ABSCHLUSSBERICHT

Zuwendungsempfänger	**Förderkennzeichen:**
Hochschule Anhalt (HSA)	03EE1112E
Vorhabensbeschreibung: „EVAplus“ Erhöhung von Versorgungsicherheit, Anlagenperformance und Produktivität durch lebensdauerrelevante Untersuchungen der Stabilität der Modulverkapselung von PV-Modulen Teilvorhaben Optische Methoden zur Materialidentifikation und -qualifikation	
Projektleitung: Prof. Dr. Ralph Gottschalg Tel.: Tel.: +49 3496 67 2351 E-Mail: ralph.gottschalg@hs-anhalt.de	
Autor/en: Patrick Wessel, Zonghan Jiang, Dr. Leila Mortazavifar, Prof. Dr. Ralph Gottschalg	
Laufzeit des Vorhabens:	01.03.2022 – 31.12.2025
Berichtszeitraum:	01.03.2022 – 31.12.2025

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

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

I. Kurzdarstellung

1. Aufgabenstellung

Die Langzeitstabilität von Photovoltaik-(PV)-Modulen ist von zentraler Bedeutung für die Wettbewerbsfähigkeit der Solarenergie. Hersteller geben hierfür Leistungsgarantien von über 25 Jahren. Dabei spielt die Verkapselung eine entscheidende Rolle, da sie die empfindlichen Solarzellen vor Umwelteinflüssen schützt. Fehler in diesem Bereich sind eine wesentliche Ursache für Leistungsverluste und Ausfälle im Feld. Studien zeigen, dass ein signifikanter Anteil aller installierten Module Auffälligkeiten aufweist, die direkt oder indirekt mit der Verkapselung zusammenhängen.

Ein kritischer Parameter für die Qualität der Verkapselung ist der Vernetzungsgrad des Materials, beispielsweise von Ethylen-Vinylacetat-Copolymer (EVA, nach IUPAC: EVAC), der aus dem Laminationsprozess resultiert. Ein unzureichender Vernetzungsgrad kann die Zuverlässigkeit beeinträchtigen, während ein zu hoher Grad ebenfalls zu Problemen wie Adhäsionsverlust führen kann. Der Herstellungsprozess wird zusätzlich durch die erhebliche Variabilität der Materialeigenschaften der eingesetzten Polymerfolien erschwert. Dies erfordert eine kontinuierliche Anpassung der Prozessparameter. In der Industrie fehlen jedoch etablierte, zerstörungsfreie Prüfmethoden, um die Qualität der Lamination flächendeckend zu kontrollieren. Dies erhöht das Risiko, dass Module mit Mängeln installiert werden.

Das zentrale Ziel des Projekts „EVAplus" ist daher die Entwicklung einer umfassenden Qualitätskontrolle für die Modulverkapselung, um die Versorgungssicherheit, die Anlagenleistung und die Produktivität zu erhöhen. Angestrebt werden eine Reduktion von verkapselungsbedingten Auffälligkeiten im Feld um 20 % und eine Steigerung des Produktionsertrags bei Modulherstellern um 2 %. Dies soll durch eine beschleunigte, optimierte Lamination und eine Reduzierung des Ausschusses erreicht werden. Um dieses Gesamtziel zu erreichen, wurden folgende **spezifische Aufgabenstellungen** formuliert:

1. **Definition eines idealen Vernetzungsgrades:** Durch die Analyse von Feldrückläufern sowie beschleunigte Alterungstests an speziell gefertigten Prüfkörpern soll der optimale Bereich für den Vernetzungsgrad bestimmt werden, der eine maximale Modulzuverlässigkeit gewährleistet.

2. **Entwicklung einer zerstörungsfreien Messtechnologie:** Aufbauend auf dem X-Link®-Verfahren soll eine Methode zur präzisen Bestimmung des Vernetzungsgrades und anderer relevanter Polymerparameter entwickelt werden, die sowohl in der Produktion als auch im Feld mobil einsetzbar ist.

3. **Entwicklung eines Industrie-4.0-Ansatzes für die Lamination:** Anstelle einer rein zeit- und temperaturgesteuerten Prozessführung soll eine ergebnisgesteuerte Lamination etabliert werden. Dies beinhaltet die kontinuierliche Bewertung der Eingangsfolien und eine dynamische Anpassung der Prozessparameter, um eine gleichbleibend hohe Qualität bei optimierter Produktionsgeschwindigkeit zu sichern.

4. **Etablierung einer Qualitätssicherung im Systembau:** Es soll eine Methode entwickelt werden, um die Qualität der Verkapselung bei der Wareneingangskontrolle zu überprüfen. Dies ermöglicht es Systembauern, Produktionsprobleme vor der Installation zu identifizieren und das Risiko von Frühausfällen zu minimieren.

2. Voraussetzungen vor der Durchführung des Vorhabens

Die Photovoltaik (PV) ist eine zentrale Säule der globalen Energiewende und auf dem Weg, bis zum Ende des Jahrhunderts den größten Anteil am weltweiten Strommix zu stellen. Um dieses enorme Potenzial auszuschöpfen und die Wettbewerbsfähigkeit der Solarenergie weiter zu steigern, sind die **Langzeitstabilität und Zuverlässigkeit von PV-Modulen** von entscheidender Bedeutung. Hersteller geben Leistungsgarantien von über 25 Jahren, was extreme Anforderungen an die eingesetzten Materialien und Fertigungsprozesse stellt.

Eine Schlüsselkomponente für die Langlebigkeit eines PV-Moduls ist die **Verkapselung**, die die empfindlichen Solarzellen vor Umwelteinflüssen wie Feuchtigkeit, Temperaturschwankungen und mechanischer Belastung schützt. Fehler in diesem Bereich sind eine der Hauptursachen für Leistungsdegradation und Modulausfälle im Feld. Verschiedene Feldstudien belegen, dass ein signifikanter Anteil aller installierten Module – bis zu 30 % – Auffälligkeiten aufweist, von denen viele direkt oder indirekt auf die Verkapselung zurückzuführen sind. Diese Mängel führen zu kostspieligen Nachfolgeuntersuchungen und mindern den Wert von PV-Anlagen.

Ein kritischer Parameter für die Qualität der Verkapselung ist der **Vernetzungsgrad** des eingesetzten Materials, typischerweise Ethylen-Vinylacetat Copolymer (EVA, nach IUPAC: EVAC). Dieser wird während des Laminationsprozesses in der Modulproduktion festgelegt. Es herrscht in der Industrie die Annahme, dass ein Vernetzungsgrad von über 65 % für einen zuverlässigen Betrieb ausreicht. Allerdings deuten Untersuchungen darauf hin, dass sowohl ein zu niedriger als auch ein zu hoher Vernetzungsgrad die Modulzuverlässigkeit negativ beeinflussen kann, beispielsweise durch Adhäsionsverlust. Feldbeobachtungen bestätigen, dass eine erhebliche Anzahl an Modulen mit unzureichender Vernetzung (< 66 %) installiert wird, was auf Mängel im Produktionsprozess hindeutet.

Die Lamination stellt zudem oft den **Flaschenhals in der Modulproduktion** dar, weshalb ein starker wirtschaftlicher Anreiz besteht, diesen Prozess zu beschleunigen. Gleichzeitig kann die Qualität der eingesetzten Polymerfolien erheblich schwanken, was eine kontinuierliche Anpassung der Prozessparameter erfordern würde, um eine gleichbleibend hohe Produktqualität zu sichern.

Trotz der enormen Bedeutung fehlt es in der Industrie an etablierten, **zerstörungsfreien und inline-fähigen Prüfmethoden**, um den Vernetzungsgrad flächendeckend zu kontrollieren. Die Qualitätskontrolle beschränkt sich oft auf stichprobenartige, zerstörende Tests, was die Aufdeckung systematischer Prozessfehler erschwert. Für Systembauer und Betreiber von PV-Anlagen besteht ebenfalls keine praxistaugliche Methode, um die Qualität der Verkapselung bei der Wareneingangskontrolle oder im Feld zu überprüfen. Diese Lücke im Qualitätsmanagement stellt ein erhebliches Risiko für die Langzeitperformance und die Investitionssicherheit von PV-Anlagen dar. Hier setzt das Projekt EVAplus an, um durch die Entwicklung innovativer Messtechnik und eines ganzheitlichen Qualitätssicherungskonzepts die Zuverlässigkeit und Produktivität in der gesamten Wertschöpfungskette zu erhöhen.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Der gewählte Lösungsweg zur Erreichung der Projektziele gliedert sich in fünf zentrale Arbeitspakete (AP), deren Inhalte im Folgenden dargestellt sind. Die Arbeiten umfassen die Identifikation von Materialien und deren Eigenschaften, die Weiterentwicklung der

Messtechnik, die Untersuchung optimierter Materialparameter für die Langzeitzuverlässigkeit, die Entwicklung eines Industrie-4.0-Ansatzes für die Lamination sowie die Etablierung einer Qualitätssicherung im Systembau.

3.1. Material- und BOM-Identifikation (AP1)

Dieses Arbeitspaket legt die Grundlage für eine "smarte" Qualitätskontrolle der Lamination. Mithilfe verschiedener zerstörungsfreier optischer und zerstörender chemischer Methoden werden die für die Zuverlässigkeit entscheidenden Materialeigenschaften erfasst.

Optische Methodenentwicklung: Zerstörungsfreie spektroskopische Verfahren (NIR, Raman, Lumineszenz) werden entwickelt, um einen "optischen Fingerabdruck" von Polymerfolien zu erzeugen. Dies dient der Materialerkennung und der Abschätzung mikrostruktureller Eigenschaften, auch bei gealterten Proben.

Aufbau einer BOM-Datenbank: Es wird eine zentrale Datenbank für Materialeigenschaften (Bill of Materials, BOM) entwickelt. Mittels Pyrolyse-GCMS werden chemische Fingerabdrücke von gängigen Folien erstellt, um deren Additive (Vernetzer, Stabilisatoren) zu identifizieren und zu quantifizieren. Diese Datenbank integriert chemische, optische und mikrostrukturelle Informationen und bildet die Basis für FEM-Simulationen und eine verbesserte, industrielle Qualitätssicherung.

3.2. Untersuchungen zur Vernetzungsgradbestimmung (AP2)

Dieses Paket fokussiert auf die Weiterentwicklung der zerstörungsfreien Messtechnik zur Bestimmung des Vernetzungsgrades als zentralem Indikator für die Laminationsqualität.

Entwicklung eines digitalen Zwillings: Für das X-Link®-Verfahren wird ein FEM-basierter digitaler Zwilling entwickelt. Dieser simuliert den Einfluss verschiedener Materialkombinationen (BOMs) auf die Messergebnisse (LXM-Werte) und unterstützt die Kalibrierung der Messtechnik für unbekannte Materialien.

Herstellung und Alterung von Prüfkörpern: Es werden gezielt PV-Minimodule mit variablen Vernetzungsgraden und unterschiedlichen Materialkombinationen gefertigt. Diese werden definierten Alterungsprozessen (z. B. Damp-Heat) unterzogen, um den Einfluss des Vernetzungsgrades auf die Modulzuverlässigkeit zu untersuchen.

Analyse von Materialvariabilitäten: Die chemische Zusammensetzung kommerzieller Folien wird flächendeckend untersucht, um Inhomogenitäten in der Additivverteilung zu identifizieren und deren Einfluss auf die Laminationsqualität zu bewerten.

3.3. Optimierte Materialparameter für Langzeitzuverlässigkeit (AP3)

In diesem Arbeitspaket wird der optimale Bereich für den Vernetzungsgrad definiert, der eine maximale Langzeitstabilität von PV-Modulen gewährleistet.

Analyse von Feldrückläufern: Module mit langjähriger Feldexposition und bekannten Auffälligkeiten werden analysiert, um den Materialzustand und den Vernetzungsgrad zu bestimmen und mit Degradationsmustern zu korrelieren.

Entwicklung neuer Alterungstests: Über Standard-IEC-Tests hinaus werden realitätsnahe, beschleunigte Bewitterungstests entwickelt, die eine bessere Vorhersage der Moduldegradation und Lebensdauer ermöglichen.

Korrelation nach Alterung: Die Veränderung des Vernetzungsgrades und der LXM-Werte während der Alterung wird systematisch untersucht, um eine verlässliche Interpretation von Messwerten an gealterten Modulen zu ermöglichen.

3.4. Industrie 4.0-Ansatz für Laminationsoptimierung (AP4)

Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen wird ein Rahmen für eine zuverlässigkeitsoptimierte und gleichzeitig beschleunigte Produktion entwickelt.

Konzept für kontinuierliche Prozessführung: Es wird ein Konzept entwickelt, das eine vorausschauende, ergebnisgesteuerte Prozessführung ermöglicht. Dabei werden die chemische Zusammensetzung der Eingangsfolien und die thermische Kapazität des Laminats berücksichtigt, um das Prozessergebnis (den Vernetzungsgrad) präzise vorherzusagen.

Prozessoptimierung und Risikobewertung: Die gewonnenen Daten werden in eine quantitative finanzielle Risikoanalyse überführt. Dieser Ansatz ermöglicht es, die Laminationsprozesse nicht nur technisch, sondern auch wirtschaftlich zu optimieren.

3.5. Qualitätssicherung im Systembau (AP5)

Das erarbeitete Wissen wird genutzt, um eine robuste und wirtschaftliche Qualitätssicherung für Systembauer (EPCs) bei der Wareneingangskontrolle zu etablieren.

Statistisch fundierte Messpläne: Basierend auf Fehlerhäufigkeiten und deren Einfluss auf die Systemzuverlässigkeit werden statistisch abgesicherte Prüfszenarien (z.B. nach ISO 2859) entwickelt. Diese optimieren die Anzahl der Messungen, um bei minimalen Kosten eine maximale Wahrscheinlichkeit der Fehleridentifikation zu gewährleisten.

Praxisvalidierung: Die entwickelten Methoden werden im realen Wareneingang bei Partnern wie IBC Solar demonstriert und validiert. Ein Round-Robin-Test bestätigt die Reproduzierbarkeit der Messungen zwischen verschiedenen Geräten und Anwendern.

4. Ausgangssituation und Stand der Technik

An dieser Stelle wird auf die Recherche zum wissenschaftlichen und technischen Stand im Projektantrag verwiesen auf dessen Basis das Projekt beantragt und gestartet wurde.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Projekt EVAplus wurde durch die enge Zusammenarbeit eines Konsortiums aus Industrie- und Forschungspartnern realisiert, welches die gesamte Wertschöpfungskette von der Messtechnik über die Modulproduktion bis hin zum Systembau abdeckt. Die Koordination des Verbundprojekts lag bei der **LayTec AG**, die als Entwicklerin des X-Link®-Verfahrens ihre Expertise in die Weiterentwicklung der Messtechnik einbrachte.

Für die Entwicklung und Validierung der Messtechnik sowie die Herstellung von Prüfkörpern mit definierten Eigenschaften war die **Sunset Energietechnik GmbH** als Modulhersteller ein

zentraler Partner. Sunset produzierte spezielle Laminate und Minimodule mit variablen Vernetzungsgraden und unterschiedlichen Materialkombinationen (BOMs), die als Grundlage für Alterungstests und Round-Robin-Vergleiche dienten. Zudem wurden hier die entwickelten Konzepte zur Prozessoptimierung in einer produktionsnahen Umgebung getestet.

Das **PI-Institut für Photovoltaik Berlin AG (PI Berlin)** brachte seine umfangreiche Erfahrung aus Fabrikinspektionen und Zertifizierungstests ein. PI Berlin stellte industrierelevante Folienproben zur Verfügung, führte Vergleichsmessungen des Vernetzungsgrades durch und beteiligte sich an den Alterungstests kommerzieller und speziell gefertigter Proben.

Aus der Perspektive des Systembaus und des EPC (Engineering, Procurement, and Construction) lieferte **IBC Solar AG** wertvolle Einblicke und stellte PV-Module als Testobjekte bereit. Insbesondere wurde ein 18 Jahre alter Feldrückläufer für detaillierte Degradationsanalysen zur Verfügung gestellt. Zudem fanden bei IBC Solar vor Ort Messungen statt, um die Praxistauglichkeit der entwickelten Qualitätssicherungsverfahren in der Wareneingangskontrolle zu demonstrieren und zu verifizieren.

Die **Hochschule Anhalt (HSA)** unterstützte das Projekt maßgeblich durch die Entwicklung optischer Methoden zur Materialerkennung und zur Abschätzung mikrostruktureller Eigenschaften, unter anderem mittels NIR-, Raman- und Lumineszenz-Spektroskopie. Die HSA übernahm zudem die simulative Unterstützung für die FEM-Modelle, um die Korrelation zwischen LXM-Werten und dem Vernetzungsgrad mit minimaler Kenntnis der Materialeigenschaften zu verbessern.

Innerhalb des Projektkonsortiums fand ein intensiver Austausch statt, der durch regelmäßige digitale Treffen und mehrere Präsenztreffen bei den Partnern LayTec, PI Berlin, CSP und Sunset gefördert wurde. Die enge Kooperation manifestierte sich auch in einem Round-Robin-Test zur Bestimmung des Vernetzungsgrades, an dem LayTec, Sunset, PI Berlin, IBC Solar und das Fraunhofer CSP beteiligt waren, um die Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit der verschiedenen Messmethoden zu gewährleisten.

II. Eingehende Darstellung

1. Verwendung der Zuwendung und die wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse

1.1. AP0: Management, Koordination und Dissemination

Um die Dissemination der Projekteinzelheiten voranzutreiben, wurden die Projektinformationen auf der Fraunhofer-Webseite und in der Mitteldeutschen Zeitung veröffentlicht.

Das Projektkonsortium hat sich fast monatlich digital getroffen, um die aktuellen Ergebnisse zu diskutieren und die nächsten Schritte zu besprechen. Es fanden vier Treffen in Persona bei LayTec, PI Berlin, CSP und Sunset statt, sowie weitere Treffen auf Messen und Konferenzen. Die Ergebnisse wurden bisher in mehreren Konferenzbeiträgen und Journal Artikeln veröffentlicht (Tabelle 1).

Tabelle 1: Publikationen im Rahmen des Projektes EVAplus mit Beteiligung der Hochschule Anhalt (HSA).

Nr	Publikationsort	Art	Titel	Projektpartner
1	38. PV-Symposium (2023)	Poster	Untersuchung des Einflusses der Materialkombination auf die UV-Fluoreszenz von Folien für photovoltaischer Module	HSA, CSP
2	23. Nachwuchswissenschaftler*innenkonferenz (2023)	Poster	Non-destructive monitoring of mechanical and chemical changes in PV-mini-modules produced using variable lamination times	HSA, CSP
3	23. Nachwuchswissenschaftler*innenkonferenz (2023)	Poster	Analyse der Fähigkeit der UV-Fluoreszenz zur Bewertung der Alterung der Verkapselung zur Verbesserung der Zuverlässigkeit und Qualität von Photovoltaikmodulen	HSA, CSP
4	40. EUPVSEC (2023)	Vortrag	Non-destructive monitoring of mechanical and chemical changes in PV mini modules produced using variable lamination times	HSA, CSP
5	40. EUPVSEC (2023)	Poster	Influence of the material combination on the UV fluorescence of films for photovoltaic modules	HSA, CSP
6	40 EUPVSEC (2023)	Poster	COMPUTATIONAL SIMULATION AND EXPERIMENTAL VERIFICATION OF NON-DESTRUCTIVE TESTING OF PV MODULE ENCAPSULANT CROSS-LINKING	HSA, CSP, LayTec
7	40 EUPVSEC (2023)	Poster	Results and Sensitivity Assessments from a Cross-Technological Round-Robin Verification of Destructive and Non-Destructive Test Methods for Determining the Degree of Cross-Linking of Photovoltaic Module Encapsulants	HSA, CSP, LayTec, PIB, Sunset, IBC
8	39. PV-Symposium (2024)	Poster	Anwendbarkeit von Ultraviolett-Fluoreszenz (UVF) zur Bestimmung der Alterung moderner Verkapselungsmaterialien für photovoltaischer Module	HSA, CSP
9	39. PV-Symposium (2024)	Poster	Neue Einblicke in den Zusammenhang von unzureichender Lamination mit der Modulzuverlässigkeit	HSA, CSP
10	52. IEEE PVSC (2024)	Oral Presentation & Proceedings	Probing effects of the lamination time on module reliability using new variations of the sequential UV/TC stress testing	HSA, CSP

Nr	Publikationsort	Art	Titel	Projektpartner
11	41. EUPVSEC / Progress in Photovoltaics	Vortrag	Crosslinking Behavior of Ethylene-Vinyl Acetate Copolymer Encapsulants in Dependence of the Additive Composition	HSA, CSP
12	41. EUPVSEC	Poster	Evaluation of the Impact of the UV Excitation Intensity on the Ultraviolet Fluorescence Measurement System for Photovoltaics	HSA, CSP
13	Progress in Photovoltaics: Research and Applications	Artikel	Crosslinking Behavior of Ethylene-Vinyl Acetate Copolymer Encapsulants in Dependence of the Additive Composition	HSA, CSP
14	3. Backsheet-workshop at HI ERN	Vortrag	Backsheets-Degradation according to sequential UV/TC-Tests on module level	HSA, CSP
15	40. PV-Symposium	Vortrag	Untersuchung der Backsheets-Rissbildung und Zuverlässigkeit von PV-Modulen mit variabler Laminierzeit anhand neuer Variante des seq. UV/TC-Stresstests	HSA, CSP
16	53. IEEE PVSC (2025)	Vortrag & Proceedings	Exploring acceleration limits of the pressure cooker tests for the assessment of the lamination conditions on the module degradation rate	HSA, CSP

1.2. AP 1. Material- und BOM-Identifikation

AP 1.1 Entwicklung optischer Methoden zur Materialabschätzung

Die HSA liefert in AP 1 Ergebnisse zur optischen Materialerkennung der verwendeten Polymerfolien, und trägt zur Vermessung der Folienvariabilität der Produktion bei.

Eine Übersicht zu mobiler, nicht zerstörender Messtechnik für die Erstellung des Fingerabdrucks von Einkapselungsmaterialien zeigen Tabelle 2 und **Error! Reference source not found.**.

Tabelle 2: Testmethoden zur Qualifikation von PV-Modulen.

Methode	**Beschreibung**
IR-Kamera, mit Drohne	Thermal Infrarot Inspektion, in Überflug
UV-Fluoreszenz (UVF)	UV-Torch und Kamera, um Lumineszenz Effekte gealterter Polymer Materialien zu messen
Mikroskopie (Material)	Oberflächenuntersuchung
Spektroskopie (Module)	IR, Raman, UV-VIS Messung an Polymermaterial

Tabelle 3: Anhand folgender – als geeignet definierter - spektroskopischer Verfahren können geeignete und charakteristische Werte von Polymerfolien bestimmt werden.

Methode	**Status**
Nah-Infrarot (NIR)	Ein Trinamix-Gerät zur mobilen zerstörungsfreien Vermessung von Polymerspektren (Einkapselung sowie Rückseitenfolien am PV-Modul) und Materialbestimmung wurde beschafft, und befindet sich seit 11-2022 im Einsatz.
Raman	Als Kombigeräte zusammen mit FLIM. Erste Inbetriebnahme im April 2023. Kurze Zeit später traten erhebliche Probleme auf, die Messungen teilweise unmöglich machten.
FLIM	In Auslieferung, als Kombigerät zusammen mit Raman, s.o.
FTIR-ATR	Messung am CSP möglich.
UV-Lumineszenz	Proof of Concept durch Prototyp an der HSA.

AP 1.1.c. Nah-Infrarot Spektroskopie

NIR Spektroskopie ist für nicht prozessierte Folien die wahrscheinlich einfachste Methode optische Fingerabdrücke zu generieren. In einem Laminat ist dies mit einem höheren Risiko behaftet, da z.B. Reflexionsspektroskopie (FTIR-ATR) nur die oberste Schicht misst, also nur die Rückseitenfolie, und keine Informationen über die Verkapselung liefert. Es werden verschiedene Ansätze bewertet und die Möglichkeit eines Fingerabdrucks untersucht.

Für die Messungen und Bewertung von Ansätzen zur Erstellung des Material-Fingerabdrucks wurden zunächst Gerätehersteller kontaktiert und Nahinfrarotspektroskopie Testmessungen an verschiedenen Einrichtungen, einschließlich Fachmessen, durchgeführt.

Generell ist bekannt, dass die Nahinfrarotspektroskopie (NIR) zur Erfassung charakteristischer Spektren verschiedener Polymermaterialien eingesetzt werden kann. Parameter dafür wurden im Rahmen eines Mini Round-Robin in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer CSP definiert. Die vermessenen Proben wurden vom CSP und weiteren Projektpartnern bereitgestellt. Im Rahmen des Mini Round-Robin wurden mehrere kommerzielle und prototypische NIR-Systeme verschiedener Projektpartner miteinander verglichen, darunter Referenz- und Entwicklungsgeräte unterschiedlicher Spektralbereiche.

Stroyuk et al. haben gezeigt, dass es in einem Spektralbereich von etwa 1700–2500 nm mehr Unterschiede in den NIR-Spektren der unterschiedlichen Materialen gibt.[1,2] Die trinamiX GmbH bietet zum Beispiel ein Gerät zur Materialerkennung inklusive Software für die Photovoltaik an, welches einen Spektralbereich von 1450–2450 nm abdeckt.

In Abbildung 1.b sind die NIR-Spektren von neun Einkapselungspolymeren im Verbund mit, in Abbildung 1.a fünf Rückseitenfolien gezeigt.

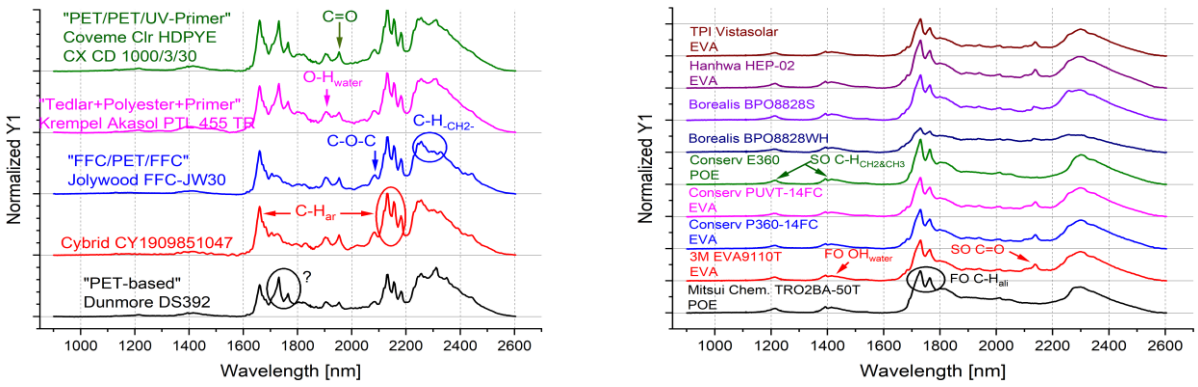

Abbildung 1 (a) NIR-Spektren von fünf Backsheets und (b) neun Verkapselungsfolien.

AP 1.1.d. Raman- & Lumineszenz-Spektroskopie

Raman-Spektroskopie ist eine recht gängige Methode. Die HSA hat einen Raman-Messstand für Halbleiter installiert und wird diesen für Raman- und Lumineszenz-Spektroskopie für Verkapselungsfolien anpassen. Ein Augenmerk hier liegt auf der Trennung der Signale, da die spektrale Emission der Folien im selben Wellenlängenbereich liegen können. Entsprechende Methoden werden entwickelt.

In Abbildung 2 ist das Raman-Spektrum einer fluoreszierenden Verkapselungsfolie gezeigt. Wegen der Fluoreszenz erscheinen die Raman-Banden mit geringer Intensität. Aufgrund erheblicher Probleme mit dem Messgerät konnten die Trennung der Signale im Projektzeitraum nicht abgeschlossen werden.

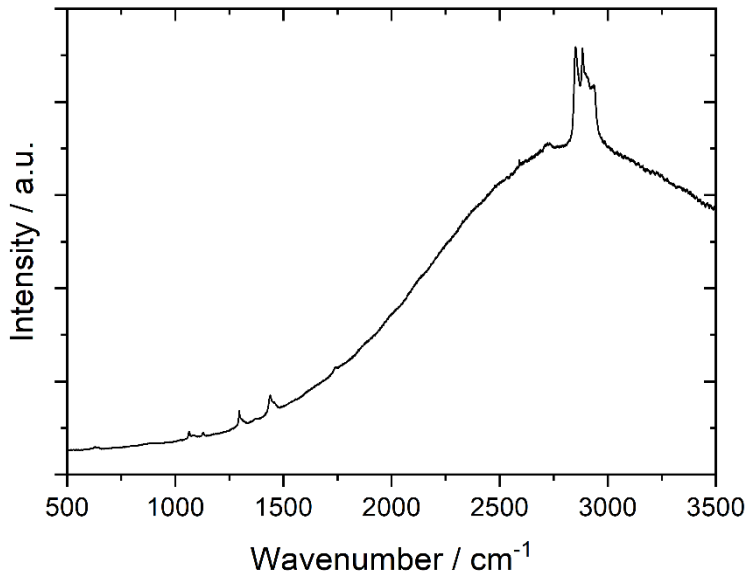

Abbildung 2: Raman-Spektrum einer EVA-Verkapselungsfolie mit einer Anregungswellenlänge von 375 nm.

AP 1.1.e Fluorescence Lifetime Imaging

FLIM ist eine Methode, die oftmals für die Charakterisierung von Polymeren eingesetzt wird. Die HSA erwartet ein derartiges System und wird es für die Materialidentifizierung nutzbar machen. Ziel ist hier nicht das physikalische Verständnis der verschiedenen Emissionsprozesse, sondern eine Charakteristik für verschiedene Materialien zu identifizieren und z.B. zeitaufgelöste Emissionsspektroskopie zu nutzen, um Lumineszenz- und Raman-Signale zu trennen.

Das erwartete System zur Materialidentifizierung kam mit erheblichen Verspätungen und technischen Problemen. Dadurch gab es ein deutlich reduziertes Zeitfenster. Es wurden, und werden, verschiedene Materialien gemessen und in eine Datenbank gespeichert (Abbildung 3). Zusätzlich werden Proben selbst hergestellt und gealtert, um das Verständnis der Alterungsprozesse zu erhöhen (siehe AP 1.1f).

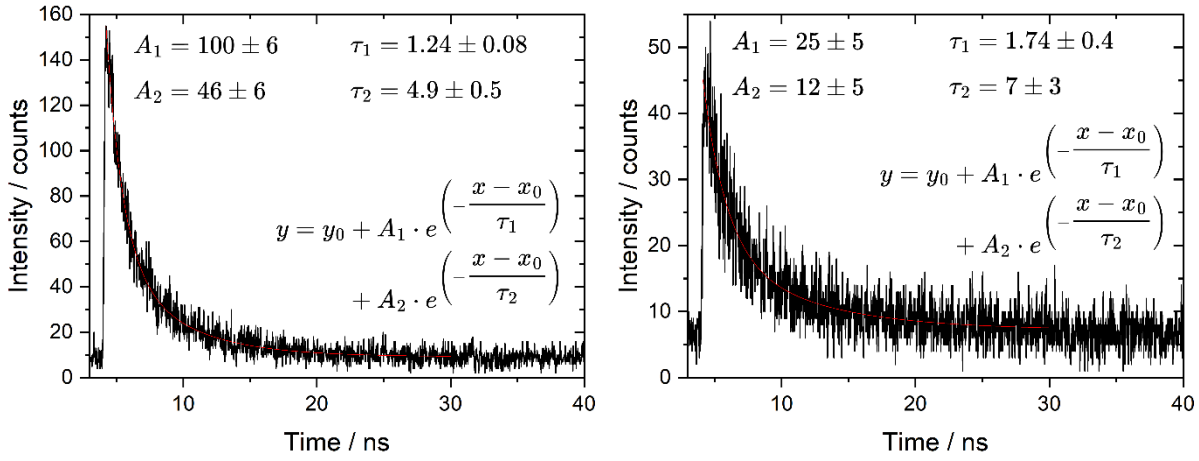

Abbildung 3: TCSPC von einem Backsheet, links, und einer Verkapselungsfolie, rechts, bei einer Anregung bei 375 nm.

AP 1.1.f Fingerabrücke alternder Proben

Am CSP bewitterte Proben werden vor und an definierten Punkten der Alterung in dem optischen System der HSA vermessen. Hier werden optische Fingerabdrücke für exponierte Materialien gemessen und in die Projekt-Datenbank eingespeist. Dies ist nötig da sich das spektrale Emissionsspektrum im Laufe der Exponierung verändert und eine Materialerkennung bestenfalls unwahrscheinlich macht, wenn die Veränderungen nicht berücksichtigt werden.

Es wurden am CSP Minimodule mit verschiedenen Laminationszeiten hergestellt. Diese Minimodule wurden mittels Feuchte-Wärme Prüfung (Damp-Heat (DH) 85 °C, 85 %rh) bewittert und anschließend mittels NIR gemessen (siehe Abbildung 4).

Abbildung 4: Position auf dem Minimodul an denen NIR-Spektren gemessen wurden.

Die Spektren der Module in Abbildung 5, bestehen aus der Verkapseltungsfolie und der Rückseitenfolie. Gezeigt sind die Spektren bis 1000h DH-Bewitterung. Die Spektren enthalten Komponenten der Rückseitenfolie und der Verkapselungsmaterials und sind über die Bewitterungsdauer weitgehend konstant. Die Unterschiede bei 1900 nm sind auf unterschiedliche Wassergehalte in den Laminaten zurückzuführen. Sind entstanden, weil die Module zu unterschiedlichen Zeitpunkten nach der Bewitterung gemessen wurden.

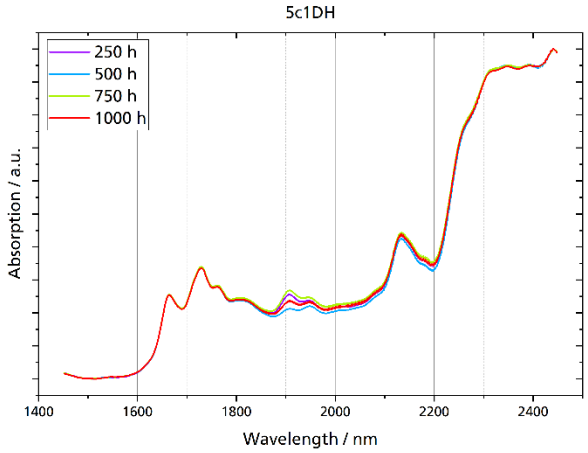

Abbildung 5: Gezeigt sind NIR-Spektren von Minimodulen nach jeweils 250 h Bewitterung unter DH.

Raman-Spektroskopie

Es wurden Messungen von gealterten Mini-Modulen gemacht. Die mini-Module wurden bei 85°C, 60%rh und einer Strahlungsintensität von 77 W/m² zwischen 280–380 nm bewittert. In Abbildung 6 links sind die normierten Raman-spektren gezeigt. Es sind keine negativen Einflüsse von Chromophoren messbar. In Abbildung 6 rechts sind die Differenzspektren

gezeigt. Es wurde die Differenz der Spektren von der gealterten Probe minus der Referenzprobe gebildet. Nach 1000 h sind ein paar Veränderungen bei 2900, 1450 und 1300 cm^{-1} erkennbar, die sich danach jedoch nicht fortführen. Die Differenzen bei 520 cm^{-1} resultieren aus verschiedenen Messabständen zur Silizium-Zelle.

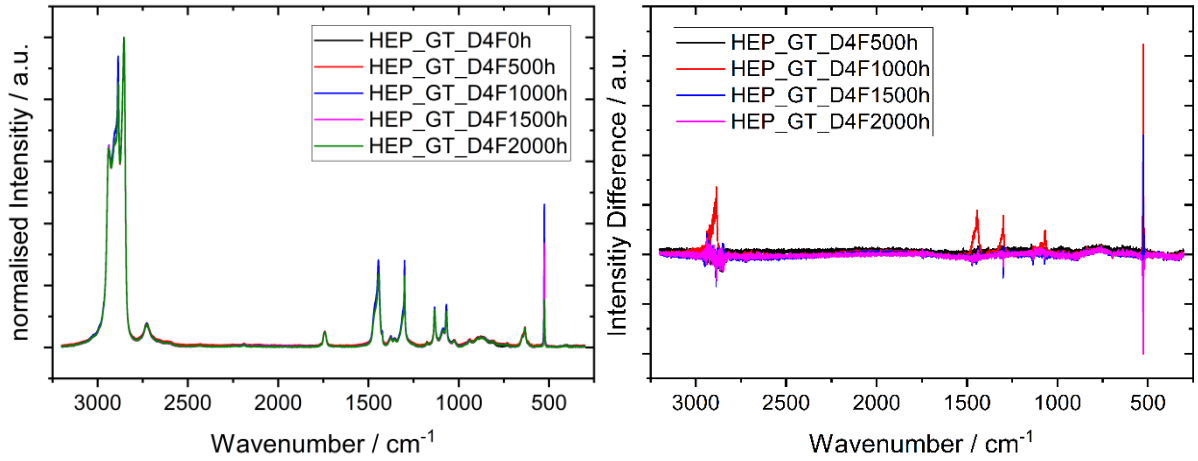

Abbildung 6: Raman-Spektren von gealterten mini-Modulen. Links: Normalisierte Spektren, rechts: Differenzspektrum jeweils zur Referenz mit 0 h.

Lumineszenz-Spektroskopie

Für den Test der Tauglichkeit von lumineszenzspektroskopischen Messungen für eine Identifikation wurden mehrere UV-Fluoreszenz Messgeräte gebaut. Der erste Prototyp ist in Abbildung 7 gezeigt und neue, sowie gealterten Polymerproben wurden gemessen.

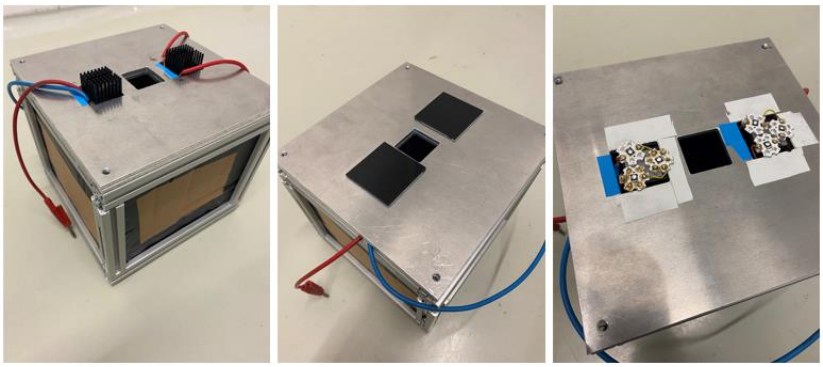

Abbildung 7: Erster Prototyp eines UV-Fluoreszenzmessaufbaus.

Mittels UV-F wurden zwei Methoden zur Identifikation von Materialverhalten getestet. Die erste Messung umfasst die Fluoreszenzveränderungen während der Alterung von verschiedenen Einkapselungsmaterialien. Der zweite Messmethodenansatz umfasst Fluoreszenzveränderungen während der Alterung von Mini-PV-Modulen mit verschiedenen Vernetzungsgraden.

Untersuchung des Einflusses der Materialkombination auf die UV-Fluoreszenz von Polymerfolien für PV Module

In einer ersten Studie mit diesem Prototypen (Version 1) wurden die folgenden Punkte untersucht:

- Trend und Veränderung der fluoreszierenden Fläche bei gleichem Verkapselungsmaterial über den Alterungszeitraum;
- Analyse der in den Farbwerten eines UVF-Bildes enthaltenen Informationen;
- Unterschiedliche UVF-Bilder von PV-Modulen mit verschiedenen Verkapselungsmaterialien nach der Alterung und ihre jeweiligen Eigenschaften.

Um die oben genannten Ziele zu erreichen, wurde die Studie in den folgenden Schritten durchgeführt.

1. Die PV-Module mit verschiedener Verkapselungsmaterialien werden in Klimakammern bei verschiedener Zeit (z.B. 0h, 250h, 500h…) und bei gleichen Alterungsbedingungen altern;
2. Regelmäßige Messungen mit UVF-Messgerät während des Alterungsprozesses;
3. Berechnung des Verhältnisses zwischen der Fluoreszenzfläche in der UVF-Bild und der Gesamtfläche;
4. Analyse und Vergleich der Unterschiede zwischen den Farbwerten von RGB-Bildern;
5. Vergleich der Veränderung der Fluoreszenzfläche in UVF-Bildern mit dieselben Verkapselungsmaterial während der Alterung;
6. Vergleich von UVF-Bildern von PV-Modulen mit verschiedenen Verkapselungsmaterialien im gleichen Alterungsstadium.

Probenvorbereitung

Polymere für Verkapselung:

1. ENC1 (Folienmaterial: TPO), beispielsweise BPO
2. ENC2 (Folienmaterial: EVA)
3. ENC4 (Folienmaterial: POE)

Polymere für Backsheet:

1. BS1 (Grundmaterial: PPE)
2. BS4 (Grundmaterial: FFC//PET//FFC)

Tabelle 4: Übersicht der verschiedenen Materialkombinationen.

Kombination	Typen der Polymere
1	BS1 + ENC1
2	BS1 + ENC2
3	BS1 + ENC4
4	BS4 + ENC1
5	BS4 + ENC2
6	BS4 + ENC4

Für jede Probe und Kombination wurde eine Kopie auf die gleiche Weise angefertigt. Alle Probenmuster wurden nach der Herstellung laminiert. Nach dem Laminationsvorgang wurden alle Proben abgekühlt und in der Klimakammer gealtert.

Alterungsbedingungen

1. DH-UV (85°C, 60% RH, Einstrahlung zwischen 170 und 300 W/m² (280 -400nm))
2. DH (85°C, 85%RH)

Ergebnisse:

Abbildung 8: UVF-Bilder der mit DH gealterten Proben (oben: 0h, unten: 250h).

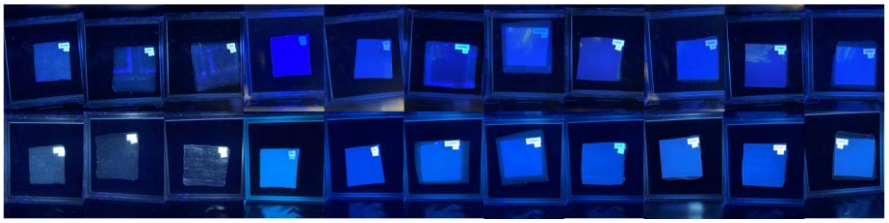

Abbildung 9: UVF-Bilder der mit DH-UV gealterten Proben (oben: 0h, unten: 250h).

Um UVF-Bilder verschiedener Materialkombinationen zu analysieren, wurde ein Algorithmus entwickelt, der die Fluoreszenzveränderungen verschiedener Materialkombinationen während des Alterungsprozesses quantifiziert. Zunächst wurde das Bild in ein Graubild umgewandelt. Anschließend wurde ein Bereich von 200 mal 200 Pixeln als Berechnungsgebiet in jedem UVF-Bild ausgewählt. Daraus wird der durchschnittliche Pixelwert innerhalb dieses Bereichs berechnet. Die Fluoreszenzvariation wird durch die Analyse des durchschnittlichen Pixelwerts des UVF-Bildbereichs für verschiedene Materialkombinationen quantifiziert (Abbildung 10).

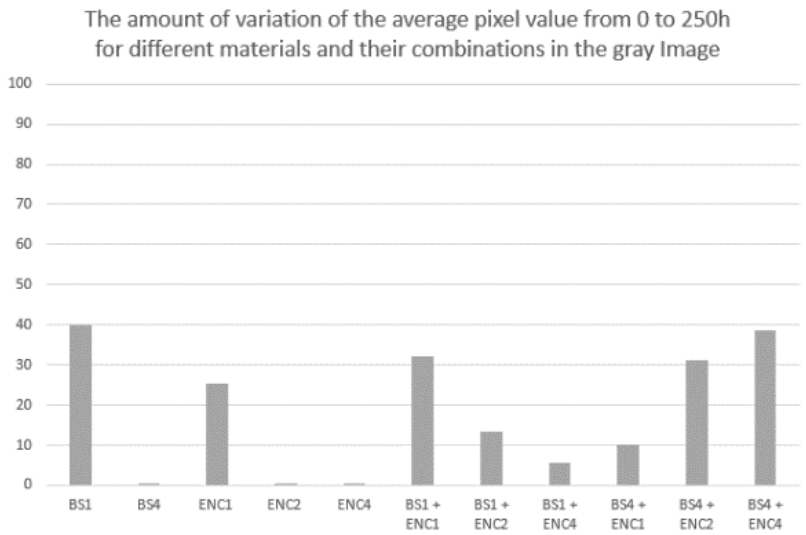

Abbildung 10: Die Höhe der Variation des durchschnittlichen Pixelwertes von 0 bis 250h für verschiedene Materialien und deren Kombinationen im Graubild.

Bei der Beobachtung der Fluoreszenzveränderungen in UVF-Graubildern verschiedener Materialien nach der Alterung wurde festgestellt, dass die Veränderungen der durchschnittlichen Pixelwerte in den UVF-Graubildern bei BS4, ENC2 und ENC4 sehr gering waren. Bei Auswertung der RGB-Bilder (Abbildung 11) auf ähnlicher Weise wurde eine deutliche Veränderung festgestellt. Es wurde die Vermutung geäußert, dass die Analyse der Graubilder von UVF-Bildern einige Einschränkungen aufweist. Ein Vergleich der Daten zeigt, dass die Variation der durchschnittlichen Fluoreszenzpixelwerte in den verschiedenen RGB-Schichten stärker ausgeprägt ist als im Graubild und dass die Fluoreszenzvariation verschiedener Materialkombinationen ein sehr unterschiedliches Verhalten zeigen. Die Ergebnisse zeigen auch, dass der durchschnittliche Pixelwert der roten Schicht bei einigen Materialien und Materialkombinationen (z. B. BS1, BS4, BS1+ENC1, BS1+ENC2, BS1+ENC4, BS4 + ENC1) nach der Alterung kleiner wird und gegen 0 tendiert.

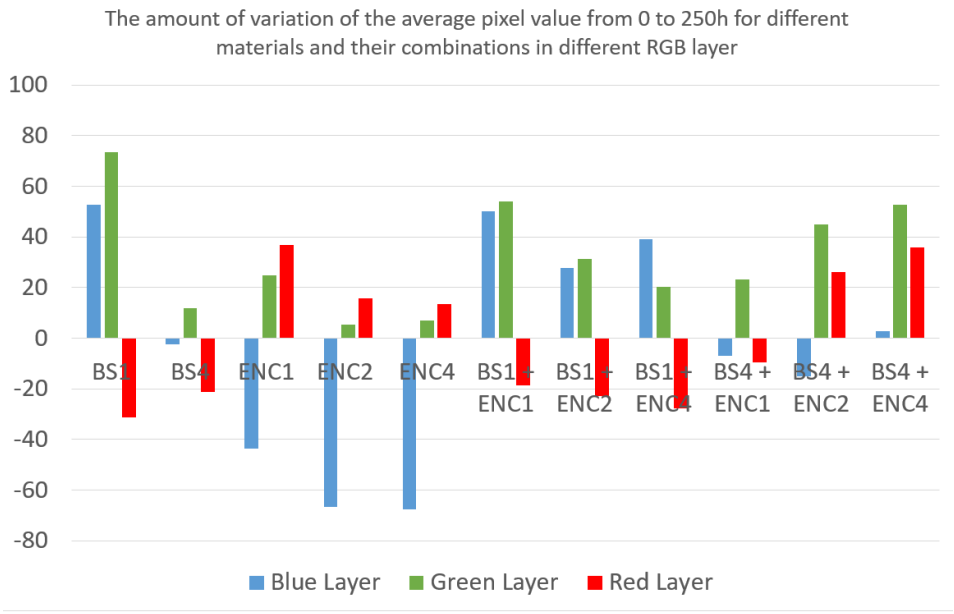

Abbildung 11: Die Höhe der Variation des durchschnittlichen Pixelwertes von 0 bis 250h für verschiedene Materialien und deren Kombinationen in den verschiedenen RGB-Schichten.

Während aller Tests war die Belichtung der Kamera ausgeschaltet und es wurde keine Zoomfunktion verwendet. Die Versorgungsspannung und der Strom der LED-Lampen wurden bei allen Versuchen auf demselben Wert gehalten, um den Lichtstrom des emittierten UV-Lichts zu kontrollieren. Da die Temperatur der LED-Lampe auch die Effizienz der UV-LEDs beeinflusst, wurden alle Aufnahmen innerhalb von zehn Sekunden gemacht und das System wurde nach jedem Test ausgeschaltet, um Lichtstromänderungen aufgrund hoher Temperaturen zu vermeiden.

Um die Veränderungen der Fluoreszenzintensität der Proben während des Alterungsprozesses zu analysieren, wurde der durchschnittliche Pixelwert jeder RGB-Schicht als Basisparameter zur Quantifizierung der Fluoreszenzintensität verwendet. Aufgrund des Abbaus der Probe während des Alterungsprozesses würde die Berechnung des durchschnittlichen Pixelwerts des gesamten Bildes zu einer Abweichung führen. Aus diesem Grund wird ein Teil des UVF-Bildes (200*200 Pixel) aus dem Gesamtbild extrahiert und für die Analyse und Berechnung des durchschnittlichen Pixelwerts verwendet.

UVF-Bilder bei visueller Inspektion

UVF-Bilder nach der Lamination

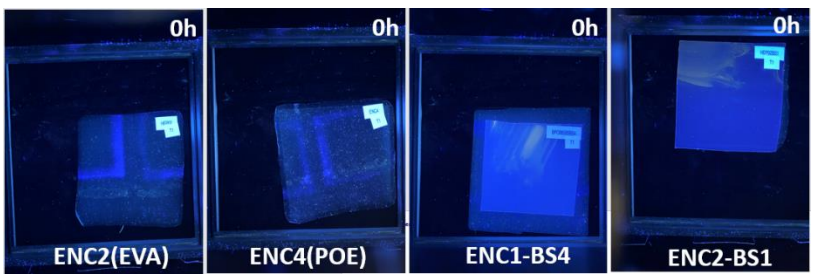

Abbildung 12: Ungleichmäßige Muster, die in den UVF-Bildern einiger der laminierten Proben erscheinen.

Die Fluoreszenz der Proben zeigte nach der Lamination die folgenden Phänomene.

- Kastenförmiges Fluoreszenzmuster bei EVA- und POE-Proben und nebliges Fluoreszenzmuster bei ENC1-BS4- und ENC2-BS1-Proben. (siehe Abbildung 12)
- Der Zusammenhang zwischen unterschiedlichen Fluoreszenzmustern und der Qualität der Lamination muss weiter untersucht werden.

Fluoreszenzveränderung während der Alterung

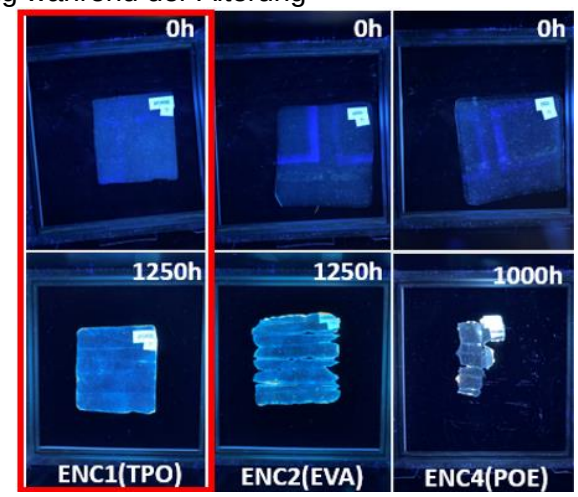

Abbildung 13: Vergleich der UVF-Bilder der Proben TPO, EVA und POE vor und nach der Alterung.

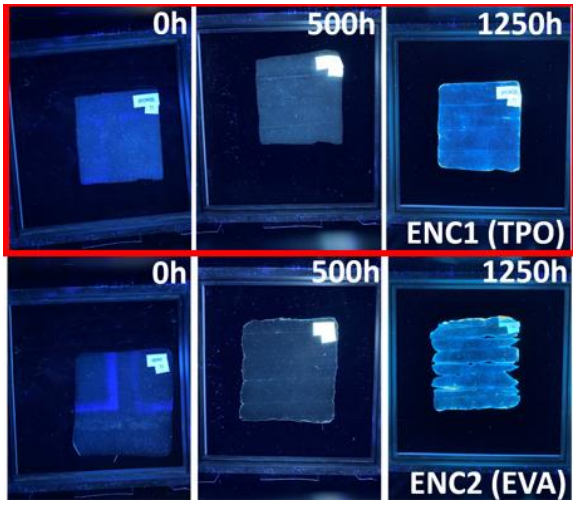

Abbildung 14: Die Fluoreszenz einiger Proben (TPO, EVA) zeigte Farbveränderungen während des Alterungsprozesses.

Die Fluoreszenz der Proben zeigte während der Alterung die folgenden Phänomene.

- Alle Proben (auch die modernen Verkapselungsmaterialien) zeigten eine Zunahme der Fluoreszenzintensität mit zunehmender Alterungszeit. (siehe Abbildung 13)
- Die Fluoreszenzfarbe einiger Proben (TPO, EVA) veränderte sich während der Alterung (von blau zu weiß und schließlich wieder blau). (siehe Abbildung 14)

RGB-basierte Spektralanalyse

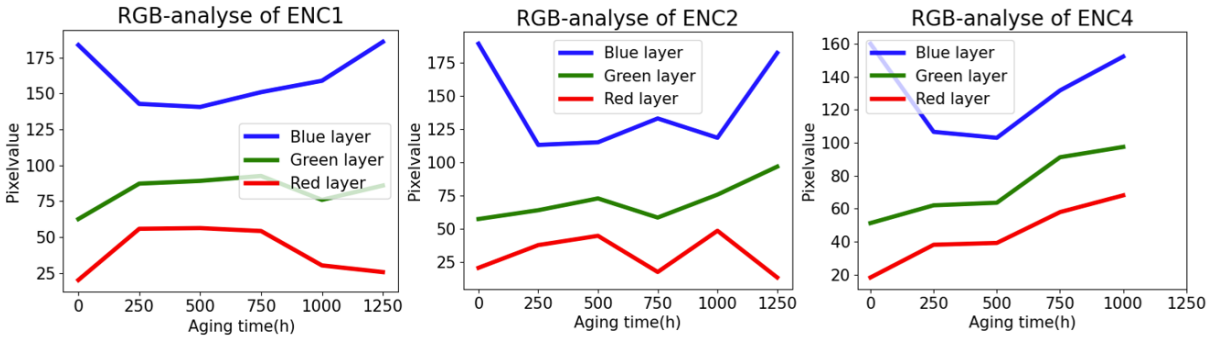

Abbildung 15: Veränderungen der durchschnittlichen Pixelwerte der Fluoreszenz für ENC1, ENC2 und ENC4 in den verschiedenen Farbschichten (Rot, Grün und Blau).

Aus dem Diagramm lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen

- Bei allen Proben nahm die Anzahl der Pixelwerte in der grünen Schicht entsprechend der Alterungszeit zu. (die Grundlage für die Bestimmung des Alterungsgrades) (siehe Abbildung 15 und Abbildung 16)
- Spektrale Veränderungen in der Fluoreszenz verschiedener Proben erklären die Farbveränderungen in Abbildung 14
- Die Pixelveränderung in der grünen Schicht der ENC4-Probe ist deutlich schneller als bei den anderen Proben, was der vollständigen Schädigung der ENC4-Probe nach 1000 Stunden Experimentierzeit entspricht.
- Die Pixelvariation in der roten Schicht der Probe bleibt unklar.

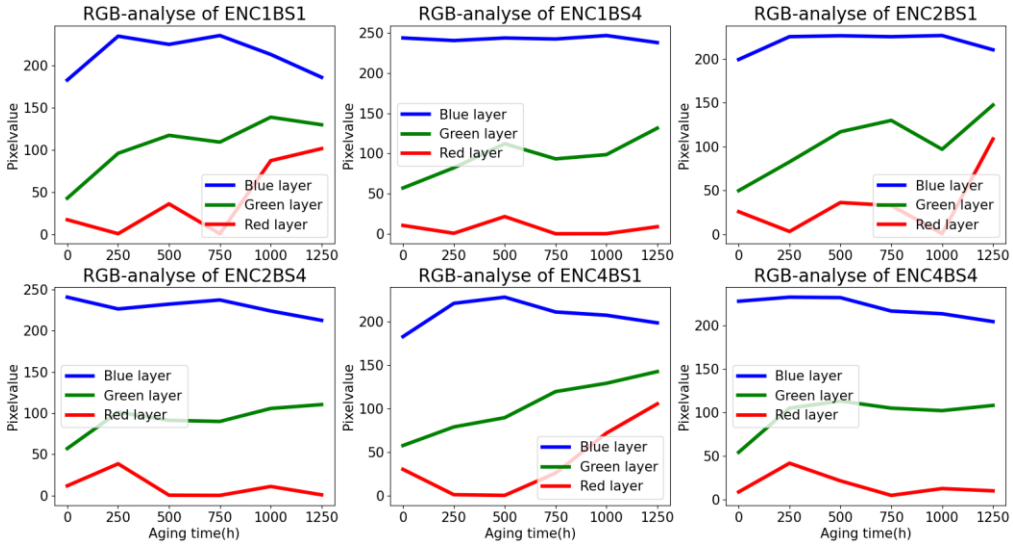

Abbildung 16: Veränderungen der durchschnittlichen Pixelwerte der Fluoreszenz für Proben aus Materialkombination in den verschiedenen Farbschichten (Rot, Grün und Blau).

Aus dem Diagramm lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen.

- Die grüne Schicht der Probe mit BS1 wuchs schneller als die der Probe mit BS4. (Die Art des Backsheets beeinflusst die Geschwindigkeit der Fluoreszenzänderung) (siehe Abbildung 16)

- Die Pixelvariationen in der roten Schicht der Proben aus Materialkombination lassen sich je nach Art der Backsheet in zwei Kategorien einteilen. Dieses Phänomen muss weiter untersucht werden. (siehe Abbildung 16)

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass alle Proben der verschiedenen Verkapselungsmaterialien während ihres Alterungsprozesses Fluoreszenzveränderungen aufwiesen. Allerdings zeigen die Steigerungsrate der Fluoreszenz und die Veränderungen auf der spektralen Ebene je nach Art der Probe unterschiedliche Trends. Dies zeigt auch, dass der Abbauprozess und die Veränderung der Chromophore bei den verschiedenen Verkapselungsmaterialien während des Alterungsprozesses unterschiedlich verlaufen. Daher kann UVF nicht nur als Technik zur Überwachung der Alterung, sondern auch als vielversprechende zerstörungsfreie Technik zur Erkennung von Stücklisten für PV-Module eingesetzt werden. Und der Grund für die unterschiedlichen UVF-Muster der verschiedenen Proben nach der Lamination muss weiter erforscht werden.

Ergebnisse aus Ultraviolett-Fluoreszenz Messkampagnen wurden auf der Nachwuchswissenschaftler Konferenz 2023 und der 41. European Photovoltaic Solar Energy Conference (EU PVSEC) vorgestellt.

TCSPC

Nach einigen Verzögerungen der Inbetriebnahme des time-correlated single photon counting (TCSPC) Systems konnten gealterte mini PV-Module mit einem 532 nm Laser gemessen werden. Es sind deutliche Unterschiede zwischen der Alterung bei 85 °C und 85 %rh (damp-heat, DH) sowie 85 °C, 85 %rh und zusätzlicher UV-Bestrahlung (DHUV) zu sehen. Die Module wurden jeweils an der gleichen Stelle auf der Vorderseite (Verkapselungsfolie: EVA) vermessen DH gealterte Module zeigen eine geringeres Fluoreszenz-Signal als DHUV gealterte Proben (Abbildung 17). Für beide Bewitterungen steigt die Signalintensität mit der Bewitterungsdauer an. Unter DH scheint zunächst eine geringere Laminationszeit mit einer höheren Fluoreszenz einherzugehen, aber Proben mit längerer Bewitterungsdauer zeigen diesen Trend nicht. Bei PV-Modulen nach der DHUV-Bewitterung hat die Probe mit der längeren Laminationszeit eine höhere Fluoreszenz. Es sind bei DHUV jedoch farbliche Ungleichmäßigkeiten zu sehen, sodass weitere Messungen gemacht werden müssen, um eine belastbare Aussage treffen zu können. Ähnliches gilt für die DH-Bewitterung. Die Lebensdaueranalyse des Fluoreszenz-Signals in Abbildung 18 zeigt deutliche Unterschiede zwischen beide Bewitterungen. Das lässt darauf schließen, dass sich unterschiedliche Chromophore gebildet haben.

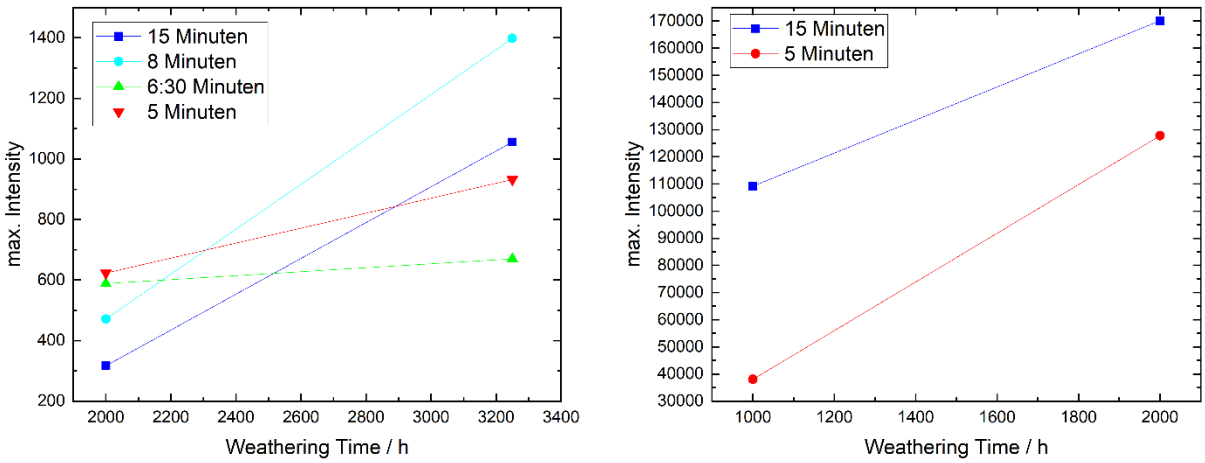

Abbildung 17: Fluoreszenz-Signal der TCSPC-Messungen von gealterter mini PV-Modulen. Unterschiedliche Laminationszeiten sind farblich gekennzeichnet. Links: Damp-Heat Bewitterung, rechts: Damp-Heat + UV Bewitterung.

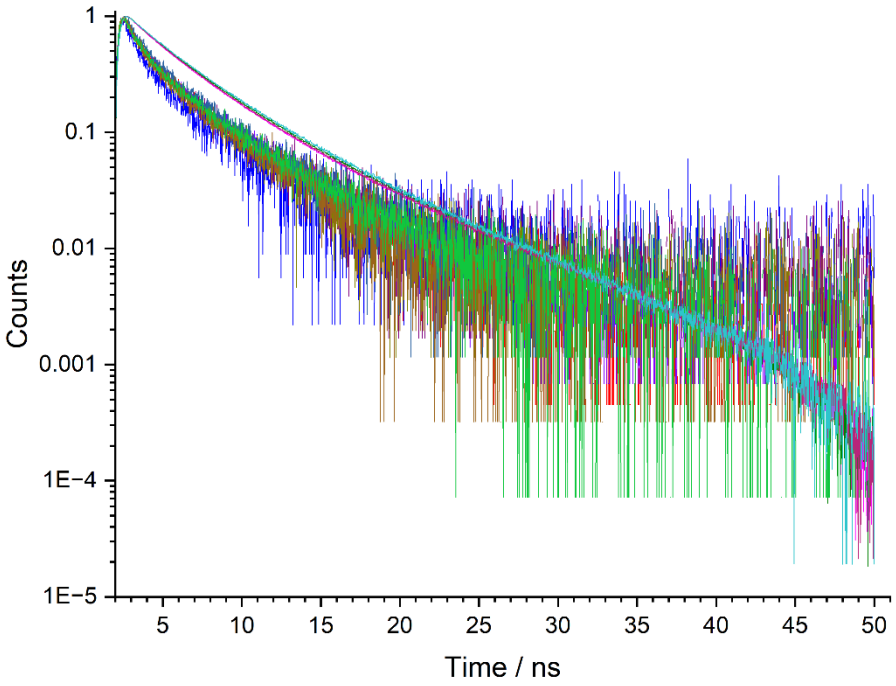

Abbildung 18: Lebensdauer der Fluoreszenz-Signale von dem mini PV-Modulen nach der Bewitterung.

AP 1.2.b. Korrelation optischer Fingerprint mit Mikrostruktur

Die am CSP gemessenen Daten werden mit den optischen Fingerabdrücken derselben Proben (an der HSA vermessen in AP1) korreliert. Es werden sowohl eine physikalisch orientierte als auch eine KI-getriebene Korrelation getestet und der Ansatz mit höheren Erfolgschancen in dem Projekt weiterentwickelt.

Mittels Raman-Spektroskopie konnten unterschiedliche Gelgehalte in EVA-Verkapselungsfolien unterschieden werden. Mit einem ähnlichen Ansatz wie bei Peike et. al. Wurden im Bereich von 2800-3000 cm^{-1} mehrere Molekülschwingungen gefittet. Dadurch können Gelgehalte unterschieden werden, jedoch ist die Unsicherheit aufgrund der hohen Anzahl an Peaks deutlich größer als die Veränderung, als auch die Streuung zwischen den

Proben (Abbildung 19). Ein einfacherer und robusterer Ansatz kann ein Verhältnis des normierten 2882-Peaks zum 2935-Peak sein.

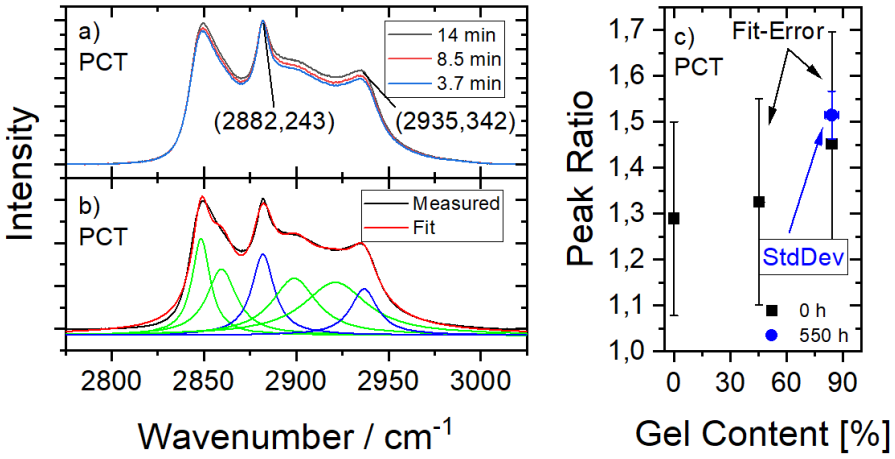

Abbildung 19: a) Normalisierte Raman-Spektren von EVA mit unterschiedlichen Laminierungszeiten. b) Peak-Entfaltung der CH_3-Schwingung bei 2882 cm^{-1} und der CH_2-Schwingung bei 2935 cm^{-1} in Blau. c) Peak-Verhältnis von 2882 cm^{-1}/2935 cm^{-1} in Abhängigkeit vom Gelgehalt.

Ein anderer Ansatz ist mittels NIR-Spektroskopie möglich, der vom Projektpartner LayTec in Zusammenarbeit mit dem PCCL genutzt wurde. Dabei nutzen sie die *principle component analysis* in bestimmten Bereichen des NIR-Spektrums, um unterschiede herauszuarbeiten. Dieses Verfahren benötigt jedoch, ähnlich wie das X Link-Verfahren, eine vorherige Kalibrierung. Im Gegensatz zum X Link Verfahren ist es jedoch deutlich schneller und benötigt keine Erwärmung der Verkapselungsfolie.

AP 1.3.d. Bestimmung des optischen Fingerprints gängiger Folien

Folien aus Feldrückläufern und anderen Quellen werden untersucht, die optischen Fingerabdrücke gemessen und für die Datenbank aufbereitet.

In Abbildung 20 sind fünf normierte Spektren verschiedener Rückseitenfolien gezeigt, die mit dem beschafften NIR-Spektrometer gemessen wurde. Die Erkennung der Rückseitenfolien (und Verkapselungsfolien aus Abbildung 21) ist in Tabelle 5 zusammengefasst.

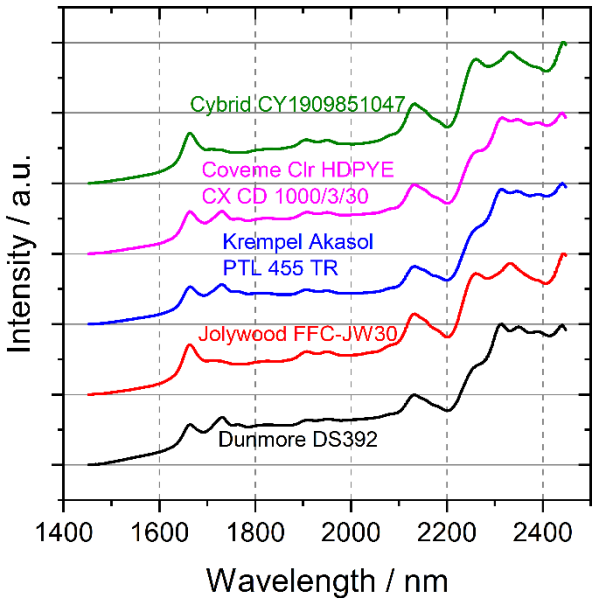

Abbildung 20: Normierte NIR-Spektren (0,1) von fünf verschiedenen kommerziellen Rückseitenfolien, gemessen mit dem trinamiX-Spektrometer.

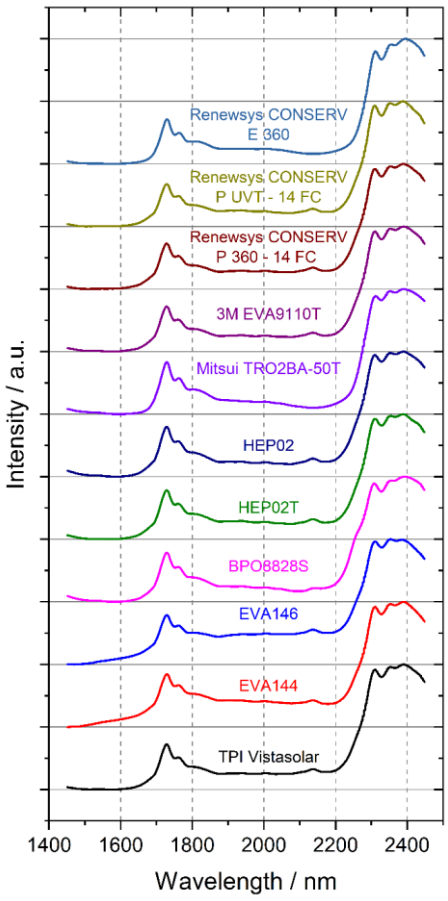

Abbildung 21: Normierte NIR-Spektren (0,1) von elf verschiedenen, teilweise kommerziellen, Verkapselungsfolien, gemessen mit dem trinamiX-Spektrometer.

Tabelle 5: Vergleich und Zusammenfassung der Erkennung von Rückseitenfolien und Verkapselungsmaterialien für PV-Module.

Probenname	Material aus Datenblatt	Erkanntes Material
Dunmore DS392	PET-basiert	PET, PE, EVA
Jolywood FFC-JW30	FFC//PET//FFC	PVDF, PET
Krempel Akasol PTL 455 TR	Tedlar+Polyester+Primer	PVDF, PET
Coveme Clr HDPYE CX CD 1000/3/30	PET/PET/UV-Primer	PET, PE
Cybrid CY1909851047	Unbekannt	PVDF, PET
TPI Vistasolar EVA Film 521.78-09901046SR	EVA	EVA
EVA144	EVA	EVA
EVA146	EVA	EVA
Borealis BPO8828S	Polyolefin (Crosslinking free)	PE
EVA Hanhwa-Q-cells, HEP-02T	EVA	EVA
EVA Hanhwa-Qcells, HEP-02	EVA	EVA
Mitsui TRO2BA-50T	POE	PE (EBA)
3M EVA9110T	EVA	EVA
Renewsys CONSERV P 360 - 14 FC	EVA	EVA
Renewsys CONSERV P UVT - 14 FC	EVA	EVA
Renewsys CONSERV E 360	POE	PE

Bei den Rückseitenfolien wurde das Kernmaterial immer richtig erkannt und es konnte, wenn vorhanden, auch eine fluorierte Beschichtung erkannt werden. Die Verkapselungsfolien wurden bei EVA alle richtig erkannt. In den Datenblättern sind die anderen Materialen nicht näher als „Polyolefine“ definiert. Daher lässt sich über die Erkennung nur die Aussage treffen, dass korrekt erkannt wurde, dass es kein EVA ist.

1.3. AP 2. Untersuchungen zur Vernetzungsgradbestimmung

AP 2.4.c. Abschätzung des GEL-Content für variable BOMS

Es werden Simulationen mit dem vom CSP entwickelten FEM-Modell durchgeführt, welche LXM mit dem Vernetzungsgrad mit minimaler Kenntnis der mikrostrukturellen Eigenschaften korrelieren sollen. Hieraus lässt sich die Qualität der Lamination und Messbereiche mit akzeptablen Parametern ableiten.

Zur Abschätzung des Gelgehalts für unterschiedliche BOMs wurde ein simulationsgestütztes Virtual-X-Link-Modell entwickelt, das die instrumentelle X-Link-Antwort in Abhängigkeit vom Vernetzungszustand des EVA-Verkapselungsmaterials beschreibt. Die HSA nutzte dieses FEM-Modell zur Entwicklung eines simulationsgestützten Virtual-X-Link-Modells sowie zur Analyse und Interpretation der LXM-Antwort für unterschiedliche BOM-Konfigurationen. Der X-Link bestimmt den Gelgehalt nicht direkt, sondern erfasst die dynamische

thermomechanische Antwort des Laminats während einer lokalen Indentation. Der ausgegebene LayTec Cross-Linking Metric (LXM) basiert auf der zeitabhängigen Eindring-, Kraft- und Temperaturantwort des Moduls. Damit ist LXM ein mechanischer Messwert, der mit dem Vernetzungsgrad korreliert werden kann, sofern die Korrelation material- und BOM-spezifisch abgesichert ist.

Die X-Link-Antwort wird jedoch nicht nur durch den Vernetzungsgrad des EVA bestimmt, sondern auch durch Rückseitenfolie, Schichtdicke, Temperaturführung, Eindringtiefe und den mechanischen Schichtaufbau des jeweiligen BOMs beeinflusst. Deshalb wird die Simulation als EVA-bezogener Proxy zur Einordnung von LXM-Trends verwendet; die Interpretation der LXM-Werte muss für unterschiedliche BOMs BOM-spezifisch erfolgen.

Zur Plausibilisierung der Kopplung zwischen Vernetzungszustand und mechanischer X-Link-Antwort wurde eine virtuelle Relaxationsmetrik M definiert. Dabei beschreibt F0 die Anfangskraft und F5 die Kraft nach 5 Sekunden. Mit zunehmender Vernetzung nimmt der viskose Anteil der Antwort ab, die Relaxation wird geringer und das Verhältnis F5/F0 steigt. Entsprechend sinkt die Metrik M monoton vom untervernetzten zum hochvernetzten Zustand. Dieses Verhalten ist konsistent mit der physikalischen Erwartung, dass ein stärker vernetztes EVA elastischer reagiert und weniger Kraftrelaxation zeigt.

Da die X-Link-Software einen Gelgehalt nur bei geladener LXM-g.c.-Korrelation ausgeben kann und diese Korrelation für jede Kombination aus EVA, Rückseitenfolie und Gelgehaltsprüfung separat erstellt werden muss, werden die hier gezeigten Ergebnisse als relative Abschätzung bzw. Plausibilisierung der LXM-Vernetzungsgrad-Korrelation interpretiert. Eine absolute Gelgehaltsangabe sollte daraus nur abgeleitet werden, wenn eine BOM-spezifische LXM-g.c.-Korrelation vorliegt. Die Ergebnisse sind daher als simulationsbasierte Interpretation der Virtual-X-Link-Antwort zu verstehen. Die verwendeten Zusammenhänge sind in Gleichung 1 und Gleichung 2 dargestellt.

$$M = (F_0 - F_5)/F_0 = 1 - F_5/F_0 \qquad 1$$

$$F(t)/F_0 = (1 - CR) + CR.\,exp(-5/\tau) \qquad 2$$

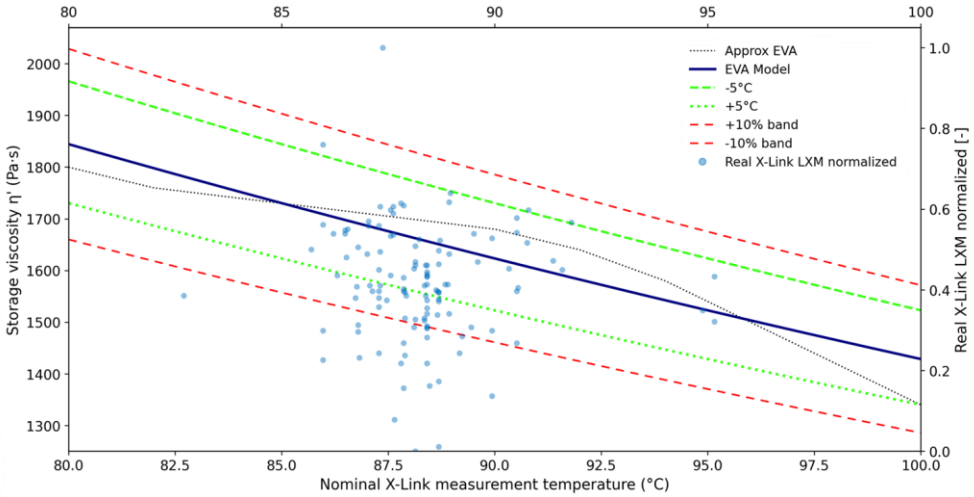

Abbildung 22: Vergleich des simulierten Virtual-X-Link-Modells mit experimentellen X-Link-Daten im relevanten Temperaturbereich.

Abbildung 22 zeigt einen guten qualitativen Zusammenhang zwischen dem simulierten Virtual-X-Link-Modell und den experimentellen X-Link-Daten im relevanten Temperaturbereich. Damit eignet sich das Modell zur simulationsbasierten Interpretation von LXM-Trends. Für die Bewertung im X-Link-relevanten Temperaturbereich wurde die simulierte Antwort im Bereich von 80 °C bis 100 °C betrachtet. Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass Temperaturabweichungen von ±5 °C zu Änderungen der simulierten Antwort von weniger als 10 % führen. Damit erfüllt das Modell das definierte Robustheitskriterium für die Auswertung von LXM-Trends.

Tabelle 6: Sensitivitätsanalyse der simulierten Virtual-X-Link-Antwort gegenüber Temperaturabweichungen im X-Link-relevanten Messbereich.

Temperature (°C)	R′ (Pa·s)			ΔR (T − 5) (%)	ΔR (T + 5) (%)	Robustness
	T − 5 °C	Nominal T	T + 5 °C			
80	1966.2	1844.5	1730.4	6.59	-6.19	<10%
85	1844.5	1730.4	1623.3	6.59	-6.19	<10%
90	1730.4	1623.3	1522.9	6.59	-6.19	<10%
95	1623.3	1522.9	1428.7	6.59	-6.19	<10%
100	1522.9	1428.7	1340.3	6.59	-6.19	<10%

Die in Tabelle 6 zusammengefassten Ergebnisse bestätigen die Robustheit der simulierten Virtual-X-Link-Antwort gegenüber moderaten Temperaturabweichungen im relevanten Messbereich.

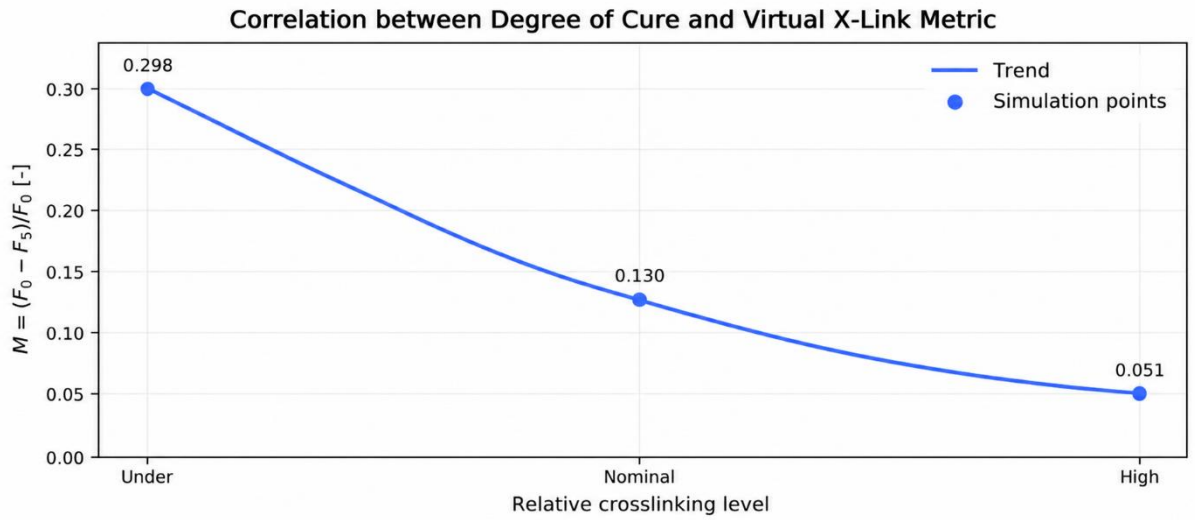

Abbildung 23 Zusammenhang zwischen dem Aushärtegrad (DoC) und der virtuellen X-Link-Metrik M als Grundlage zur LXM-basierten Bewertung des Vernetzungszustands

Abbildung 23 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Aushärtegrad (DoC) und der virtuellen X-Link-Metrik M. Mit zunehmendem Vernetzungsgrad sinkt die Relaxationsmetrik monoton, was auf eine reduzierte viskose Relaxation und eine höhere Vernetzungsdichte hinweist. Die Ergebnisse stützen die Verwendung der Virtual-X-Link-Antwort zur Bewertung des Vernetzungszustands von EVA-Verkapselungsmaterialien.

AP 2.5.b Messung der Variabilität von Produktionsbatches

Die HSA unterstützt dieses Unterfangen mit der Abbestellung eines Mitarbeiters zur Unterstützung der Messungen und der statistischen Auswertung der Daten. Die Daten werden die Grundlage einer statistischen Risikobewertung eines Batches gemäß ISO2859 sein.

Die Messkampagne bei IBC wurde vom 26.02.2024-07.03.2024 durchgeführt. Hierbei wurden drei verschiedene Batches gemessen und analysiert. Die Ergebnisse sind im Bericht von LayTec enthalten. Zusammen mit den Ergebnissen in Zusammenarbeit mit (Kiwa) PI Berlin, wurden für Meilenstein M5.1 Messpläne für X-Link im Systembau entworfen.

1.4. AP 4. Industrie 4.0 Ansatz für Laminationsoptimierung

AP 4.1.b.Potenzial der optischen Wareneingangskontrolle

Die HSA untersucht optische Methoden zur Materialqualifikation in AP1. Hier werden die Methoden soweit möglich in der Produktion demonstriert. Die Erwartung hier ist eher, einen kontinuierlichen Abgleich zu einem Erwartungswert zu messen, anstelle absoluter Werte. Es werden z.B. Raman-Messungen an den EVA-Folien-Wareneingängen durchgeführt, um Rückschlüsse auf Additivierung bzw. Homogenität der Folien zu erlauben. Diese werden anhand der Projektdatenbank mit bekannten Folien verglichen und eine potenzielle Abweichung wird bestimmt. Sollte die Abweichung zu groß werden, wird dies indiziert. Die Abweichung von einem Mittelwert über Folienrollen wird genutzt, um eine Optimierung der nachgelagerten Prozesse zu erreichen. Ziel ist es zu identifizieren wenn ein Folienabschnitt einen erhöhten Anteil an Vernetzungsbeschleuniger auch die Lamination zu beschleunigen, die dann eine verkürzte Prozessierung erlaubt. Die Sensitivität von Raman wird wahrscheinlich nicht ausreichen, um quantitative Aussagen treffen zu können, aber die relativen Veränderungen sind durchaus möglich.

Das Fraunhofer CSP untersuchte Verkapselungsfolien mittels DSC (*Differential Scanning Calorimetry*), um die Verteilung der Reaktionswärme zu bestimmen. Dabei wurden große Unterschiede Heterogenität festgestellt. Es ist davon auszugehen, dass Proben mit einer höheren Reaktionswärme einen höheren Vernetzungsgrad aufweisen. Nach der Lamination wurde jedoch kein Zusammenhang zwischen einer hohen Reaktionswärme und einem hohen Vernetzungsgrad beobachtet. Als Gründe wurden variablen Verhältnissen von Vernetzungsbeschleuniger und Peroxiden, sowie die Diffusion der Additive angegeben. Für die Raman-Spektroskopie bedeuten diese Erkenntnisse, dass es nicht ausreicht eine Folie punktuell zu messen. Die Messpunkte müssen eine ähnliche Fläche haben, wie der Diffusionsbereich der Additive während der Lamination. Dies erfordert einen anderen experimentellen Aufbau, der an der HSA noch nicht verfügbar ist.

AP 4.2.b Vorhersage des Vernetzungsgrades basierend auf Folienhomogenität und Prozessbedingungen

Basierend auf dem in AP3 erarbeiteten Verständnis der Materialabhängigkeiten in der Lamination werden hier die Prozessabhängigkeiten untersucht. Die optische Wareneingangskontrolle wird empirisch, potenziell unter Nutzung einer KI, mit den Prozessparametern verknüpft und genutzt, um den Vernetzungsgrad und dessen Homogenität innerhalb eines Moduls vorherzusagen. Diese Vorhersage wird mit dem X Link-Verfahren verifiziert. Für eine limitierte Anzahl von Prüfkörpern, ca. 10 mit auffälligen Variationen, werden die EVA Proben zerstörend extrahiert und mit Hilfe von Soxhlet am CSP gemessen. Dies trägt zum Verständnis des Prozessverhaltens und auch der Unsicherheitsbetrachtung der X Link-Methode bei.

In Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer CSP wurde ein Modell entwickelt, mithilfe dessen eine Vorhersage des Gelgehaltes bei bekannten Massenanteilen an Vernetzungsadditiven möglich ist. Dazu wurden EVA-Folien mit bestimmten Anteilen an Additiven hergestellt, laminiert und der Gelgehalt gemessen. Der Gelgehalt hängt dabei von den Massenanteilen der Vernetzungsadditive ab (Gleichungen 3 und 4, sowie **Error! Reference source not found.**).

$$GC_q(L,T)=a+bL+cT+dL^2+eT^2+fLT \quad (3)$$

$$GC_c(L,T)=a+bL+cT+dL^2+eT^2+fLT+gL^3+hT^3+iL^2T+jLT^2 \quad (4)$$

Mit den Parametern:

Tabelle 7: Parameter der Gleichungen 3 und 4.

Koeffizient	Quadratische Ebene	Kubische Ebene
a	-48.19	-46.39
b	212.23	177.97
c	101.6	301.34
d	-81.02	-17.27
e	-42.77	-400.54
f	-58.63	-335.8
g	–	-29.03
h	–	166.92
i	–	73.77
j	–	266.62

Dabei ist *L* der Massenanteil des Peroxids (Luperox TBEC, CAS: 34443-12-4) und *T* der Massenanteil des Vernetzungsbeschleunigers (TAIC, CAS: 1025-15-6). Weitere Informationen können der Veröffentlichung (doi.org/10.1002/pip.3849) entnommen werden.

1.5. AP 5. Qualitätssicherung im Systembau

AP5.1.c. Statistischen Modellentwicklung und FMEA

In den vorangegangenen AP wurde der Prozess und das Risiko von Prozessabweichungen untersucht und eine Indikation der Varianz des LXM-Wertes untersucht. Hier wird nun das Risiko auf den Energieertrag und die Zuverlässigkeit des PV-Systems untersucht und eine Bewertung der Qualitätssicherung für Folienauffälligkeiten ermöglicht. Das entwickelte statistische Model wird die Batch-Acceptance-Tests informieren.

Für die statistische Modellentwicklung wurde die LXM-Karte jedes Moduls als räumliche Stichprobe der lokalen Vernetzungsantwort betrachtet. Da der absolute LXM-Wert stark von der jeweiligen BOM abhängt, wurde für jede BOM zunächst ein eigener Median-LXM als Baseline bestimmt. Auffällige Stellen werden anschließend relativ zu dieser BOM-spezifischen Referenz bewertet.

Abbildung 24 zeigt die BOM-spezifischen Median-LXM-Werte der untersuchten Module. Dabei wird deutlich, dass sich die absoluten LXM-Niveaus zwischen den BOMs systematisch unterscheiden. Eine Bewertung lokaler Auffälligkeiten muss daher relativ zu einer BOM-spezifischen Referenz erfolgen.

Als erstes Kriterium zur Identifikation einer auffälligen räumlichen Inhomogenität wird die Standardabweichung der LXM-Verteilung verwendet. In Anlehnung an die LayTec-Auswertung wird ein Modul als verdächtig markiert, wenn Std(LXM) > 0,07 ist. Dieses Kriterium identifiziert Module, bei denen die Vernetzungsantwort innerhalb des Moduls deutlich streut. Die Ergebnisse in Abbildung 25 zeigen, dass insbesondere einzelne Module der BOM2- und BOM3-Gruppen den definierten Streuungsgrenzwert überschreiten und daher als potenziell inhomogen eingestuft werden.

Als zweites Kriterium wird geprüft, ob die räumliche Inhomogenität durch lokale LXM-Minima verursacht wird. Solche Minima sind besonders relevant, weil sie auf lokal untervernetzte Bereiche hindeuten können. Abbildung 26 verdeutlicht, dass einzelne Module deutliche lokale Abweichungen vom BOM-spezifischen Median aufweisen. Solche lokalen Minima können auf untervernetzte Bereiche oder lokale Prozessabweichungen hinweisen.

Die IBC-Auswertung zeigt für BOM1 (EVA/EVA) eine niedrige Streuung und damit eine weitgehend homogene LXM-Verteilung. BOM2 (POE/EVA) zeigt dagegen eine deutlich erhöhte Streuung und einen ausgeprägten lokalen Ausreißer. BOM3 (POE/EVA Gen2) weist ebenfalls erhöhte Streuung auf, muss aufgrund des deutlich niedrigeren BOM-spezifischen LXM-Niveaus jedoch relativ zur eigenen Baseline bewertet werden. Die Ergebnisse stützen damit eine zweistufige FMEA-Logik: globale Streuung als notwendige Bedingung und lokale LXM-Minima als priorisierendes Risikomerkmal.

Für die Qualitätssicherung im Systembau werden Module mit Std(LXM) > 0,07 und ausgeprägten lokalen Minima als prioritäre Prüffälle eingestuft. Bei betroffenen Modulen sollten die größten Abweichungen zwischen Median-LXM und lokalem Minimum markiert werden. An diesen Stellen können anschließend benachbarte Proben entnommen und mit einer absoluten Referenzmethode, z. B. Soxhlet/Gelgehalt, validiert werden. Die statistische

Auswertung der LXM-Karten liefert damit eine Grundlage für Batch-Acceptance-Tests und für die FMEA-Bewertung von Folien- bzw. Laminationsauffälligkeiten.

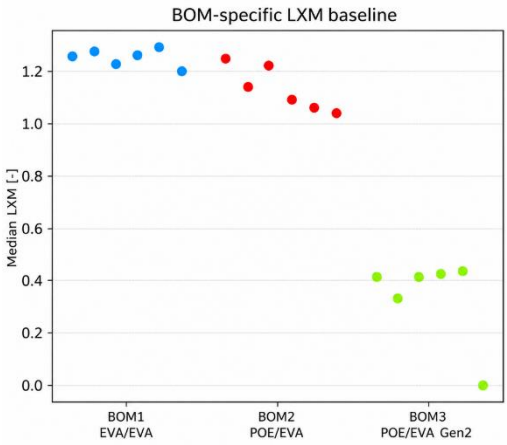

Abbildung 24:BOM-spezifische LXM-Baseline zur Bewertung lokaler Abweichungen.

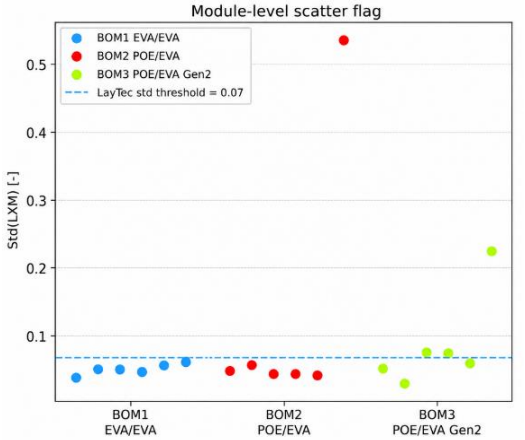

Abbildung 25:Modulbasierte Bewertung der LXM-Streuung anhand des Kriteriums Std(LXM) > 0,07.

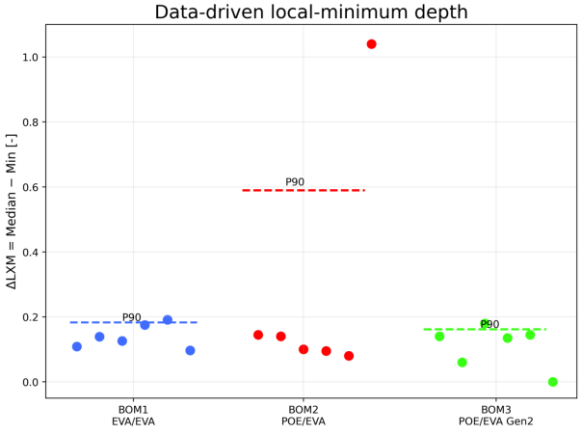

Abbildung 26: Identifikation lokaler Auffälligkeiten anhand der Abweichung ΔLXM vom BOM-spezifischen Medianwert.

1.6. Meilensteine

NR.	Beschreibung	Projektmonat
AP1 Material- und BOM-Identifikation		
M1.6	Optische Materialerkennung der verwendeten Polymerfolien gemacht (HSA) Mittels NIR-Spektroskopie konnten Verkapselungsfolien und Rückseitenfolien aus unterschiedlichen Materialen erkannt und zugeordnet werden. Damit ist M1.6 erfüllt.	24
AP5 Qualitätssicherung im Systembau		
M5.2	Risikoquantifizierung von QC-Konzepten (PIB, ABO, HSA) Die im Projekt erhobenen Batch-QC- und LXM-Daten wurden statistisch ausgewertet und für eine Risikoanalyse von Qualitätskontrollkonzepten verwendet. Auf Basis der FMEA-Methodik konnten die Auswirkungen potenzieller Folien- und Laminationsauffälligkeiten auf Zuverlässigkeit und Energieertrag bewertet werden. Damit ist M5.2 erfüllt.	30
M5.3	Statistisches Modell für System QC (HSA) entwickelt Auf Grundlage der im Projekt gewonnenen Mess- und Qualitätsdaten wurde ein statistisches Modell zur Bewertung von Qualitätskontrollmaßnahmen im Systembau entwickelt. Das Modell ermöglicht die risikobasierte Bewertung von Produktionsbatches und unterstützt die Definition geeigneter Qualitätskontrollstrategien. Damit ist M5.3 erfüllt.	30

2. Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Dieser Nachweis wird durch die Fraunhofer Zentralverwaltung in München erbracht.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit

Das Projekt adressiert zentrale Herausforderungen der Photovoltaik-Industrie: die Gewährleistung der Langzeitstabilität von PV-Modulen und die Steigerung der Produktionseffizienz. Da die Modulverkapselung entscheidend für den Schutz vor Umwelteinflüssen ist, können Mängel in diesem Bereich zu erheblichen Leistungsverlusten und kostenintensiven Nachfolgeuntersuchungen führen. Studien zeigen, dass ein signifikanter Anteil der im Feld installierten Module Auffälligkeiten aufweist, die direkt oder indirekt auf eine suboptimale Lamination zurückzuführen sind. Die komplexen materialwissenschaftlichen

Zusammenhänge zwischen Folienqualität, Prozessführung und Modulzuverlässigkeit machen die direkte Unterstützung durch staatliche Fördermittel notwendig.

Das Projekt hat einen hohen Praxisbezug und adressiert den Mangel an industriell etablierten, zerstörungsfreien Prüftechnologien zur Kontrolle des Vernetzungsgrades. Aufgrund der vorhandenen wissenschaftlich-technischen Risiken, insbesondere bei der Entwicklung eines digitalen Zwillings für die Messtechnik und der Untersuchung neuer Materialkombinationen, muss die Finanzierung durch den öffentlichen Projektträger erfolgen. Die vorgestellten Arbeiten sind von hohem öffentlichem Interesse, da sie einen wesentlichen Beitrag zur Verbesserung der Lebensdauer und Qualitätssicherung von PV-Anlagen leisten. Die Ergebnisse und Erkenntnisse des Projektes werden branchenübergreifend die gesamte Wertschöpfungskette – vom Folien- und Modulhersteller bis zum Systembauer – positiv beeinflussen.

Die Förderung wird als angemessen erachtet, da die Aufgabenstellung die Herstellung zahlreicher Prüfkörper und eine intensive Methodenentwicklung erforderte, was mit der Beschaffung diverser Folien und einem umfangreichen Einsatz von Analyseinstrumenten verbunden war. Dies macht die Realisierung ohne öffentliche Mittel nicht möglich.

4. Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die im Projekt EVAplus erzielten Ergebnisse bilden eine wesentliche Grundlage für die Weiterentwicklung der Qualitätssicherung entlang der gesamten Wertschöpfungskette der Photovoltaik. Sie ermöglichen Herstellern und Systembauern, die Zuverlässigkeit und Lebensdauer von PV-Modulen signifikant zu verbessern und Produktionsprozesse effizienter zu gestalten.

Etablierung neuer Methoden und Kompetenzen:

Verbesserte Materialcharakterisierung: Durch die Entwicklung und Etablierung des **Quellversuchs** als effiziente, schnelle und materialsparende Alternative zur Soxhlet-Extraktion wurde eine neue Kompetenz zur Bestimmung des Vernetzungsgrades geschaffen. Die Methode liefert zusätzliche strukturmechanische Informationen und ist aufgrund des geringeren Probenbedarfs ideal für ortsaufgelöste Analysen.

Prädiktive Simulation: Der entwickelte **FEM-basierte digitale Zwilling** des X-Link®-Verfahrens ermöglicht es, den Einfluss verschiedener Materialkombinationen (BOMs) auf Messergebnisse vorherzusagen. Dies reduziert den Kalibrierungsaufwand für neue Materialien und verbessert das grundlegende Verständnis der Messtechnik.

Chemische Fingerabdrücke: Die am Fraunhofer CSP etablierte Py-GCMS-Methodik zur Quantifizierung von Additiven wie Vernetzern und Beschleunigern erlaubt eine präzise Vorhersage der Laminationsqualität aus der Folienzusammensetzung.

Industrielle Anwendung und Prozessoptimierung

Optimierte Alterungstests: Die Untersuchungen haben gezeigt, dass Standard-Stresstests mit hohen Temperaturen (>100 °C) den Einfluss des initialen Vernetzungsgrades durch Nachvernetzung maskieren. Es wurde nachgewiesen, dass insbesondere die **verlängerte Damp-Heat-Bewitterung** geeignet ist, um Schwachstellen durch unzureichende Lamination

aufzudecken. Diese Erkenntnisse sind entscheidend für die Entwicklung aussagekräftigerer, materialangepasster Bewitterungsprotokolle.

Qualitätssicherung im Feld: Die Praxistauglichkeit der X-Link®-Technologie für die **Wareneingangskontrolle im Feld** wurde bei IBC Solar erfolgreich demonstriert. Der Nachweis der robusten, geräteübergreifenden Reproduzierbarkeit in einem Round-Robin-Test schafft die Grundlage für standardisierte Serviceprotokolle und eine quantifizierbare Risikobewertung über den gesamten Lebenszyklus von PV-Anlagen.

Grundlage für Industrie 4.0: Die Ergebnisse ermöglichen eine ergebnisgesteuerte, kontinuierliche Prozessführung in der Lamination. Die X-Link®-Technologie hat sich als Schlüssel für eine Echtzeit-Qualitätskontrolle erwiesen, die direkte Anpassungen von Prozessparametern erlaubt.

Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit: Die gewonnenen Erkenntnisse und die umfassende **BOM-Datenbank** stärken die wissenschaftliche Führungsposition des Fraunhofer CSP im Bereich der Modulzuverlässigkeit. Die Daten und Modelle bieten eine exzellente Basis für **Folgeprojekte**, die sich beispielsweise mit neuen Verkapselungsmaterialien oder der Zuverlässigkeit neuer Zelltechnologien befassen. Die Projektergebnisse wurden bereits kontinuierlich auf nationalen und internationalen Konferenzen sowie in Fachzeitschriften veröffentlicht und der Fachöffentlichkeit zugänglich gemacht, was den Wissenstransfer in die Industrie sichert. Zudem wurden die Erkenntnisse genutzt, um die **Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses** im Rahmen von Abschlussarbeiten zu fördern.

5. FE-Ergebnisse von dritter Seite

Parallel zu den Arbeiten im Projekt EVAplus hat eine Forschungsgruppe an der renommierten Stanford Universität in den USA grundlegende Untersuchungen zu den Kinetiken von Vernetzungs- und Abbaureaktionen in PV-Verkapselungsmaterialien durchgeführt (10.1002/pip.3771; 10.1109/JPHOTOV.2024.3496512). In deren Untersuchungen geht es um das Delaminationsverhalten von PV-Modulen, welches auch von dem Laminationsprozess beeinflusst wird. Diese Ergebnisse aus unabhängiger Quelle unterstreichen die hohe Relevanz und Notwendigkeit der Forschung in diesem Bereich, um eine höhere Zuverlässigkeit und Lebensdauer in der PV-Technik zu erreichen.

6. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Die erfolgten und geplanten Veröffentlichungen sind in Tabelle 1 dargestellt.

III. Anlage

1. Erfolgskontrollbericht

1.1. Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen

Entwicklung einer Industrie 4.0-Umgebung für zuverlässige Lamination

Die HSA leistete einen wesentlichen Beitrag zur Digitalisierung des Laminationsprozesses durch die Evaluation optischer Wareneingangskontrollen (AP 4.1b). Es wurden in AP 4.2b Ansätze für eine KI-basierte Vorhersage des Vernetzungsgrades genutzt, die Material- und Prozessparameter verknüpfen, um eine ergebnisgesteuerte Prozessführung zu unterstützen.

Analyse des Vernetzungsgrades und Prognose der Modullebensdauer

In Zusammenarbeit mit dem CSP verfeinerte die HSA die FEM-Simulation des Mikroindenterverfahrens (AP 2.4c), um den Zusammenhang zwischen LXM-Messwerten und dem tatsächlichen Vernetzungsgrad (Gelgehalt) präziser abzubilden. Durch die Entwicklung eines Carbonyl-Index mittels NIR-Spektroskopie gelang es zudem, Degradationsprozesse in Rückseitenfolien quantitativ zu erfassen und somit die Grundlage für verlässlichere Lebensdauerprognosen zu schaffen

Big Data-Analyse von Produktions- und Felddaten

Die HSA baute eine umfassende BOM-Datenbank mit optischen Fingerabdrücken (NIR, Raman, Lumineszenz) gängiger kommerzieller Folien auf. In AP 1.1f wurden diese Signaturen systematisch für gealterte Proben erweitert, was eine automatisierte Materialerkennung und Zustandsbewertung im Feld ermöglicht. Diese Daten flossen in das statistische Modell (AP 5.1c) ein, welche Varianzen in den Materialeigenschaften bewertet.

Vernetzung von Betriebsdaten mit laminationsrelevanten Fehlermodi zur Identifikation eines Prozessfensters für beschleunigte Produktion

Durch die in AP 1.2b entwickelte Methode zur Bestimmung des Gelgehaltes mittels Raman-Peak-Verhältnissen wurde ein Werkzeug geschaffen, um den Einfluss der Lamination auf die Mikrostruktur zerstörungsfrei zu messen. Die HSA untersuchte zudem mittels UV-Fluoreszenz (UVF), wie unterschiedliche Materialkombinationen auf Alterungsstress reagieren, wodurch kritische Grenzwerte für die Prozessführung definiert werden konnten.

Überwachung der Produktionsqualität im Wareneingang beim Systembau

Ein zentrales Ergebnis der HSA ist die Entwicklung eines statistischen Bewertungsansatzes und einer FMEA für Systembauer im Rahmen von AP 5.1.c. Die HSA unterstützte zudem personell und methodisch die Messkampagne zur Variabilität von Produktionsbatches (AP 2.5b) bei Partnern wie IBC Solar. Die Ergebnisse ermöglichen die Implementierung optimierter Batch-Acceptance-Tests nach ISO 2859, was die Qualitätssicherung bei der Installation von PV-Anlagen signifikant verbessert.

Verbesserung der Lebensdauer und Qualitätssicherung auf Komponenten- und Systemebene

Durch die Kombination von NIR-, Raman- und Lumineszenz-Spektroskopie etablierte die HSA neue, zerstörungsfreie Prüftechniken. Insbesondere die Nutzung von Fluorescence Lifetime Imaging (FLIM, AP 1.1e) bietet neue Möglichkeiten zur Identifikation schwer erfassbarer Fehlermechanismen in der Verkapselung. Diese Methoden tragen unmittelbar zur Erhöhung der Versorgungssicherheit und Anlagenperformance bei.

Erschließung neuer Märkte und Senkung des Investitionsrisikos

Die Validierung mobiler spektroskopischer Messgeräte und deren Integration in Qualitätssicherungs-Protokolle senkt das Investitionsrisiko für Anlagenbetreiber. Die HSA demonstrierte die Praxistauglichkeit der entwickelten Verfahren in realen Wareneingangsszenarien, was den Weg für neue Servicedienstleistungen im Bereich der Modulqualifikation ebnet.

1.2. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Verständnis der Materialveränderungen in realistischen Betriebsbedingungen

Im Rahmen von **AP 1.1f** und begleitender Untersuchungen mittels **UV-Fluoreszenz (UVF)** wurden systematisch optische Fingerabdrücke von gealterten PV-Modulen (Damp-Heat und DH-UV) erfasst. Es wurde nachgewiesen, dass sich die spektralen Emissionscharakteristika während der Alterung signifikant verändern, was die Grundlage für eine präzise Materialerkennung im Feld bildet. Durch die Analyse der Fluoreszenzmuster und Farbveränderungen in RGB-Bildern konnten spezifische Abbauprozesse der Chromophore bei EVA- und POE-Einkapselungen differenziert werden. Zudem zeigten Messungen mittels **TCSPC** deutliche Unterschiede in der Lebensdauer des Fluoreszenzsignals zwischen rein thermischer Alterung und kombinierter UV-Belastung, was auf die Bildung unterschiedlicher Degradationsprodukte hindeutet.

Abschätzung der mikromechanischen Materialeigenschaften aus optischen Messungen

Die HSA entwickelte zerstörungsfreie Korrelationen zwischen spektroskopischen Daten und mikrostrukturellen Parametern (AP 1.2b). Mittels **Raman-Spektroskopie** gelang es, unterschiedliche Gelgehalte in EVA-Folien über das Peak-Verhältnis der Molekülschwingungen bei 2882 cm^{-1} und 2935 cm^{-1} zu bestimmen. Parallel dazu wurde die NIR-Spektroskopie zur Identifikation chemischer Indizes (wie dem Carbonyl-Index in PET-Backsheets) eingesetzt, um den Degradationszustand quantitativ abzuschätzen. Diese optischen Methoden ermöglichen es, mikromechanische Veränderungen, die normalerweise nur durch zerstörende Verfahren wie die Soxhlet-Extraktion messbar sind, mobil und zerstörungsfrei zu indizieren.

Modellierung der umweltstressbedingten Alterung von Laminaten

Die HSA unterstützte die Entwicklung eines FEM-basierten Virtual-X-Link-Modells zur simulationsgestützten Interpretation der instrumentellen X-Link-Antwort für unterschiedliche Materialkombinationen (BOMs) (AP 2.4.c). Durch die Modellierung des

Mikroindenterverfahrens (X-Link) konnte der Einfluss variabler Materialkombinationen (BOMs) auf die LXM-Messwerte quantifiziert werden. Diese Simulationen ermöglichen eine prädiktive Bewertung, wie sich umweltbedingter Materialabbau auf die mechanischen Eigenschaften des Verbunds auswirkt.

Verständnis des Materialverhaltens variabler BOMs

Es wurde eine umfassende Datenbank für **optische Fingerabdrücke** (NIR, Raman, Lumineszenz) gängiger kommerzieller Folien aufgebaut (AP 1.3d). Mittels eines mobilen NIR-Spektrometers konnten Rückseitenfolien anhand ihres Kernmaterials (z. B. PET) und ihrer Beschichtungen (z. B. PVDF) identifiziert werden. Bei Einkapselungsmaterialien gelang die fehlerfreie Differenzierung zwischen EVA und modernen Polyolefin-Elastomeren (POE). Diese Daten sind essenziell, um die Variabilität von Produktionsbatches zu erfassen und die Kalibrierung der zerstörungsfreien Messtechnik für unbekannte Materialkombinationen sicherzustellen.

Modellierung der Risikobewertung von Material- und Prozessparametervariationen

In Zusammenarbeit mit dem CSP entwickelte die HSA mathematische Modelle zur **Vorhersage des Vernetzungsgrades** basierend auf der Additivierung und den Prozessbedingungen (AP 4.2b). Unter Nutzung quadratischer und kubischer Regressionsebenen wurde der Einfluss der Massenanteile von Peroxid und Vernetzungsbeschleuniger auf den resultierenden Gelgehalt quantifiziert. Für Systembauer wurde ein statistischer Bewertungsansatz und eine FMEA entwickelt (AP 5.1.c), um LXM-Variationen in Produktionsbatches zu bewerten und auffällige Module priorisiert zu identifizieren. Auf Basis BOM-spezifischer LXM-Baselines wurden erhöhte LXM-Streuungen und lokale LXM-Minima als potenzielle Auffälligkeiten bewertet. Die Ergebnisse unterstützen die Definition gezielter Prüffälle. Darüber hinaus bildeten die im Rahmen der Messkampagne zur Variabilität von Produktionsbatches (AP 2.5b) gewonnenen Daten eine Grundlage für statistische Risikobewertungen und **Batch-Acceptance**-Konzepte nach ISO 2859.

1.3. Fortschreibung des Verwertungsplans

Sicherung und Schaffung von Arbeitsplätzen

Durch das Projekt konnten die beteiligten wissenschaftlichen Mitarbeiter über die gesamte Laufzeit finanziert werden. Das Vorhaben diente als entscheidender Grundstein für den **Aufbau der Aktivitäten im Bereich der Photovoltaik-Metrologie an der HSA**.

Stärkung der wissenschaftlichen Führungsposition

Die HSA hat durch die Entwicklung innovativer **optischer Fingerabdrücke** und statistischer Risikomodelle ihre Position als wissenschaftliche Einrichtung in der Polymer-Spektroskopie und Zuverlässigkeitsforschung gefestigt. Die erarbeiteten Modelle und Simulationen stellen eine essentielle Grundlage für die weltweite Zuverlässigkeitsforschung dar.

Wirtschaftliche Erfolgsaussichten und Nutzen für Anwender

Trotz der herausfordernden makroökonomischen Situation in der europäischen Modulfertigung leisten die Ergebnisse einen indirekten Beitrag zur **Wettbewerbsfähigkeit regionaler KMUs**, insbesondere im Bereich der Verbundglas- und PV-Folienherstellung. Die entwickelten zerstörungsfreien Prüfmethoden unterstützen Solarmodulmanufakturen (wie z. B. Sunset Solar, AE Solar oder Solarwatt) unmittelbar bei der **Optimierung ihrer Qualitätskontrolle** und der Reduktion von Ausschuss.

Wissenstransfer und Dissemination

Ein zentraler Aspekt der Verwertung ist der Transfer der Ergebnisse in nationale und internationale **Standardisierungsgremien**. Die wissenschaftliche Fachöffentlichkeit wurde kontinuierlich durch Publikationen in hochrangigen Zeitschriften (z. B. *Progress in Photovoltaics*) sowie durch Beiträge auf führenden Konferenzen (EU-PVSEC, IEEE PVSC, PV-Symposium) informiert.

Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses

Das Projekt leistete einen wesentlichen Beitrag zur Ausbildung hochqualifizierter Fachkräfte für die Solarindustrie. Zudem flossen die Erkenntnisse unmittelbar in die Lehre im **Photovoltaik-Masterstudiengang** der HSA ein.

Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Auf Basis der Projektergebnisse werden bereits aktiv Folgeprojekte zu den Themen Modulperformance, Materialkompatibilität in Polymerschichten und erweiterte Qualitätssicherung eingeworben.

1.4. Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Entkopplung des Raman-Spektrums von starker Fluoreszenz, sowie die Quantifizierung der Additive mittels Raman-Spektroskopie.

1.5. Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer

Um die Dissemination der Projekteinzelheiten voranzutreiben, wurden die Projektinformationen auf der Fraunhofer-Webseite und in der Mitteldeutschen Zeitung veröffentlicht.

Das Projektkonsortium hat sich fast monatlich digital getroffen, um die aktuellen Ergebnisse zu diskutieren und die nächsten Schritte zu besprechen. Es fanden vier Treffen in Persona bei LayTec, PI Berlin, CSP und Sunset statt, sowie weitere Treffen auf Messen und Konferenzen. Die Ergebnisse wurden bisher in mehreren Konferenzbeiträgen und Journal Artikeln veröffentlicht (Tabelle 1).

Tabelle 1: Publikationen im Rahmen des Projektes EVAplus mit Beteiligung der Hochschule Anhalt (HSA).

Nr.	Publikationsort	Art	Titel	Projektpartner
1	38. PV-Symposium (2023)	Poster	Untersuchung des Einflusses der Materialkombination auf die UV-Fluoreszenz von Folien für photovoltaischer Module	HSA, CSP
2	23. Nachwuchswissenschaftler*innenkonferenz (2023)	Poster	Non-destructive monitoring of mechanical and chemical changes in PV-mini-modules produced using variable lamination times	HSA, CSP
3	23. Nachwuchswissenschaftler*innenkonferenz (2023)	Poster	Analyse der Fähigkeit der UV-Fluoreszenz zur Bewertung der Alterung der Verkapselung zur Verbesserung der Zuverlässigkeit und Qualität von Photovoltaikmodulen	HSA, CSP
4	40. EUPVSEC (2023)	Vortrag	Non-destructive monitoring of mechanical and chemical changes in PV mini modules produced using variable lamination times	HSA, CSP
5	40. EUPVSEC (2023)	Poster	Influence of the material combination on the UV fluorescence of films for photovoltaic modules	HSA, CSP
6	40 EUPVSEC (2023)	Poster	COMPUTATIONAL SIMULATION AND EXPERIMENTAL VERIFICATION OF NON-DESTRUCTIVE TESTING OF PV MODULE ENCAPSULANT CROSS-LINKING	HSA, CSP, LayTec
7	40 EUPVSEC (2023)	Poster	Results and Sensitivity Assessments from a Cross-Technological Round-Robin Verification of Destructive and Non-Destructive Test Methods for Determining the Degree of Cross-Linking of Photovoltaic Module Encapsulants	HSA, CSP, LayTec, PIB, Sunset, IBC
8	39. PV-Symposium (2024)	Poster	Anwendbarkeit von Ultraviolett-Fluoreszenz (UVF) zur Bestimmung der Alterung moderner Verkapselungsmaterialien für photovoltaischer Module	HSA, CSP
9	39. PV-Symposium (2024)	Poster	Neue Einblicke in den Zusammenhang von unzureichender Lamination mit der Modulzuverlässigkeit	HSA, CSP
10	52. IEEE PVSC (2024)	Oral Presentation & Proceedings	Probing effects of the lamination time on module reliability using new variations of the sequential UV/TC stress testing	HSA, CSP

Nr.	Publikationsort	Art	Titel	Projektpartner
11	41. EUPVSEC / Progress in Photovoltaics	Vortrag	Crosslinking Behavior of Ethylene-Vinyl Acetate Copolymer Encapsulants in Dependence of the Additive Composition	HSA, CSP
12	41. EUPVSEC	Poster	Evaluation of the Impact of the UV Excitation Intensity on the Ultraviolet Fluorescence Measurement System for Photovoltaics	HSA, CSP
13	Progress in Photovoltaics: Research and Applications	Artikel	Crosslinking Behavior of Ethylene-Vinyl Acetate Copolymer Encapsulants in Dependence of the Additive Composition	HSA, CSP
14	3. Backsheet-workshop at HI ERN	Vortrag	Backsheets-Degradation according to sequential UV/TC-Tests on module level	HSA, CSP
15	40. PV-Symposium	Vortrag	Untersuchung der Backsheets-Rissbildung und Zuverlässigkeit von PV-Modulen mit variabler Laminierzeit anhand neuer Variante des seq. UV/TC-Stresstests	HSA, CSP
16	53. IEEE PVSC (2025)	Vortrag & Proceedings	Exploring acceleration limits of the pressure cooker tests for the assessment of the lamination conditions on the module degradation rate	HSA, CSP

1.6. Einhaltung der Kosten- und Zeitplanung

Die Kosten konnten eingehalten werden. Im Zeitplan gab es Änderungen, die das Gesamtprojekt aber nicht gefährdeten.