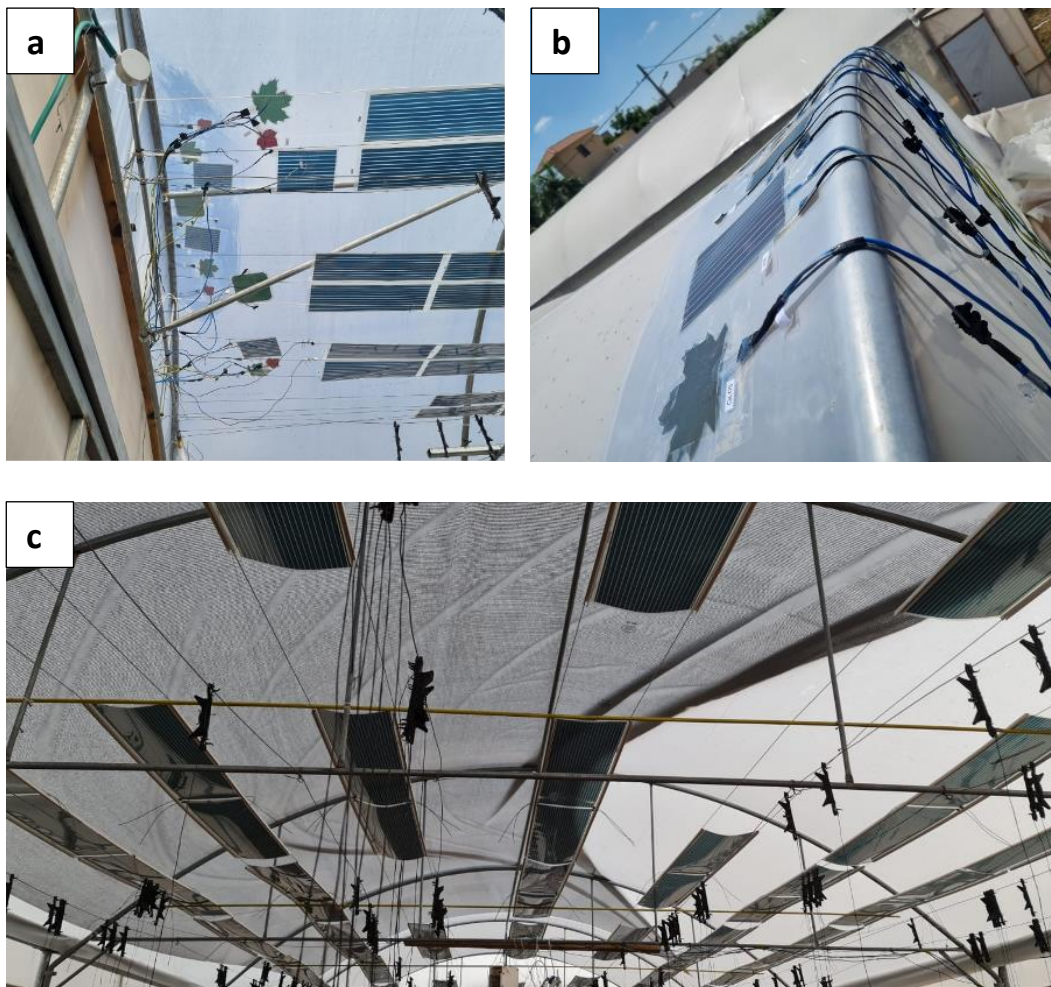
**Abbildung 34:** ASCA entwickelte den Datenlogger (links) und die dazugehörige Platine (rechts).



**Abbildung 35:** Screenshot der ThingSpeak-Benutzeroberfläche für die Datenauswertung.

Für die Installation im Demonstrationsgewächshaus in Israel hat ASCA OPV-Module gemäß den gewünschten Spezifikationen hergestellt und an die dort ansässigen Projektpartner TRDC und Volcani Center verschickt. Das Design und die spektralen Charakteristiken der Module waren im Vorfeld abgestimmt. Jeweils 10 m<sup>2</sup> blaue und rote Module (d.g. mit unterschiedlichen spektralen Charakteristiken) wurden nach Israel versendet, um in einem ersten Vorversuch in kleinen Foliengewächshäusern, den Einfluss der unterschiedlichen Transmissionseigenschaften sowie Änderungen im Mikroklima auf das Pflanzenwachstum zu untersuchen.

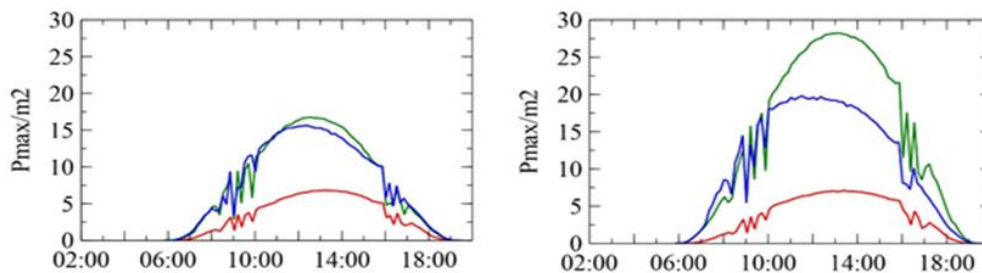
Um das Messsystem zu testen, hatte ASCA den israelischen Partnern verschiedene kleine rote, grüne und blaue Module in Blatt- oder Quadratform bereitgestellt (siehe Abbildung 36a und b). Ferner lieferte ASCA insgesamt 100 lange blaue Modulstreifen, die TRDC unterhalb des Gewächshausdachs mittels aufgespannter Kabel und Verstrebungen montierte (siehe Abbildung 36c), um den Energieertrag innerhalb des Gewächshauses bestimmen zu können. Module mit blauem Halbleiter kamen dazu in Frage, da der Vorversuch zeigte, dass deren Transmissionspektrum am geeignetsten für das Wachstum der gezüchteten Tomaten im Gewächshaus war.



**Abbildung 36:** Kleine rote, grüne und blaue OPV-Module wurden in (Bild a) und auf (Bild b) dem Foliengewächshaus installiert, um das Überwachungssystem zu testen, während große blaue Module im Gewächshaus für die Studie des Pflanzenwachstums und der Energieernte verwendet wurden (Bild c).

TRDC plante eigenständig verschiedene Lebensdauertests, um den Energieertrag bzw. die Leistung der OPV-Module über einen gewissen Zeitraum zu überwachen. In einem ersten Versuch wurden innerhalb und auf der Außenhaut des Gewächshauses unterschiedliche blaue, grüne und rote Module befestigt und über anderthalb Monate tagsüber in einem zehnminütigen Takt gemessen. Alle Module waren zwischen den einzelnen Messungen abgeklemmt und wurden somit unüblicherweise bei offener Klemmspannung gealtert.

Abbildung 37 zeigt exemplarisch einen täglichen Verlauf der Modulleistung dieser Module. Für eine bessere Vergleichbarkeit ist die Leistung  $P_{\max}$  auf die OPV-Modulfläche normiert. Die roten Module lieferten, wie erwartet und bedingt durch das Halbmateriale, weniger Leistung im Vergleich zu den grünen und blauen Modulen, hervorgerufen durch einen niedrigeren Füllfaktor und geringeren Strom. Weiterhin war die Leistung der außen montierten Module höher im Vergleich zu den Modulen im Gewächshaus. Das erklärt die höhere Sonneneinstrahlung außerhalb des Gewächshauses. Wieso im Freien insbesondere die grünen Module signifikant besser funktionierten als die andersfarbigen Module, konnte leider auf Basis der von TRDC zur Verfügung gestellten Daten nicht festgestellt werden.

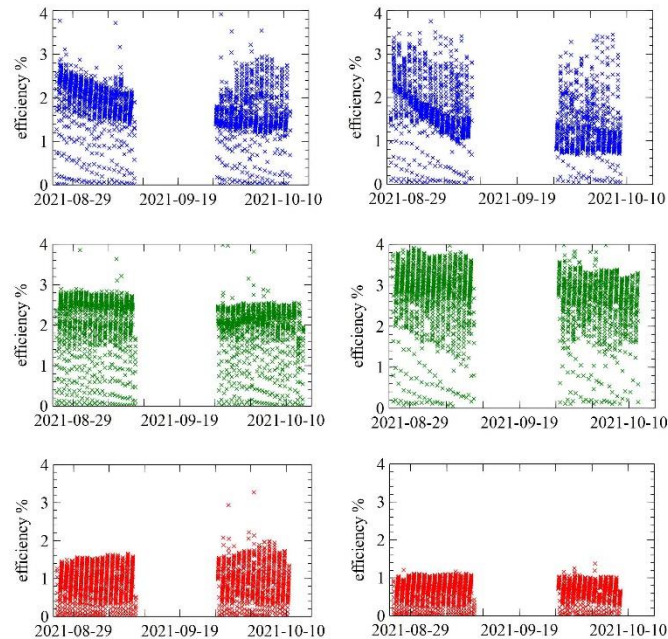


**Abbildung 37:** Leistung von grünen, blauen und roten OPV-Modulen innerhalb (links) und außerhalb (rechts) des Gewächshauses im Verlauf eines Tages, dargestellt in den entsprechend farbigen Linien.

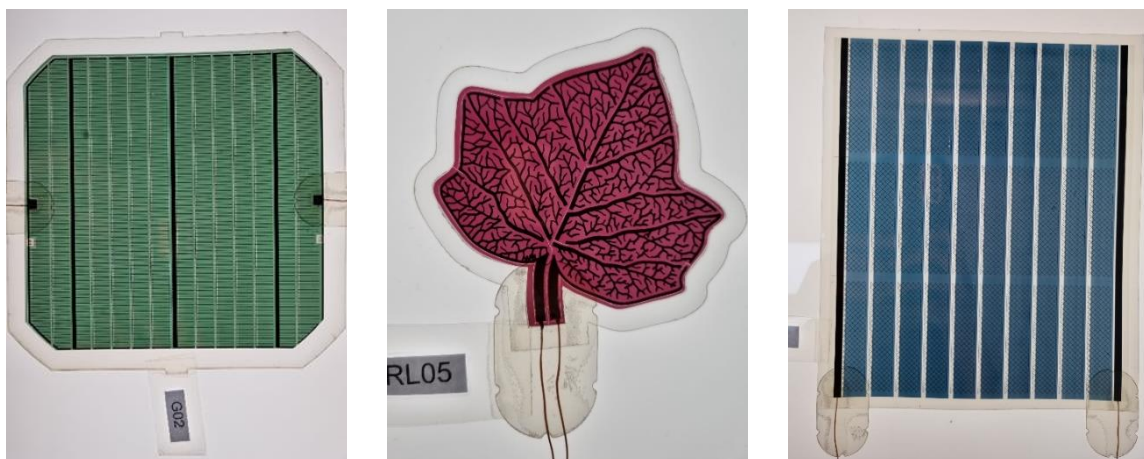
In Abbildung 38 sind die oben gezeigten täglichen Messungen komprimiert für die komplette Messperiode von anderthalb Monaten dargestellt. Die Moduleffizienzen in diesen Graphen berechnete TRDC aus der Modulleistung und der ebenso gleichzeitig gemessenen Sonneneinstrahlung auf Modulebene. Die (maximale) Effizienz der grünen und roten Module war in diesem Zeitraum sehr stabil. Dahingegen war die Streuung in den Effizienzwerten der blauen Module größer und man könnte hierin eine tendenzielle Abnahme erkennen.

Eine genaue Erklärung für diese Abnahme gibt es bislang allerdings nicht. Neun Monate nach der Installation waren alle Module optisch noch in Ordnung (siehe Abbildung 39). Laut TRDC gab es keine sichtbare Vergilbung der Verpackungsfolie ebenjener Module. Eine Abnahme des Fotostroms durch einen Rückgang in der Transmission der Barrierefolie kann daher ausgeschlossen werden. Weiterhin gab es keine ausgebleichten Stellen rund um die Anschlusspunkte auf den Modulen. Diese würden auf undichte Kontakte hindeuten, an denen Sauerstoff ins Modul eingedrungen ist und anschließend mit dem Halbleiter reagiert hat. Diese ausgebleichten Bereiche würden wiederum nicht mehr zu dem Fotostrom beitragen. Mit einem Spektroradiometer maß TRDC jedoch eine Abnahme in der Transmission des blauen OPV-Halbleiters. Eine geringere Transmission bzw. Absorption des Halbleiters könnte dann mit einer Abnahme des Fotostroms einhergehen. Die Transmissionsmessungen sind jedoch ein wenig zweifelbehaftet, da auch eine sehr starke Abnahme in der Transmission der grünen Module

innerhalb des Gewächshauses gemessen wurde. Einen ähnlich starken Rückgang in der Effizienz ist dahingegen nicht erkennbar (Abbildung 38 Mitte links). Leider hatte TRDC den Fotostrom nicht aus den Stromspannungskurven extrahiert und analysiert. Somit konnten die oben genannten Hypothesen weder bestätigt noch widerlegt werden.



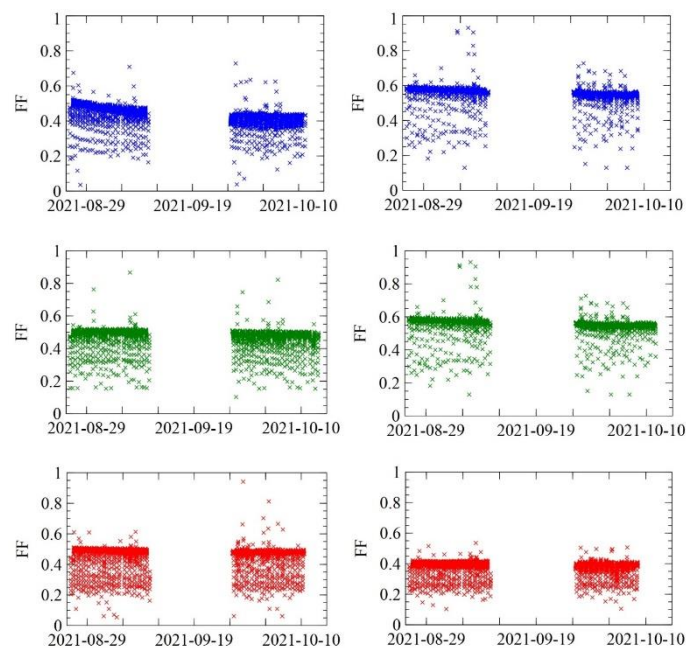
**Abbildung 38:** Effizienz von grünen, blauen und roten OPV-Modulen innerhalb (links) und außerhalb (rechts) des Gewächshauses über einen Zeitraum von sechs Wochen, dargestellt in den entsprechend farbigen Linien.



**Abbildung 39:** Exemplarische Fotos von grünen, roten und blauen OPV-Modulen nach einer neunmonatigen Installation innerhalb bzw. außerhalb des Gewächshauses.

TRDC hat jedoch während der OPV-Messperiode von anderthalb Monaten den Füllfaktor bestimmt und graphisch dargestellt (siehe Abbildung 40). Für die instabileren blauen Module war der maximale Füllfaktor sehr konstant. Das gilt ebenso für die roten und grünen Modulen. Eine

durch Feuchte induzierte OPV-Degradation ist daher unwahrscheinlich. Diese Art der Degradation ist normalerweise zu erwarten, wenn Wasser aus der Umgebungsluft langsam durch die Modulverpackung diffundiert und sich in den OPV-Schichten einlagert. Andererseits gibt es viele Belege dafür (auch ASCA interne), dass OPV-Module deutlich langsamer degradieren, wenn man sie an ihrem maximalen Leistungspunkt betreibt, im Vergleich zu einer Alterung in der Sonne bei offener Klemmspannung. Da aber die OPV-Module in diesem Versuch tatsächlich bei offener Klemmspannung gehalten wurden (außer während der kurzen Messungen), könnte diese unsachgemäße Anwendung eine mögliche Erklärung für die beobachtete Effizienzreduktion der blauen Module sein. Noch unklar wäre dann allerdings, wieso nur die blauen Module hiervon betroffen waren.

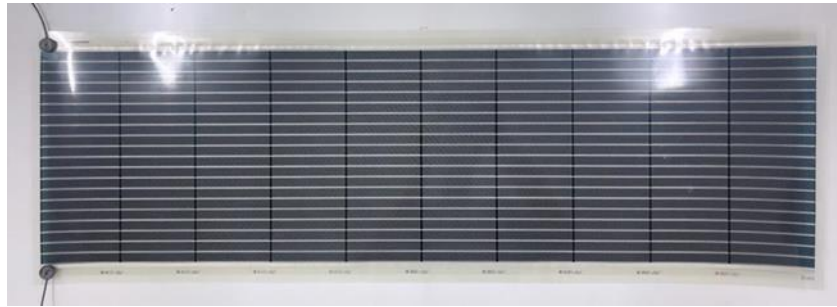


**Abbildung 40:** Füllfaktor von grünen, blauen und roten OPV-Modulen innerhalb (links) und außerhalb (rechts) des Gewächshauses über sechs Wochen, dargestellt in entsprechend farbigen Linien.

Grundsätzlich bedarf es einer Wiederholung der Messungen, um alle noch offenen Fragen beantworten zu können. In dem Fall sollten alle OPV-Module während der Testperiode ständig am maximalen Leistungspunkt betrieben werden, indem man sie zum Beispiel an einen geeigneten Widerstand anschließt, und nur für die Leistungsmessungen umklemmt (z.B. durch einen Multiplexer). Für eine bessere Statistik und somit eine verlässliche Aussage, sollte man diesen Test mit vielen Modulen pro Farbe wiederholen, wobei sowohl alle OPV-Kenngrößen als auch die Form der Stromspannungskurven pro Modul analysiert werden sollten.

In einem weiteren Test verwendete TRDC 84 blaue OPV-Module mit jeweils zwanzig in Reihe geschalteten Zellen und Dimensionen von 33 cm x 102 cm, wie in Abbildung 41 dargestellt. Die angelöteten Kabel auf diesen Modulen hatte ASCA vorher mit den eigens für dieses Projekts entwickelten aufgeklebten Anschlusskappen (siehe Abschnitt 3.2.2) versehen. Der vorgenannte Fehler wurde nun behoben, indem die Module ständig an einem Wechselrichter angeschlossen waren und somit der Sonne nicht mehr bei offener Klemmspannung ausgesetzt

waren. Leider wurde hierzu ein überdimensionierter Wechselrichter mit einer hohen minimalen Eingangsspannung gewählt, sodass Strings aus jeweils 14 Modulen in Reihe notwendig waren um eine hohe Systemspannung von etwa 175 V am maximalen Leistungspunkt ( $V_{mpp}$ ) zu erreichen. Sechs solcher OPV-Strings wurden wiederum parallel am Wechselrichter angeschlossen, um den Systemstrom zu erhöhen. Alle Module waren zirka einen Meter unterhalb des Gewächshausdaches montiert (siehe Abbildung 36c).



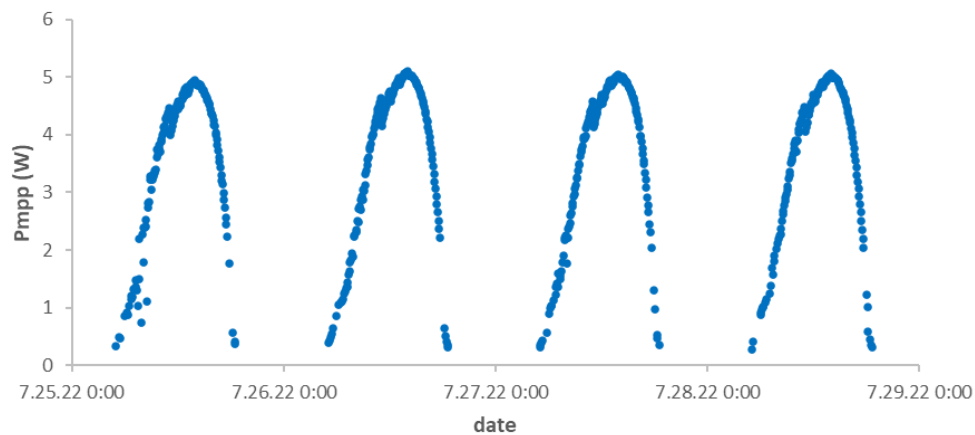
**Abbildung 41:** Blaues OPV-Modul mit 20 in Reihe geschalteten Zellen und einer  $V_{mpp}$  von 12,6 V.

Der zweite Test musste allerdings vorzeitig abgebrochen werden, weil der Wechselrichter nicht mehr startete. Der Modulstrom hatte nachgelassen, aber es gab keine weitere Fehleranalyse seitens TRDC. ASCA ist der Meinung, dass die Verschaltung der OPV-Module nicht geeignet war. Zum einem ist die gewählte Stringspannung zu hoch. Im Gegensatz zu anderen PV-Technologien besteht OPV aus einigen sehr dünnen ( $< 1\mu m$ ) Schichten, die eine solche hohe Spannung nicht überstehen und punktuell durchbrennen (engl. Hotspots). Zum anderen wurden keine Bypass-Dioden zum Schutz der einzelnen Module im String gegen eine umgekehrte Vorspannung und somit auch gegen Hotspots verwendet. Schlussendlich besteht bei dem gesamten Versuchsaufbau die Gefahr, dass die OPV-Module versehentlich vom Wechselrichter „abgeklemmt“ wurden, weil z.B. die notwendige minimale Systemspannung durch eine temporäre Verschattung nicht erreicht wurde, und somit bei offener Klemmspannung beschleunigt degradierten.

Eine Wiederholung dieses zweiten Tests ist wünschenswert, denn die Grundidee ist richtig. Allerdings müsste dann ein passender Micro-Wechselrichter mit einer niedrigen minimalen Startspannung (und vorzugsweise auch einem geringen DC-Startstrom) verwendet werden. Dieser Ansatz minimiert die Fehleranfälligkeit des Gesamtsystems, da weniger Module benötigt werden, um die notwendigen Minimalwerte für Spannung und Strom zu erreichen. Somit wird gezielt die Problematik der OPV untersucht und nicht das (statistische) Ausfallen eines einzelnen Moduls, was das komplette System im obigen zweiten Test lahmgelegt hatte. Die einzelnen Module im String müssen zudem mit einer Bypass-Diode geschützt werden. Für eine intensive Fehleranalyse sollten alle Module auf eventuelle Hotspots kontrolliert werden.

In einem dritten Vorversuch reduzierte TRDC die Komplexität des Tests und untersuchte nur ein Modul innerhalb der ersten vier Tage nach dessen Installation. Das Modul war ähnlich zu dem in Abbildung 41, hatte aber einer Länge von 142 cm und lieferte demnach etwas mehr Strom. TRDC verzichtete diesmal auf einen Wechselrichter und verwendete an dessen Stelle eine elektrische Last um das Modul, während es nicht vermessen wurde, permanent am

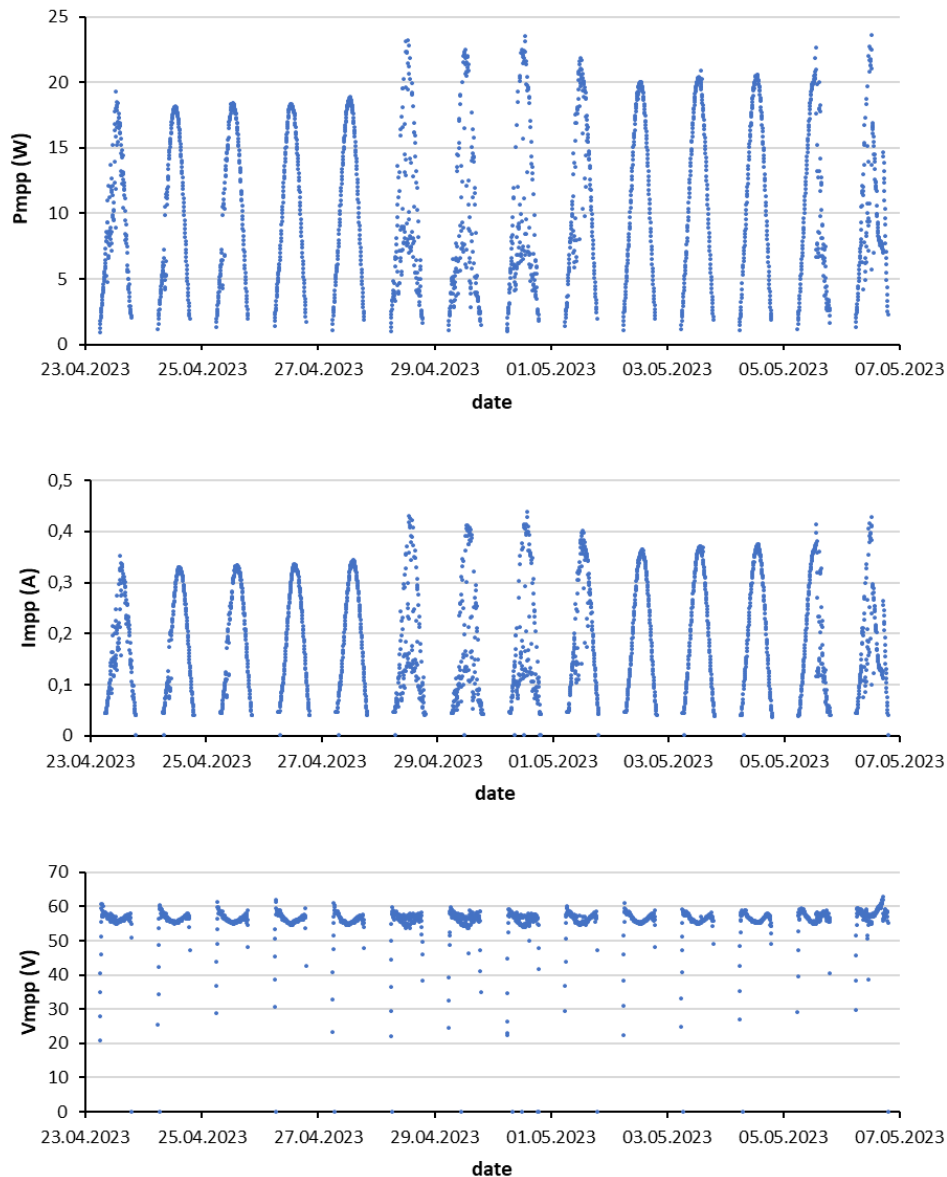
maximalen Leistungspunkt zu betreiben. In diesem Fall ist keine schnelle Leistungsabnahme wahrnehmbar (siehe Abbildung 42).



**Abbildung 42:** Leistung eines blauen OPV-Moduls während der ersten vier Tage nach Installation.

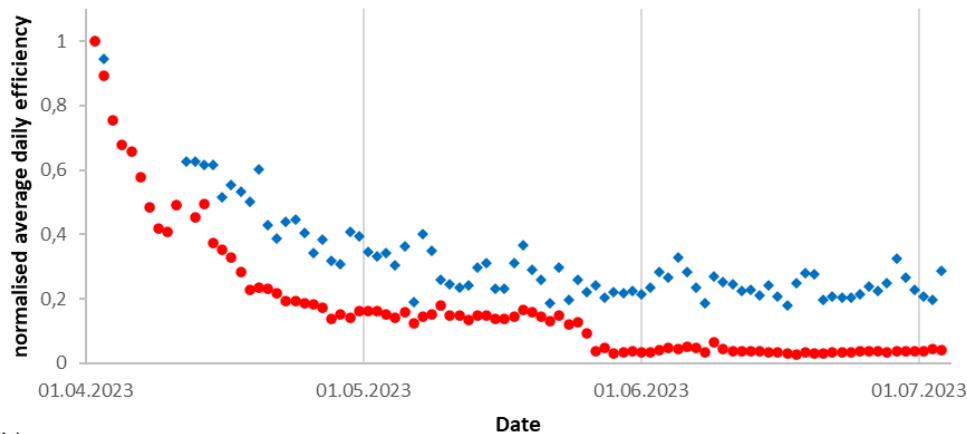
Einen ähnlich stabilen Verlauf hatte die Leistung eines OPV-Strings basierend auf fünf in Reihe geschalteten Modulen aber ohne Bypass-Dioden. Es wurden hierzu die gleichen Module wie im dritten Versuch verwendet. Weiterhin wurden der Strom und die Spannung am maximalen Leistungspunkt gemessen. Diese sind in Abbildung 43 dargestellt. Während der 14-tägigen Messperiode war die Sonneneinstrahlung relativ konstant. Die wolkigen Tage (Tag 6, 7, 8, 9, 13 und 14) erkennt man an der Streuung in Leistung und Strom, während die Spannung trotz Lichtfluktuationen sehr stabil blieb. Die stabile Leistung dieser großen blauen Module steht in komplettem Widerspruch zu der schnellen Leistungsabnahme in den ersten zwei Wochen, die bei den kleinen blauen Modulen im ersten Test festgestellt wurde (vgl. Abbildungen 38 und 43). Leider führte TRDC genau diesen Test nicht weiter, um die weitere Stabilität verfolgen zu können. Dennoch scheint die Verwendung von sowohl einer elektrischen Last als auch einem kleineren String mit niedrigerer Stringspegnung tatsächlich zu einer langsameren OPV-Alterung beizutragen. Diese Punkte sollten daher bei zukünftigen Wiederholungen dieser Lebenszeittests unbedingt berücksichtigt werden.

In einem fünften Versuch untersuchte TRDC jeweils zwei einzelne blaue Module innerhalb und außerhalb des Gewächshauses über einen Zeitraum von drei Monaten. Die verwendeten Module waren identisch mit denen in den beiden vorherigen Tests. TRDC verwendete wiederum spezielle elektrische Lasten, um die Module ständig am maximalen Leistungspunkt zu betreiben. Trotz dieser Vorsorge erkennt man in Abbildung 44 eine schnelle Abnahme in der normierten Moduleffizienz während der ersten zwei Wochen. Dieser Trend steht jedoch in komplettem Widerspruch mit den vorherigen Test (vgl. Abbildung 42 und 43).

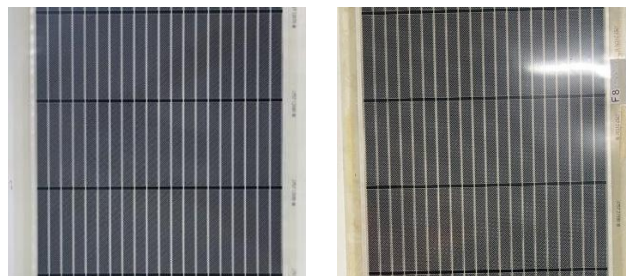


**Abbildung 43:** Leistung (oben), Strom (Mitte) und Spannung (unten) am maximalen Leistungspunkt eines OPV-Strings basierend auf fünf blauen, in Reihe geschalteter Module.

Der genaue Grund für die unterschiedlichen Lebenszeitergebnisse ist bislang unklar. Die Auswertung der OPV-Daten zeigt, dass im fünften Versuch vor allem der Strom am maximalen Leistungspunkt von allen Modulen für den Effizienzurückgang verantwortlich war. Im Gegensatz zu den kleinen Modulen aus dem ersten Versuch, konnte TRDC bei den großen Modulen in diesem Test eine Vergilbung der OPV-Verpackung feststellen (siehe Abbildung 45). Obwohl diese Vergilbung sicherlich einen Einfluss auf dem Fotostrom und somit auf der Effizienz hatte, kann sie unwahrscheinlich die starke und schnelle Abnahme in Abbildung 44 alleinig erklären. Eine andere Vermutung ist, dass die eingesetzten OPV-Module möglicherweise chemisch inkompatibel mit einigen von den im Gewächshaus eingesetzten Chemikalien, wie z.B. Pestiziden und Düngermittel, sind. Dennoch ist es dann sehr merkwürdig, dass ausgerechnet die Module im Gewächshaus, die den Chemikalien und weniger dem UV-Licht ausgesetzt waren, langsamer degradierten.



**Abbildung 44:** Normierter Mittelwert von der Effizienz für zwei Module innerhalb (blaue Rauten) und zwei Module außerhalb (rote Kreise) des Gewächshauses.



**Abbildung 45:** Blaues OPV-Modul vor (links) und nach (rechts) 218 Tagen im Gewächshaus.

Positiv zu bewerten ist die Feststellung von TRDC, dass die aufgeklebten Anschlusspunkte, die ASCA speziell für diese Module entwickelt hatte, die Lebenszeittests überstanden hatten und es zu keinen Kontaktproblemen kam. Außerdem war keine Delaminierung der OPV-Verpackung zu verzeichnen, trotz mäßiger mechanischer Beanspruchung durch die Luftzirkulation im Gewächshaus.

### 3.6. Zusammenfassung

Der Fokus des ORION-Verbundvorhabens lag auf der Integration von OPV-Modulen in Folien-gewächshäuser und die Überwachung von ebenjenen Modulen nach ihrer Installation im Gewächshaus. Der Beitrag von ASCA beinhaltete die Weiterentwicklung verschiedenster aufgeklebter und spritzgegossener Anschlusspunkte, wobei die flachen, mit Klebeband fixierten Anschlüssen, vielversprechend für die Integration in Folientunnel sind. Insbesondere die entwickelten aufgeklebten Anschlusspunkten hielten den Lebenszeittests von TRDC im Gewächshaus stand.

Ferner konnte die OPV-Lebenszeit um ein Vielfaches verlängert werden, indem die Module in Barrierefolien mit niedrigerer Wasserdampfdurchlässigkeit primärverpackt wurden. Ein erfolgreicher Integrationsprozess umfasst die sekundäre Laminierung der OPV-Module zwischen zwei Gewächshaus-PE-Folien mittels geeigneten EVA-Folien als Verbindungsschicht. Es

wurde außerdem gezeigt, dass diese zusätzlichen EVA-Verbindungsschichten keine weiteren negativen Einflüsse auf die OPV-Lebenszeit haben.

ASCA entwickelte eigens für die Lebenszeittests in vorliegendem Projekt eine Platine mit Elektronik für die Vermessung bzw. Überwachung der OPV-Module. Die gesammelten Daten konnten mittels einer Online-Schnittstelle ausgelesen werden.

Weiterhin lieferte ASCA funktionelle OPV-Module an TRDC für Lebenszeittests bzw. das Monitoring der Module innerhalb and außerhalb des Gewächshauses. Die Ergebnisse dieser Tests waren leider durchwachsen und oft widersprüchlich. Grundsätzlich waren die OPV-Module stabil. In manchen Tests von TRDC verzeichnete die blauen Module jedoch eine schnelle Abnahme in der Leistung. Die Verwendung von sowohl einer elektrischen Last während des Alterungstests als auch geringe Systemspannungen scheinen zu einer langsameren OPV-Alterung beizutragen. Eine Wiederholung der Lebenszeittests ist dennoch notwendig, um alle offenen Fragen unzweifelhaft beantworten zu können.

## **4. Stand des Vorhabens**

ASCA konnte ihre Aufgaben in den einzelnen APs erfolgreich bearbeiten. Die Lebensdauer von flexiblen OPV-Modulen konnte mittels neuartiger, innovativer Barrierefolien signifikant gesteigert werden. Zudem wurde im Labor ein Laminationsprozess zur Integration von Modulen in Gewächshausfolie mit Hilfe von kostengünstigen Heißsiegelfolien entwickelt. Unterschiedlichste Ausführungen von Anschlusspunkten wurden neu- bzw. weiterentwickelt und können aufgrund Ihrer Vor- und Nachteile in unterschiedlichen Anwendungsgebieten zum Einsatz kommen. Innovative, aufgeklebte Anschlusspunkte haben den Feldtest im Foliengewächshaus erfolgreich überstanden. Dahingegen lieferte das OPV-Monitoring des Projektpartners TRDC mit OPV-Modulen im Foliengewächshaus infolge unsachgemäßer Handhabung fragliche Ergebnisse. Tiefgreifende Schlussfolgerungen können daher leider nicht gezogen werden und die Studien müssen wiederholt werden.

Aufgrund des Einsatzes eines höheren Anteils an Senior-Wissenschaftlern, wurden die Gesamtaufwendungen für Personal im Vergleich zur ursprünglichen Ausgabenplanung überschritten. Die Mehrkosten steuert ASCA als Eigenanteil bei.

## **5. Verwertung**

### **5.1. Publikationen**

ASCA hat aus den erzielten Projektergebnissen keine eigenen Veröffentlichungen vorgenommen.

### **5.2. Entwicklungen auf Grund des Projekts**

Das vorliegende Verbundvorhaben war aus Sicht von ASCA erfolgreich und es haben sich dadurch auch erste Anknüpfungspunkte für weitere Aktivitäten eröffnet. ASCA hat zum Beispiel Gespräche mit einem Hersteller von Gewächshausfolien aufgenommen, der Interesse an einer Zusammenarbeit zeigt, um die Agri-OPV-Folien im Hinblick auf eine industrielle Fertigung weiterzuentwickeln. Einige der entwickelten Anschlusspunkte sind bereits in einigen kleineren Kundenprojekten zum Einsatz gekommen und werden auch nach Projektende

kontinuierlich für spezifische Anwendungen weiterentwickelt werden. Die israelischen Projektpartner TRDC und Volcani Center sind sehr daran interessiert, die Zusammenarbeit mit ASCA im Bereich Foliengewächshäuser über das Projektende hinweg weiterzuführen, insbesondere im Rahmen weiterer internationaler Forschungsprojekte. Erste Gespräche dazu wurden aufgenommen. Das anfängliche Ziel wird es sein, die im ORION-Vorhaben angestoßenen Studien fortzuführen.

### **5.3. Patente**

Aus dem Projekt sind seitens ASCA keine Patente hervorgegangen.