Fraunhofer CSP

Abschlussbericht

Zuwendungsempfänger:	**Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung eingetragener Verein**
Förderkennzeichen:	**03EE1112B**
Vorhabenbezeichnung:	**EVAplus - Erhöhung von Versorgungsicherheit, Anlagenperformance und Produktivität durch lebensdauerrelevante Untersuchungen der Stabilität der Modulverkapselung von PV-Modulen; Teilvorhaben: Materialzuverlässigkeit von EVA in realistischen Feldbedingungen**
Laufzeit des Vorhabens:	**01.03.2022 bis 28.02.2025**
Berichtszeitraum	**01.03.2022 bis 28.02.2025**
Autoren	**Patrick Wessel**
	Dr. Anton Mordvinkin
Datum	**29.08.2025**

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor

Fraunhofer CSP

1. Aufgabenstellung

Die Langzeitstabilität von Photovoltaik-(PV)-Modulen ist von zentraler Bedeutung für die Wettbewerbsfähigkeit der Solarenergie, wobei Hersteller Leistungsgarantien von über 25 Jahren geben. Eine entscheidende Rolle spielt hierbei die **Verkapselung**, die 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**, z. B. von Ethylen-Vinylacetat (EVA), 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, was eine kontinuierliche Anpassung der Prozessparameter erfordert. In der Industrie fehlt es jedoch an etablierten, zerstörungsfreien Prüfmethoden, um die Qualität der Lamination flächendeckend zu kontrollieren. Dies führt zu einem erhöhten 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 Versorgungsicherheit, Anlagenperformance und Produktivität zu erhöhen. Angestrebt wird eine Reduktion von verkapselungsbedingten Auffälligkeiten im Feld um 20 % sowie eine Steigerung des Produktionsertrags bei Modulherstellern um 2 %, erreicht durch eine beschleunigte, optimierte Lamination und eine Reduzierung des Ausschusses.

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

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 (EVA). 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

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.

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.

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. 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.

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.

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. Wissenschaftlicher und technischer Stand

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 Reproduzirbarkeit und Vergleichbarkeit der verschiedenen Messmethoden zu gewährleisten.

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

AP0: Management, Koordination und Dissemination

Um die Dissemination der Projekteinzelheiten voranzutreiben, wurden die Projektinformationen auf der Fraunhofer-Webseite und in der Mitteldeutschen Zeitung veröffentlicht. Die Auszüge aus den genannten Quellen sind in Abbildung 1 zu sehen.

Forscher am Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik in Halle arbeiten daran, die Langlebigkeit von Solarmodulen zu verbessern.

Die Sonne länger nutzen

UMWELT Solaranlagen sollen über Jahrzehnte Energie liefern. Für eine ausgedehnte Lebensdauer müssen sie aber perfekt verarbeitet sein. Dabei helfen Forscher aus Halle.

VON MATTHIAS MÖLLER

„Auffälligkeiten können zu Einbußen bei der Leistung von Modulen führen."

Dr. Anton Mordvinkin

Ideale Vernetzungsgrade bei Solarmodulen durch optimierte Qualitätskontrolle

Kontakt

Dr. Anton Mordvinkin

Abbildung 1: Auszüge aus der Mitteldeutschen Zeitung und Fraunhofer-Webseite für die Dissemination der Projektinformationen

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 5 Konferenzbeiträgen, sowie 3 Journal Artikeln veröffentlicht.

Konferenzbeiträge:

1. Non-destructive monitoring of mechanical and chemical changes in PV-mini-modules produced using variable lamination times (Nachwuchswissenschaftlerkonferenz, 2023)

a. Beteiligte Partner: CSP (X Link®-Messungen, Modulbau, Polymeranalytik, Bewitterung), HSA (optische Messungen und Auswertung)

2. Computational Simulation and Experimental Verification of Non-Destructive Testing of Encapsulant Cross-Linking in Photovoltaic Modules (EUPVSEC, 2023)

a. Beteiligte Partner: LayTec (technische Unterstützung, Paperschreiben), CSP (FEM-Simulationen, Messungen der Materialparameter)

3. 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 (EUPVSEC, 2023)

a. Beteiligte Partner: LayTec (X Link®-Messungen, Paperschreiben), Sunset (X Link®- und Soxhlet-Messungen, Modulbau), PI Berlin (Soxhlet-Messungen), IBC Solar (Bereitstellung der Benchmark-Module), CSP (X Link®- und Soxhlet-Messungen, Modulbau)

4. Non-destructive monitoring of mechanical and chemical changes in PV-mini-modules produced using variable lamination times (EUPVSEC, 2023)

a. Beteiligte Partner: CSP (X Link®-Messungen, Modulbau, Polymeranalytik, Bewitterung), HSA (optische Messungen und Auswertung)

5. Challenges for Quality Control Posed by New PV Encapsulation Materials (EUPVSEC, 2023)

a. Beteiligte Partner: PI Berlin (Messungen, Auswertung, Präsentation), CSP (Polymeranalytik, Bewitterung)

6. Neue Einblicke in den Zusammenhang von unzureichender Lamination mit der Modulzuverlässigkeit (PV Symposium, 2024)

a. Beteiligte Partner: CSP (X Link®-Messungen, Modulbau, Polymeranalytik, Bewitterung), HSA (optische Messungen und Auswertung)

7. Probing effects of the lamination time on module reliability using new variations of the sequential UV/TC stress testing (IEEE PVSC, 2024)

a. Beteiligte Partner: CSP und HSA

8. Backsheets-Degradation according to sequential UV/TC-Tests on module level (HI ERN Backsheet Workshop, 2025)

a. Beteiligte Partner: CSP und HSA

Veröffentlichungen:

1. Probing Effects of the Lamination Time on Module Reliability Using New Variations of the Sequential UV/TC Stress Testing (2024 IEEE 52nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), DOI: 10.1109/PVSC57443.2024.10748786)

a. Beteiligte Partner: CSP und HSA

2. Crosslinking Behavior of Ethylene-Vinyl Acetate Copolymer Encapsulants in Dependence of the Additive Composition (Progress in Photovoltaics, 10.1002/pip.3849)

a. Beteiligte Partner: CSP

3. Update of quality control tests for new PV encapsulation materials (EPJ Photovoltaics, 10.1051/epjpv/2024006)
    a. Beteiligte Partner: PIB und CSP

AP1: Material- und BOM-Identifikation

AP1.1: Entwicklung optischer Methoden zur Materialabschätzung

In diesem Arbeitspaket spielte das CSP durchweg eine unterstützende Rolle. LayTec stellte dem CSP NIRA-Sensoren zur Verfügung, um die HSA in der Materialerkennung zu unterstützen. Am CSP gefertigte und bewitterte Module wurden der HSA für spektroskopische Messungen bereitgestellt, um die chemische Degradation zerstörungsfrei zu analysieren. Neue Folien wurden identifiziert und wurden von der HSA vermessen. Die NIR-Methode half dabei, Polymerdegradation und Wassereintritt unter beschleunigten Alterungsbedingungen zu verfolgen. Zudem wurden verschiedene Referenzfolien mittels FTIR analysiert, um deren Signale zu quantifizieren. Diese Arbeiten legen die Grundlage für die Vorhersage des resultierenden Gelgehalts durch FTIR.

AP1.2a: Messung der für FEM benötigten mikrostrukturellen Materialparameter

> Die in der FEM-Simulation der Kalibrierung des X-Link benötigten Eingangsdaten, die in diesem Arbeitsschritt gemessen werden. Es wird die herausragende Mikrostrukturanalytik des CSP genutzt, um die benötigten Daten für die im Projekt verwendeten BOMs zu generieren.

Zur Kalibrierung der FEM-Simulationen für das X-Link®-Verfahren wurden im Projektverlauf umfangreiche Messungen der erforderlichen Eingangsdaten durchgeführt. Hierbei kam die herausragende Mikrostrukturanalytik des Fraunhofer CSP zum Einsatz, um präzise Materialparameter für die verwendeten Bill-of-Materials (BOMs) zu generieren.

1. Ortsaufgelöste Korrelation von Vernetzungsgrad und LXM-Werten

Die exakte Bestimmung des Vernetzungsgrads von Verkapselungsfolien erwies sich als entscheidend für die Korrelation mit zerstörungsfreien X-Link®-Messungen (LXM-Werten) und die Entwicklung der FEM-Simulation. Um Materialvariabilitäten zu kompensieren – die zuvor in AP2.4d identifiziert wurden und die Korrelation beeinträchtigten – wurden beide Größen ortsaufgelöst ermittelt. Dazu wurden speziell designte PV-Minimodule mit Trennlagen aus Backpapier laminiert (Abbildung 2). Dies ermöglichte die Probenentnahme an fünf definierten Positionen für Soxhlet-/Quellversuche, während benachbarte Bereiche für X-Link®-Messungen genutzt wurden. Die Minimodule wurden zunächst bei LayTec vermessen, anschließend am CSP mit komplementären Methoden analysiert.

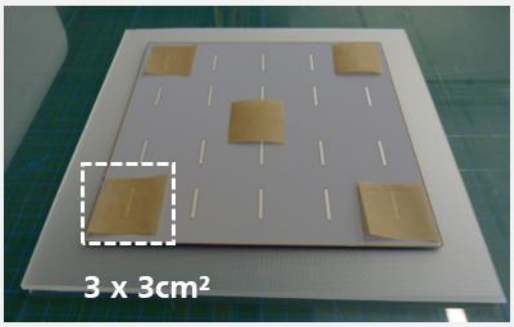


Abbildung 2: PV-Minimodulaufbau mit den Trennlagen aus Backpapier. Die Trennlagen ermöglichen Probenentnahme für die ortsaufgelöste Korrelation von Soxhlet- und X-Link-Methoden.

2. Methodenentwicklung und Validierung

Quellversuch als Alternative: Um den hohen Probenbedarf von Soxhlet-Messungen zu reduzieren und den Durchsatz zu erhöhen, wurde der Quellversuch etabliert (Abbildung 3). Dieser zeigte eine

exzellente Korrelation mit der Soxhlet-Methodik (Abbildung 38) und lieferte zusätzlich die Vernetzungsdichte – ein kritischer Parameter, der bei hohen Laminationsgraden sensitiver reagiert als der Gelgehalt (Abbildung 39). Der gemessene Gelgehalt mittels Quellversuch korreliert wie erwarten mit den LXM-Werten (Abbildung 4). Hier zeigt sich die höhere Auflösung der X Link-Methodik gegenüber dem Gelgehalt.

Abbildung 3 Beispiel der Folienextraktion für die ortsaufgelöste Bestimmung des Gelgehalts für die Korrelation mit den LXM-Werten.

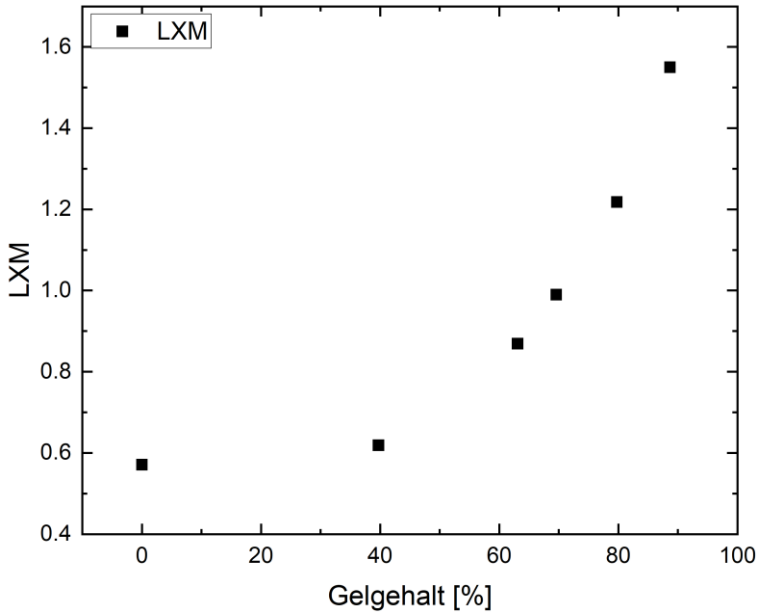


Abbildung 4 Korrelation zwischen den LXM-Werten, gemessen mittels X Link®, und dem Gelgehalt aus den Quellversuchen.

Round-Robin zur Gelgehaltsbestimmung: Ein Vergleich zwischen CSP, PI Berlin und Sunset offenbarte systematische Abweichungen: Während CSP und PI Berlin konsistente Ergebnisse erzielten, überschätzte Sunset aufgrund der Verwendung von Xylol (Siedepunkt 140°C), das bei Laminationstemperaturen (130–160°C) zur Nachvernetzung führte. Folglich wurden die CSP-Daten für die FEM-Simulationen herangezogen (Abbildung 5).

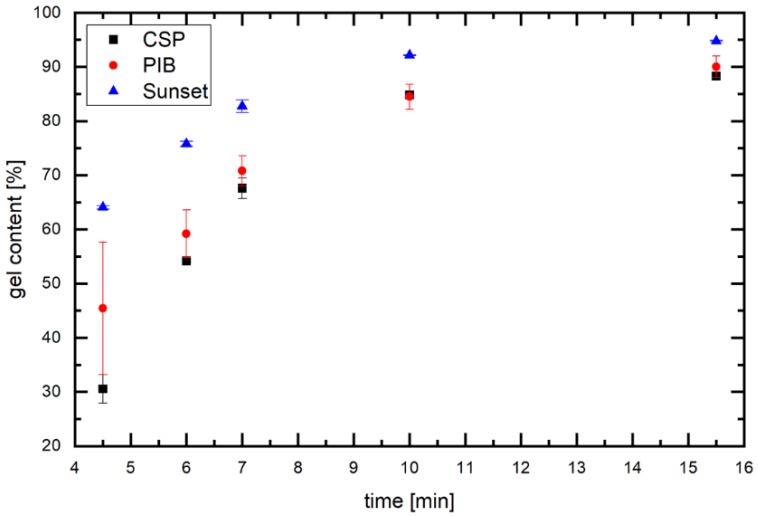


Abbildung 5 Roundrobin zur Bestimmung des Gelgehaltes von EVA in den Laboren vom CSP, PIB und Sunset.

3. Rheologische Charakterisierung für FEM-Eingangsparameter

Die Ermittlung der temperaturabhängigen Elastizitätsmodule (für EVA und Rückseitenfolien) gestaltete sich herausfordernd: Erste Versuche im Penetrationsmodus scheiterten an Probenhalterungsproblemen (Abbildung 6). Auch Schermessungen (Platte-Platte-Geometrie) führten zunächst zu fehlendem Probenkontakt (Abbildung 7). Erfolgreich war schließlich die in-situ-Lamination im Rotationsrheometer bei Standard-Laminationstemperaturen, gefolgt von Messungen im X-Link®-Relevanten Temperaturbereich (Abbildung 8). Dabei zeigten sich klare Trends: Der Speichermodul (G´) stieg mit zunehmender Vernetzungszeit. Kinetische Variationen deuteten auf Materialinhomogenitäten (Peroxid-/Beschleunigerverteilung) hin. Trotz maximaler Gelgehalte von ~73% im Rheometer (vs. >90% im Laminator) lieferten die Daten wertvolle Eingangsparameter. In späteren Phasen wurden DMA-Messungen für sechs BOMs von Rückseitenfolien durchgeführt (Abbildung 9), die zuvor in den Simulationen fehlten.

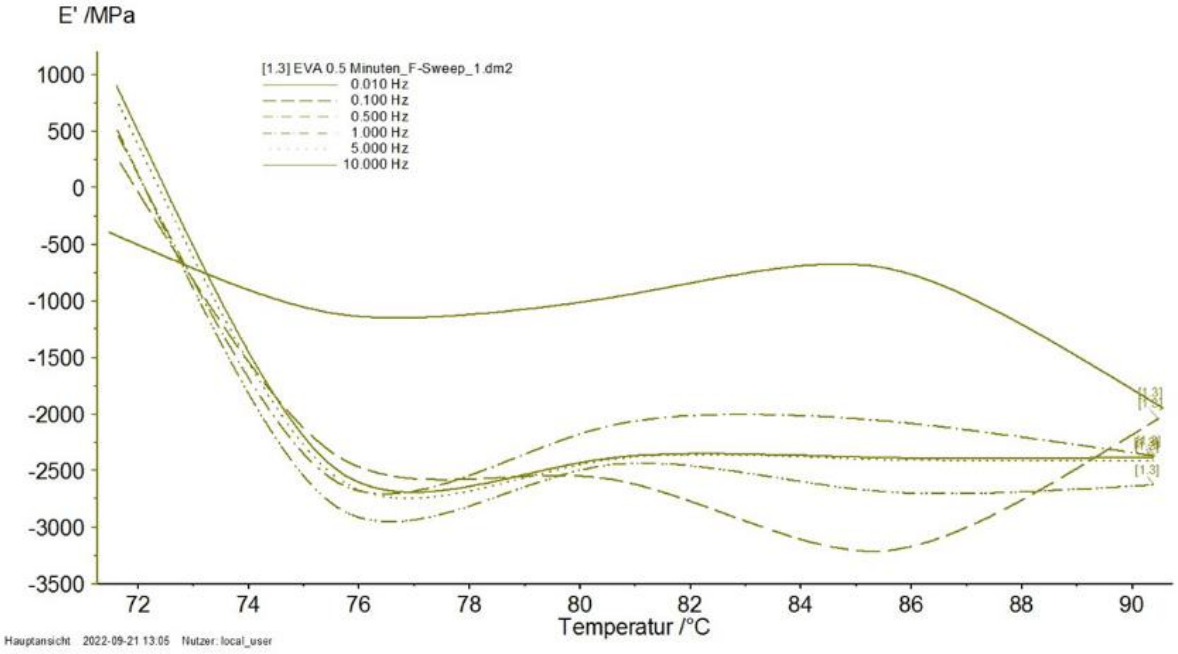


Abbildung 6: Versuch der rheologischen Untersuchungen im Kompressionsmodus an laminierten EVA-Folien.

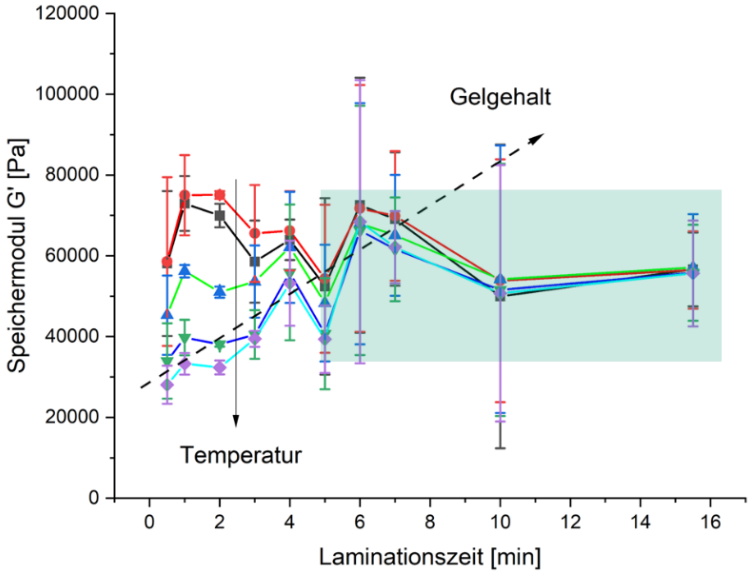


Abbildung 7: Versuch der rheologischen Untersuchungen im Schermodus an laminierten EVA-Folien.

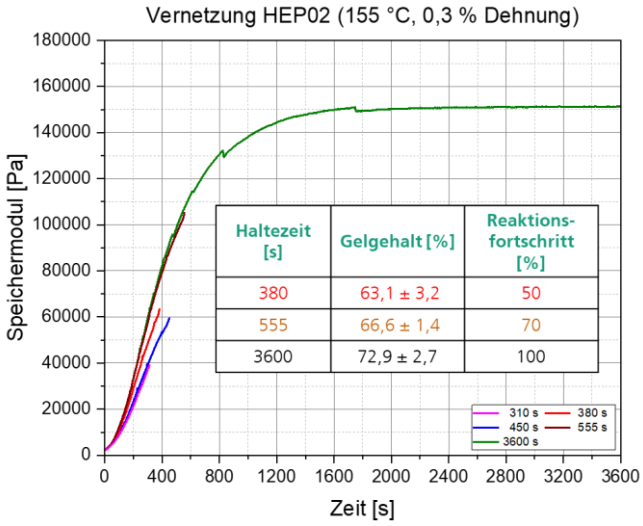


Abbildung 8 Vernetzungsreaktionsverlauf, gemessen in-situ mittels des Rotationsrheometer, bei unterschiedlichen Haltezeiten. Die resultierenden Gelgehalte sind in der eingefügten Tabelle zu sehen.

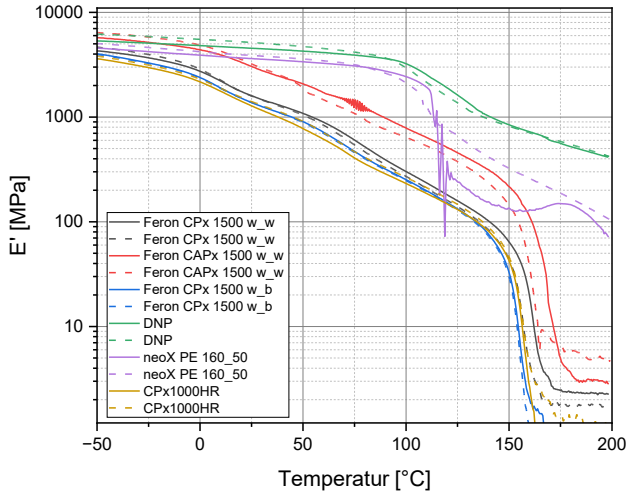


Abbildung 9: DMA-Ergebnisse von Rückseitenfolien, verwendet in den neuen Minimodulen

4. Reproduzierbarkeit und Tool-übergreifende Validierung

Ein Round-Robin der X-Link®-Messungen (CSP, Sunset, LayTec) bestätigte die Reproduzierbarkeit: CSP und Sunset zeigten identische Trends mit einem systematischen Offset von ~0,2 Einheiten (Abbildung 10), der durch Gerätekalibrierung kompensierbar ist. Dies unterstrich die Robustheit des Verfahrens für industrielle Anwendungen. Dem Gegenüber ist die Heterogenität der Vernetzungsgrade innerhalb der Folie problematisch, wie es an der Verteilung von LXM-Werten innerhalb eines Batchs zu erkennen ist (Abbildung 11).

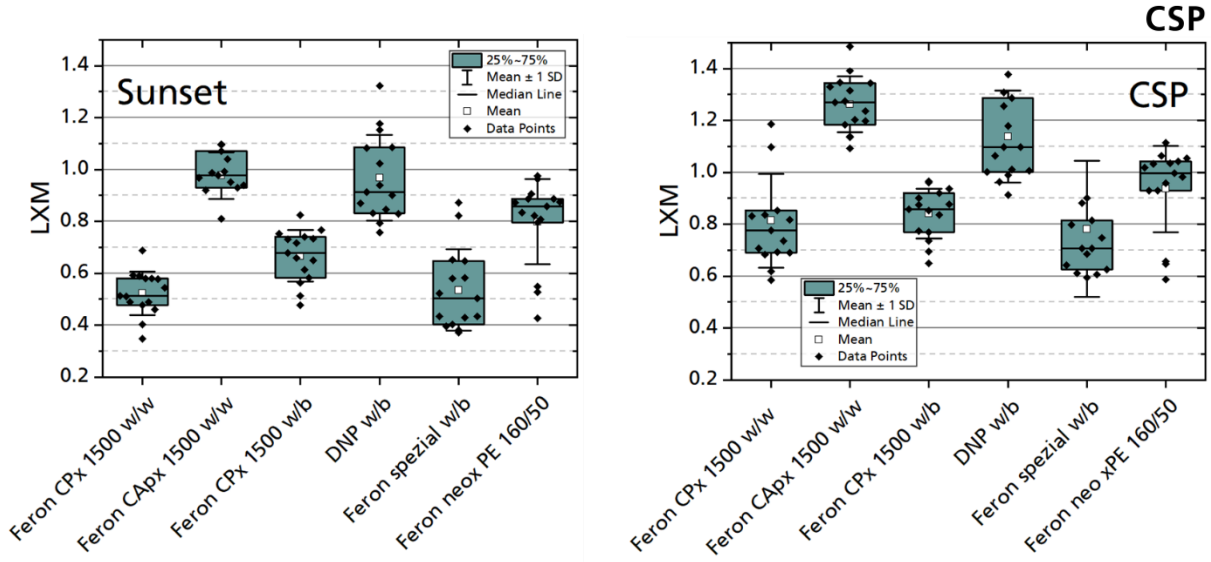


Abbildung 10: Roundrobin von X-Link-Messungen, gemessen am CSP und Sunset.

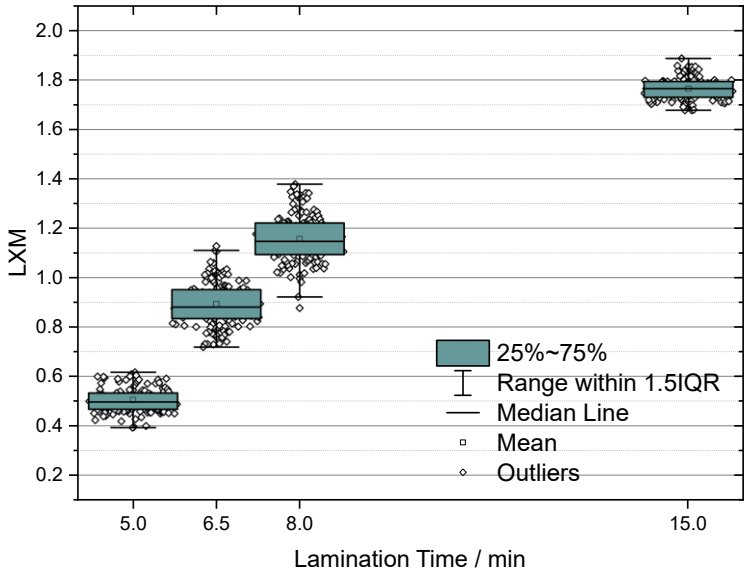


Abbildung 11 Variation der LXM-Werte über die Modulfläche bei verschiedenen Laminationszeiten.

5. Synergien und innovative Ansätze

Im Rahmen eines Fraunhofer-internen Projekts wurde eine kontaktlose NMR-Methode zur Vernetzungsgradmessung an Glas-Glas-Modulen entwickelt, die potenziell in zukünftige Projekte integriert werden kann. Abschließend wurden Spannungsrelaxationsdaten aus X-Link®-Messungen sowie temperatur-/frequenzabhängige DMA-Daten für EVA-Laminationsserien erhoben, um die FEM-Simulationen weiter zu verfeinern.

Fazit

Die Arbeiten demonstrierten, dass die Materialvariabilität von EVA-Folien durch ortsaufgelöste Messstrategien, methodische Innovationen (Quellversuch) und interlaboratorische Validierung erfolgreich kompensiert werden kann. Die generierten Datensätze – insbesondere zu

Elastizitätsmodulen, Gelgehalten und LXM-Werten – bilden eine robuste Grundlage für die prädiktive FEM-Simulation des X-Link®-Verfahrens und unterstreichen die Bedeutung der Mikrostrukturanalytik des CSP für die Photovoltaik-Forschung.

AP1.3a: Entwicklung BOM-Datenbank

> Eine Datenstruktur und eine Nutzungsstrategie. Die Struktur wird che-mische, optische und mikrostrukturelle Informationen enthalten, die für die Identifikation von Materialien durch den gesamten Lebenszyk-lus der Materialien sicherzustellen, welches die Grundlage einer Ver-besserung der allgemeinen Qualitätssicherung in der Industrie bilden wird. Das CSP wird eine auf GCMS Messungen automatisierte Materi-alerkennung entwickeln.

Im Rahmen des Projekts wurde eine umfassende Datenstruktur zur Erfassung chemischer, optischer und mikrostruktureller Materialeigenschaften entwickelt, die eine lückenlose Identifikation von Photovoltaik-Materialien über deren gesamten Lebenszyklus ermöglicht. Diese Struktur bildet die Grundlage für eine verbesserte Qualitätssicherung in der Industrie. Das Fraunhofer CSP implementierte hierfür eine automatisierte Materialerkennung basierend auf Pyrolyse-Gaschromatographie-Massenspektrometrie (Py-GCMS)-Messungen. Kern der Datenstruktur ist eine BOM-Datenbank (Bill of Materials, Tabelle 1 und Tabelle 2). Die Datenbank kategorisiert Materialien systematisch nach: - Materialtyp (Verkapselungsmaterialien: EVA, POE, TPO; Rückseitenfolien) - Eigenschaftsklassen (mechanisch, chemisch, thermisch) Die Datensätze umfassen Ergebnisse aus diversen Analysemethoden, darunter Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC), Thermogravimetrische Analyse (TGA), Py-GCMS, Soxhlet-/Quellversuche, Rheologie und Nahinfrarotspektroskopie (NIRA). Jeder Materialparameter ist mit den zugrundeliegenden analytischen Diagrammen verknüpft, wie exemplarisch in Abbildung 12 dargestellt. Die Datenbank dient mehreren strategischen Anwendungen:

1. **Materialerkennung:** Py-GCMS- und NIRA-Daten (HSA) dienen dazu, um Materialien eindeutig zu identifizieren.
2. **FEM-Simulationen:** Rheologische Daten (frequenz- und temperaturabhängige Elastizitätsmodule) werden mit chemischen Kennwerten aus Soxhlet-/Quellversuchen korreliert, um das X-Link®-Verfahren zu simulieren (AP1.2a).
3. **Qualitätssicherung:** Thermische DSC-Daten definieren optimale Laminationstemperaturfenster und liefern Referenzwerte für Vernetzungsenthalpien. Abweichungen hiervon erlauben die Detektion von Vernetzer-Überschüssen oder -Defiziten in Einkapselungsfolien.

Zusätzlich wurden weitere Materialeigenschaften integriert, um die Charakterisierung zu vervollständigen, darunter Barriereeigenschaften, thermische Beständigkeit, Glasübergangstemperaturen und Kristallinitätsgrade. Die Datenbank wurde kontinuierlich erweitert: In mehreren Berichtsperioden wurden neue Verkapselungs- (24 Proben) und Rückseitenfolien (34 Proben) von den Projektpartnern PI Berlin und Sunset bereitgestellt. Ein praktisches Beispiel unterstreicht den Nutzen: DSC-Messungen an Rückseitenfolien identifizierten über charakteristische Schmelzpunkte die Polymerzusammensetzung – so wurde eine Folie als reines Polypropylen (PP), eine andere als mit Polyethylen (PE) primiertes Polyethylenterephthalat (PET) erkannt. Zusammenfassend schafft diese strukturierte, anwendungsorientierte Datenbank eine zentrale Wissensplattform für die Materialqualifikation in der Photovoltaik-Industrie und demonstriert die erfolgreiche Umsetzung der projektdefinierten Nutzungsstrategie.

Fraunhofer CSP

Tabelle 1: Übersicht der BOM-Datenbank mit relevanten Folieneigenschaften Teil 1.

					DSC			TGA		
Typ	Material	Produktname	Hersteller	Methode	Schmelztemperatur [°C]	Vernetzungsenthalpie [J/g]	Vernetzungstemperatur [°C]	Onset [°C]	VA-Anteil [%]	Restmasse [%]
Verkapselung	EVA	EVA9910T	3M	DSC	48,5 / 68,6	1,742 / 14,042	114,8 / 151,8			
Verkapselung	EVA	Conserv P360-14 FC	RenewSys	DSC	48,6 / 69,2	2,066 / 10,559	108,2 / 150,4			
Verkapselung	EVA	Conserv PUVT-14 FC	RenewSys	DSC	47,9 / 68,6	2,895 / 10,981	109,8 / 150,9			
Verkapselung	POE	Conserv E360	RenewSys	DSC	48,1 / 81,8	9,148	158,4			
Verkapselung	POE	BPO8828S	Borealis	DSC	47,1 / 92,7	x	x			
Verkapselung	EVA	EVA9910T	3M	TGA				327,0	27,2	0,9
Verkapselung	EVA	Conserv P360-14 FC	RenewSys	TGA				329,7	28,9	1,4
Verkapselung	EVA	Conserv PUVT-14 FC	RenewSys	TGA				330,5	28,7	1,1
Verkapselung	POE	Conserv E360	RenewSys	TGA				438,6	x	1,5
Verkapselung	POE	BPO8828S	Borealis	TGA				415,6	x	1,3
Verkapselung	EVA	EVA9910T	3M	Quellversuch						
Verkapselung	EVA	Conserv P360-14 FC	RenewSys	Quellversuch						
Verkapselung	EVA	Conserv PUVT-14 FC	RenewSys	Quellversuch						
Verkapselung	POE	Conserv E360	RenewSys	Quellversuch						
Verkapselung	POE	Solar ASCE VR01BA	Mitsui Chemicals	Soxhlet						
Verkapselung	POE	Solar ASCE VR01BA	Mitsui Chemicals	Permeation						
Verkapselung	POE	Solar ASCE VR01BA	Mitsui Chemicals	DSC		6,003	157,9			
Verkapselung	EVA	HEP02T	Hanwha Qcells	Soxhlet						
Verkapselung	EVA	HEP02T	Hanwha Qcells	Quellversuch						
Verkapselung	EVA	HEP02T	Hanwha Qcells	Permeation						
Verkapselung	EVA	HEP02T	Hanwha Qcells	DSC		12,64	156,3			

Fraunhofer CSP

Tabelle 2: Übersicht der BOM-Datenbank mit relevanten Folieneigenschaften Teil 2.

					Quellversuch/Soxhlet	ZDMA			RDMA		Permeation 30 °C 80% r.H.
Typ	Material	Produktname	Hersteller	Methode	Gelgehalt [%]	Tg [°C]	E' $_{89\,°C}$ [MPa]	E' $_{110\,°C}$ [MPa]	G' $_{89\,°C}$ [MPa]	G' $_{110\,°C}$ [MPa]	WVTR [g/m²d]
Verkapselung	EVA	EVA9910T	3M	DSC							
Verkapselung	EVA	Conserv P360-14 FC	RenewSys	DSC							
Verkapselung	EVA	Conserv PUVT-14 FC	RenewSys	DSC							
Verkapselung	POE	Conserv E360	RenewSys	DSC							
Verkapselung	POE	BPO8828S	Borealis	DSC							
Verkapselung	EVA	EVA9910T	3M	TGA							
Verkapselung	EVA	Conserv P360-14 FC	RenewSys	TGA							
Verkapselung	EVA	Conserv PUVT-14 FC	RenewSys	TGA							
Verkapselung	POE	Conserv E360	RenewSys	TGA							
Verkapselung	POE	BPO8828S	Borealis	TGA							
Verkapselung	EVA	EVA9910T	3M	Quellversuch							
Verkapselung	EVA	Conserv P360-14 FC	RenewSys	Quellversuch							
Verkapselung	EVA	Conserv PUVT-14 FC	RenewSys	Quellversuch							
Verkapselung	POE	Conserv E360	RenewSys	Quellversuch							
Verkapselung	POE	Solar ASCE VR01BA	Mitsui Chemicals	Soxhlet							1,6
Verkapselung	POE	Solar ASCE VR01BA	Mitsui Chemicals	Permeation							
Verkapselung	POE	Solar ASCE VR01BA	Mitsui Chemicals	DSC							
Verkapselung	EVA	HEP02T	Hanwha Qcells	Soxhlet	90,9						
Verkapselung	EVA	HEP02T	Hanwha Qcells	Quellversuch	92,3						5,3
Verkapselung	EVA	HEP02T	Hanwha Qcells	Permeation							
Verkapselung	EVA	HEP02T	Hanwha Qcells	DSC							

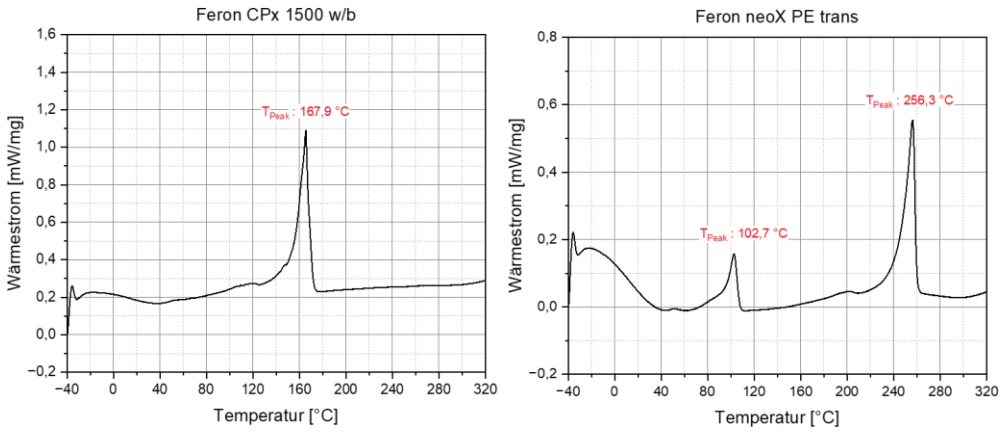


Abbildung 12: Beispielhafte DSC-Daten von 2 Rückseitenfolien, welche in die BOM-Datenbank aufgenommen wurden. Anhand der Daten konnten Polymere in den einzelnen Lagen erkannt werden

AP1.3b: Bestimmung des chemischen Fingerprints gängiger Folien

> Folien verschiedener Quellen werden mit Hilfe einer zerstörenden Analytik (TD-GCMS, bzw. Pyrolyse GCMS) untersucht und ein chemischer Fingerabdruck wird erstellt. Die Daten werden in die Datenbank hochgeladen, die somit die Grundlage für die Materialerkennung von Polymeren im Feld bilden.

Es wurden Folien verschiedener Quellen mittels zerstörender Analytik untersucht, um chemische Fingerabdrücke zu erstellen und eine Datenbank für die Materialerkennung von Polymeren im Feld aufzubauen. Hierzu kamen vorrangig die Pyrolyse-Gaschromatographie-Massenspektrometrie (Py-GCMS) sowie ergänzende Methoden wie DSC, FTIR, NIRA-Spektroskopie und TGA zum Einsatz. Zunächst wurden Verkapselungsfolien auf EVA-Basis, sowie von den Partnern PI Berlin und Sunset mittels Py-GCMS analysiert (Beispiel in Abbildung 13). Dabei wurden qualitative Nachweise verschiedener Additive erbracht, darunter Vernetzer, Haftvermittler und UV-Stabilisatoren. Diese Ergebnisse wurden kontinuierlich in die BOM-Datenbank integriert. Parallel erfolgten NIRA-spektroskopische Messungen der HSA an neuen Folien.

Ein Schwerpunkt lag auf der Quantifizierung von Vernetzern und Beschleunigern, die wesentliche Bestandteile des chemischen Fingerabdrucks darstellen. Hierzu wurden am CSP Referenzfolien mit definiert variierenden Mengen dieser Additive bei konstantem Gehalt anderer Komponenten extrudiert, um Kalibrierungskurven zu erstellen (Tabelle 3, Tabelle 4, Tabelle 5). In frühen Projektphasen wurden Vernetzermengen zunächst mittels DSC-Untersuchungen abgeschätzt, wobei Vernetzungsenthalpien und Peakformen analysiert wurden. Später wurde die Quantifizierung gezielt auf Py-GCMS verlagert. Dabei traten Herausforderungen bei der Abstimmung der Additivkonzentrationen auf: Initiale Referenzfolien enthielten zu hohe Mengen, was eine Extrapolation der Kalibrierkurven erforderlich machte. Nachfolgende Serien mit reduzierten Gehalten führten hingegen zu nicht messbaren Gelgehalten nach der Lamination. Daher wurden angepasste Referenzfolien mit mittleren Konzentrationen entwickelt, orientiert an Daten kommerzieller EVA-Folien. Die Evaluierung der DSC-Methode offenbarte Limitationen durch Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Additiven: Reaktionsenthalpien wurden durch Beschleuniger (TAIC) erhöht und durch Stabilisatoren wie BHT gesenkt (Abbildung 14 und Abbildung 16)). Diese Interaktionen stellten die Eignung von DSC für die Vernetzerquantifizierung infrage, weshalb Py-GCMS als direkte und

zuverlässigere Methode priorisiert wurde. Ergänzend wurden weitere Verkapselungs- und Rückseitenfolien mittels Polymeranalytik (DSC, FTIR, Py-GCMS, TGA) charakterisiert. Die gewonnenen chemischen Fingerabdrücke, einschließlich identifizierter Stabilisatoren wie Antioxidantien und UV-Absorber, flossen vollständig in die BOM-Datenbank ein. Diese bildet nun die Grundlage für die präzise Materialerkennung von Polymeren in praktischen Anwendungen. So konnten die Additive in fünf kommerziellen Verkapselungsfolien quantifiziert werden (Abbildung 15) Die Projektergebnisse demonstrieren die Etablierung einer robusten Analytik-Pipeline für die chemische Charakterisierung von Polymerfolien und unterstreichen die Bedeutung standardisierter Referenzmaterialien und kalibrierter Py-GCMS-Methoden für die Datenbank.

		Additive								
Produktname	**Materialtyp**	**2-Ethylhexan-1-ol / 104-76-7**	**2-Ethylhexanal / 123-05-7**	**Perkalink 301 / 1025-15-6**	**3-(Trimethoxysilyl) propylmethacrylat / 2530-85-0**	**Antioxidans**	**Cyasorb UV 531 / 1843-05-6**	**UV-Stabil.1**	**Prozessierungshilfsmittel / Weichmacher**	**Anmerkung**
HEP02	EVA	✓	×	✓	×	×	✓			Unbekannt bei 29.06min, ggf. ein HALS-amin
HEP02T	EVA	✓	×	✓	×	×	×			Unbekannt bei 29.06min, ggf. ein HALS-amin
Renewsys India Pvt.Ltd. (Solarc) CONSERV P 360 - 14 FC	EVA	✓	✓	✓	✓	×	✓			

Abbildung 13: Ausschnitt aus der Materialdatenbank bzgl. der Additive ermittelt mittels GC-MS.

Tabelle 3: Ausgangspunkt der Additivzusammensetzung für EVA-Folien.

Name	Function	Mass [phr]	CAS Number
ELVAX 150W	Polymer		
Cyasorb® UV-531	UV absorber	0.3	1843-05-6
Tinuvin 770	Light Stabilizer	0.13	52829-07-9
Silan A 174	Adhesion Promoter	1.2	2530-85-0
Luperox TBEC	Crosslinking Agent	1.5	34443-12-4
Perkalink 301	Crosslinking Accelerator	2.5	1025-15-6

Tabelle 4: Variation der Vernetzer- und Beschleuniger-Anteile c.

Konzentration c	$\frac{c}{3}$	$\frac{c}{2}$	c_0	$2 \cdot c$	$3 \cdot c$
m(Luperox TBEC) [phr]	0,5	0,75	1,5	3	4,5
m(Perkalink 301) [phr]	0,833	1,25	2,5	5	7,5

Tabelle 5: Variation der Beschleuniger-Anteile bei konstantem Vernetzer.

Luperox TBEC:Perkalink 301 (molar)	1:0	1:0,5	1:1	1:3
m(Luperox TBEC) [phr]	1,5	1,5	1,5	1,5
m(Perkalink 301) [phr]	0	0,7589	1,518	4,554

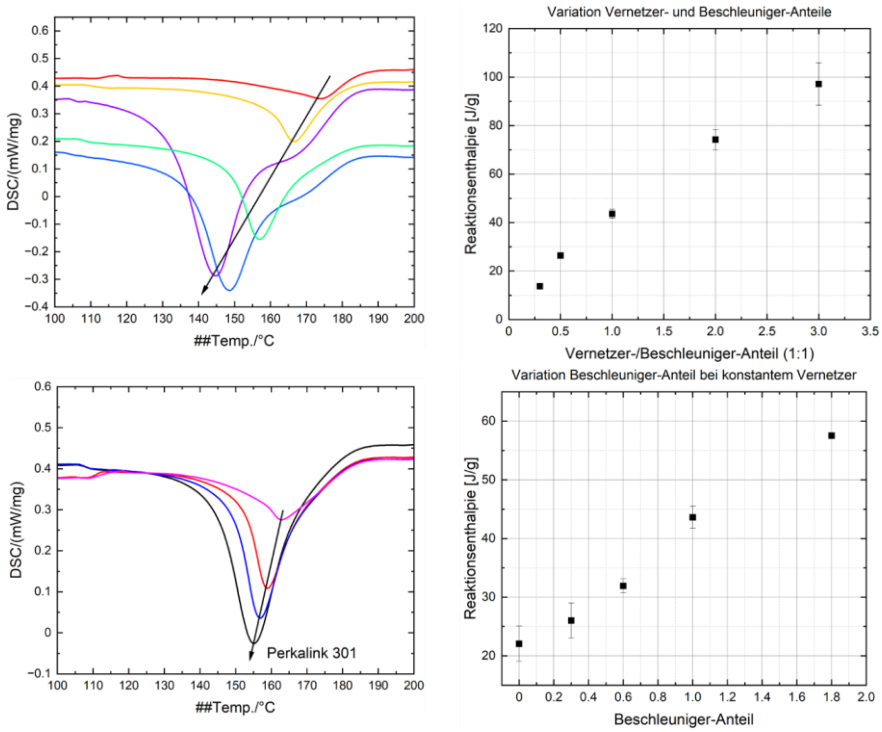


Abbildung 14 DSC-Ergebnisse von Referenzfolien. Oben: Variation des Gesamtgehalts von Vernetzer und Beschleuniger beim konstanten Verhältnis. Unten: Variation des Beschleuniger-Gehalts beim konstanten Vernetzer-Gehalt.

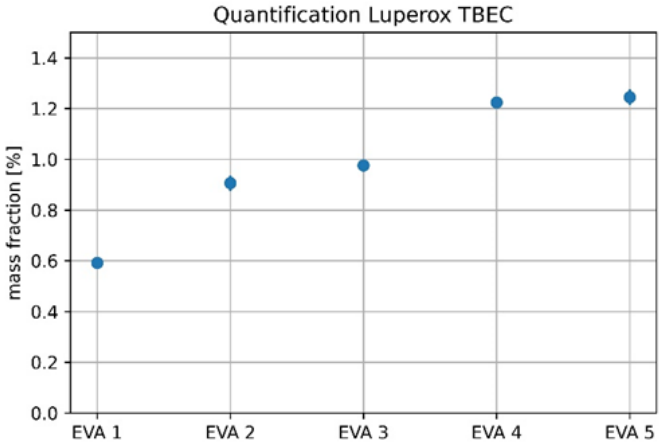


Abbildung 15: Vernetzer-Gehalte von Luperox TBEC in kommerziellen EVA-Folien, ermittelt mitels Py-GCMS

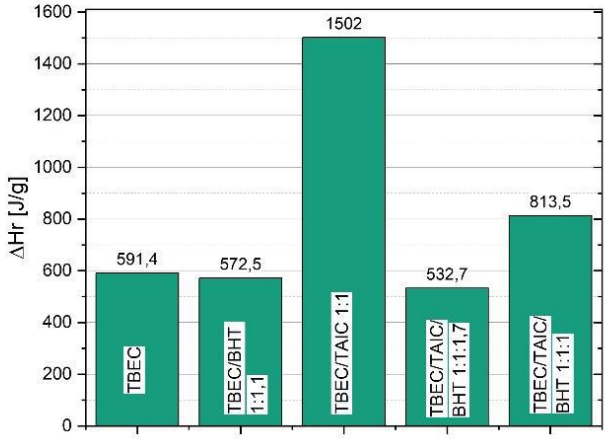


Abbildung 16: Reaktionsenthalpien von unterschiedlichen Additivkombinationen ohne die Polymer-Matrix. Die Werte sind normiert auf den Vernetzer-Gehalt.

AP2: Untersuchungen zur Vernetzungsgradbestimmung

AP2.2c: FEM-Simulationen des Mikroindenterverfahrens (CSP)

> Es wird ein digitaler Zwilling des Messverfahrens entwickelt. Es werden verschiedene BOMs und auch verschiedene Prozessbedingungen simuliert mit dem Ziel, die Kalibrierung zu unterstützen, aber auch den Einfluss verschiedener BOMs auf den LXM besser zu verstehen. Dies ist die Grundlage für ein besseres Verständnis des X-Link und auch die Grundlage, um an unbekannten BOMs sinnhafte Messungen durchführen zu können. Die Simulationen informieren auch die Entwicklung der Datenbank und definieren die benötigten strukturellen Daten für die Vernetzungsgradabschätzung aus dem LXM.

Es wurde ein digitaler Zwilling des X-Link®-Messverfahrens entwickelt, um verschiedene Materialstücklisten (BOMs) und Prozessbedingungen zu simulieren. Diese Arbeiten dienten dem vertieften Verständnis des Einflusses von BOM-Variationen auf die LXM-Werte, sowie der Schaffung einer Grundlage für zuverlässige Messungen an unbekannten Materialzusammensetzungen. Zur Umsetzung wurden zunächst relevante mikrostrukturelle Parameter gemäß Arbeitspaket AP1.2a systematisch erfasst. In enger Kooperation mit LayTec erfolgte die 3D-Modellierung des X-Link®-Messverfahrens, gefolgt von ersten Simulationen, die vielversprechende Ergebnisse lieferten. Diese Simulationen ermöglichten eine detaillierte Fehleranalyse, die technische Limitationen der Detektionsmethode sowie Temperaturschwankungen identifizierte. Zudem wurden erste Vorhersagen des Gelgehalts für unbekannte BOMs ohne Kalibration realisiert. Für eine vollständige Umsetzung dieser Vorhersagefunktionalität waren jedoch zusätzliche Materialparameter und eine Weiterentwicklung des Modells erforderlich, die in der Folgephase des Projekts priorisiert wurden. Die entwickelten Simulationsmodelle (Abbildung 17 und Abbildung 18) bildeten die Basis für eine datengestützte Optimierung der Vernetzungsgradanalyse. Sie trugen maßgeblich dazu bei, die Wechselwirkungen zwischen Materialeigenschaften, Prozessbedingungen und Messergebnissen zu verstehen, wodurch die Robustheit der LXM-basierten Materialcharakterisierung signifikant gesteigert wurde. Durch diese Arbeiten wurde eine methodische Grundlage geschaffen, die es ermöglicht, auch komplexe oder unvorhergesehene Materialkombinationen präzise zu analysieren und die Datenbankstruktur für künftige Anwendungen in der Polymerdiagnostik gezielt zu erweitern.

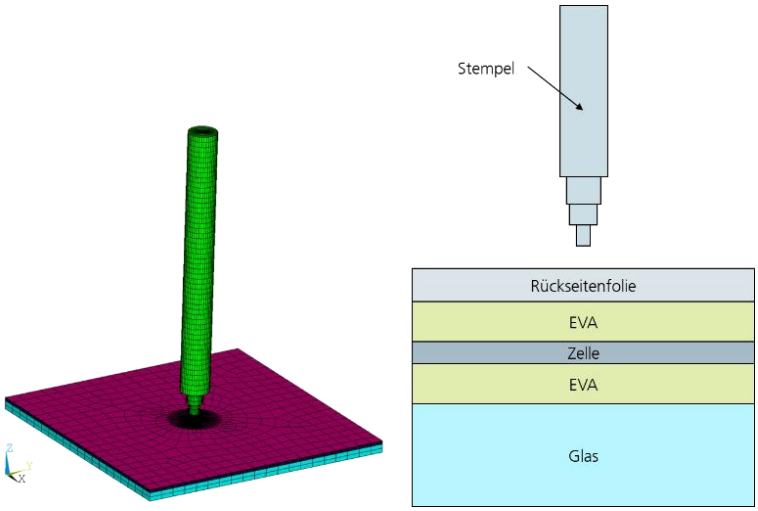


Abbildung 17 3D-Model für die Simulation des X Link®-Messverfahrens.

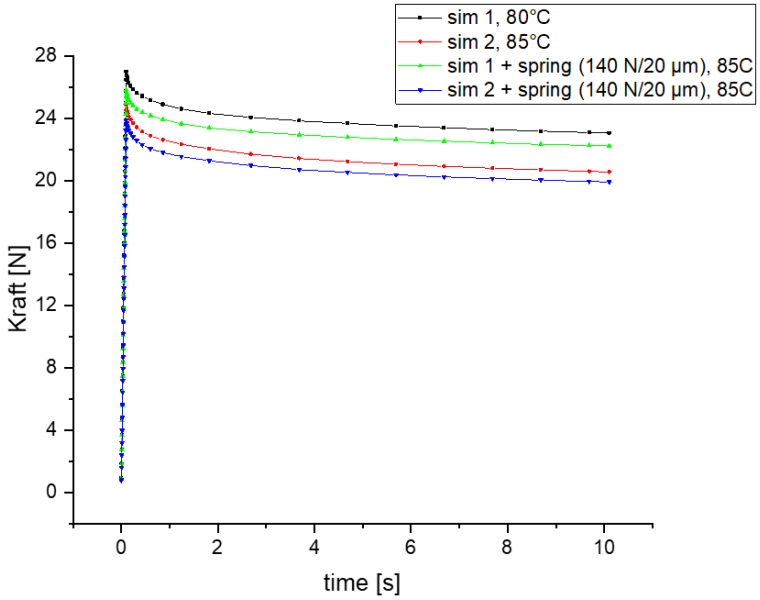


Abbildung 18 Die simulierten Krafttransienten

AP2.2d: Transfer zu weiteren BOMs

> Die Messung des Vernetzungsgrads hängt von den strukturellen Eigenschaften der Rückseitenfolie ab. Dies wird mit Hilfe der FEM vorhergesagt, aber in diesem Arbeitsschritt auch experimentell verifiziert. Mit anderen Materialien gefertigte Laminate werden mit LXM untersucht, und der Vernetzungsgrad zerstörend an aus dem Modul extrahierten Proben der Verkapselungsfolien bestimmt.

Es wurde der Einfluss struktureller Eigenschaften von Rückseitenfolien auf die Messung des Vernetzungsgrads untersucht. Hierzu wurden Finite-Elemente-Methode (FEM)-Simulationen mit experimentellen Validierungen kombiniert. Konkret wurden Laminate mit variierenden Materialkombinationen (BOMs) mittels des X Link-Verfahrens analysiert und der Vernetzungsgrad zerstörend an extrahierten Proben der Verkapselungsfolien bestimmt. Zur Vorbereitung der Simulationen wurden zunächst relevante mikrostrukturelle Parameter gemäß Arbeitspaket AP1.2a

systematisch erfasst. Für die experimentelle Validierung produzierte Sunset sechs spezifische BOMs, bestehend aus einer EVA-Folie und sechs unterschiedlichen Rückseitenfolien. Diese Konfiguration ermöglichte die Untersuchung der Effekte von Backsheet-Variationen bei konstanter Verkapselung auf die LXM-Messergebnisse. Die experimentell ermittelten LXM-Werte wurden mit simulierten Daten verglichen, die auf DMA-Daten der Rückseitenfolien und Steifigkeitswerten der EVA-Folien basierten. Wie in Abbildung 19 dargestellt, reproduzierten die FEM-Simulationen die Trends der LXM-Werte über fünf der sechs BOMs hinweg. Allerdings wichen die absoluten Werte signifikant voneinander ab, was auf eine niedrigere Simulationstemperatur (85 °C gegenüber 89 °C im Experiment) sowie vereinfachende Annahmen zu Federkonstanten in den FEM-Modellen zurückgeführt wurde. Zur Klärung dieser Diskrepanzen wurden die Spannungsrelaxationsabfälle aus dem X Link®-Gerät detailliert analysiert. Der kontinuierliche Abgleich zwischen simulierten und experimentellen Daten erforderte iterative Anpassungen der FEM-Parameter, die im Projektverlauf priorisiert und an die Hochschule Anhalt (HSA) zur finalen Verfeinerung übergeben wurden. Diese Arbeiten bestätigten, dass strukturelle Eigenschaften der Rückseitenfolien einen maßgeblichen Einfluss auf die Vernetzungsgradmessung ausüben. Während die FEM-Simulationen qualitative Trends zuverlässig vorhersagten, unterstrich die experimentelle Validierung die Notwendigkeit präziser thermischer und mechanischer Randbedingungen für quantitative Übereinstimmungen. Die gewonnenen Erkenntnisse bilden eine essenzielle Grundlage für die zuverlässige Anwendung des LXM-Verfahrens bei unbekannten Materialkonfigurationen.

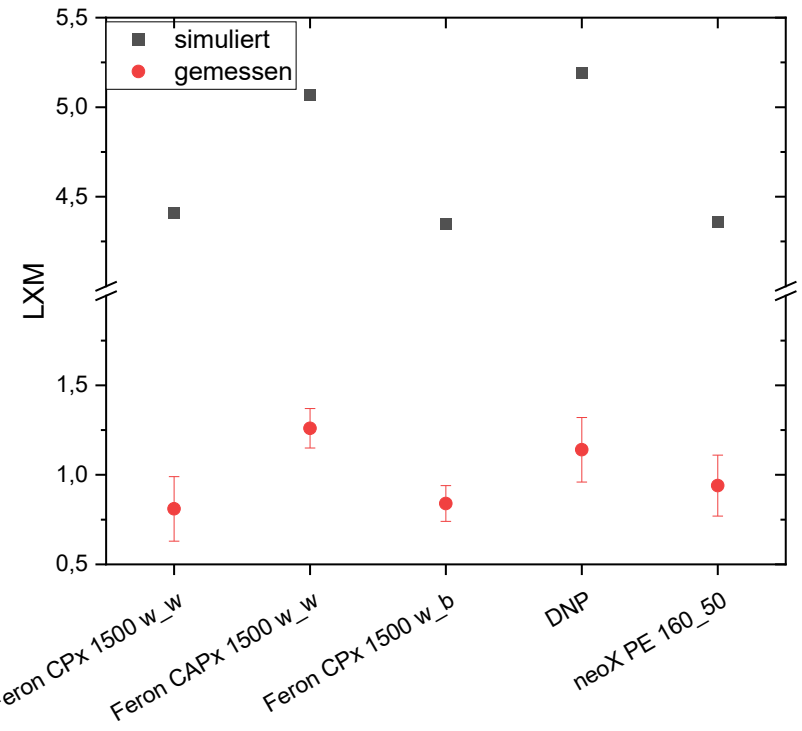


Abbildung 19: Vergleich von experimentellen und simulierten LXM-Werten für 5 BOMs.

P2.3b: Minimodulalterung & -bewertung

Die Module mit variablen Vernetzungsgraden aus dem vorhergegangenen Arbeitsschritt werden definierten Alterungsprozessen unterzogen, um den Einfluss der verschiedenen Vernetzungsgrade auf die Zuverlässigkeit zu untersuchen. Die Alterungsprozesse werden so

ausgewählt, dass bekannte Fehlermechanismen beschleunigt werden. Dies wird zu einem verbesserten Verständnis der benötigten Materialparameter für zuverlässige PV Module beitragen.

Zur Untersuchung des Einflusses variabler Vernetzungsgrade auf die Zuverlässigkeit von PV-Modulen wurden fünf beschleunigte Alterungstests an Mini-Modulen durchgeführt, darunter Damp-Heat (DH), kombinierte Damp-Heat-UV-Belastung (DH+UV, Abbildung 20), IEC63209-2 (UV-Bestrahlung und thermische Zyklen) mit zwei unterschiedlichen Lampenspektren, sowie Pressure-Cooker-Tests (PCT). Diese Testreihe zielte darauf ab, bekannte Fehlermechanismen gezielt zu beschleunigen und materialkritische Parameter für die Modulzuverlässigkeit zu identifizieren. Dabei zeigte sich, dass ausschließlich im verlängerten Damp-Heat-Test ein signifikanter Zusammenhang zwischen Vernetzungsgrad und Leistungsdegradation nachweisbar war (Abbildung 21). Bei den Tests DH+UV und PCT führten die extremen Temperaturen um 100 °C zu einer sehr starken Nachvernetzung, wodurch initiale Unterschiede in der Laminationsqualität kompensiert wurden, und der Einfluss des Vernetzungsgrads maskiert wurde (Abbildung 22). Im standardisierten Stresstest nach IEC 62309-2 (UV-Bestrahlung gefolgt von thermischen Zyklen) traten hingegen unabhängig vom Vernetzungsgrad kaum korrosive Zellschäden auf, was auf unzureichende Testintensität für die Auslösung vernetzungsgradspezifischer Fehlermechanismen hindeutet (Abbildung 23). Aus diesen Ergebnissen lassen sich wesentliche Erkenntnisse für zukünftige Zuverlässigkeitsbewertungen ableiten: Zum einen müssen Testtemperaturen deutlich unter 100 °C gehalten werden, um unerwünschte Materialveränderungen wie Re-Laminationseffekte zu mindern. Zum anderen erfordert die Isolierung vernetzungsgradbedingter Degradationsphänomene deutlich längere Testdauern, da kurzfristige Belastungen keine ausreichende Differenzierung ermöglichen. Dies unterstreicht, dass die Optimierung von Vernetzungsgraden insbesondere für die Langzeitstabilität unter feucht-warmen Umgebungsbedingungen entscheidend ist. Die gewonnenen Einsichten tragen maßgeblich zum verbesserten Verständnis materialkritischer Parameter bei und liefern eine fundierte Basis für die Entwicklung robusterer PV-Module.

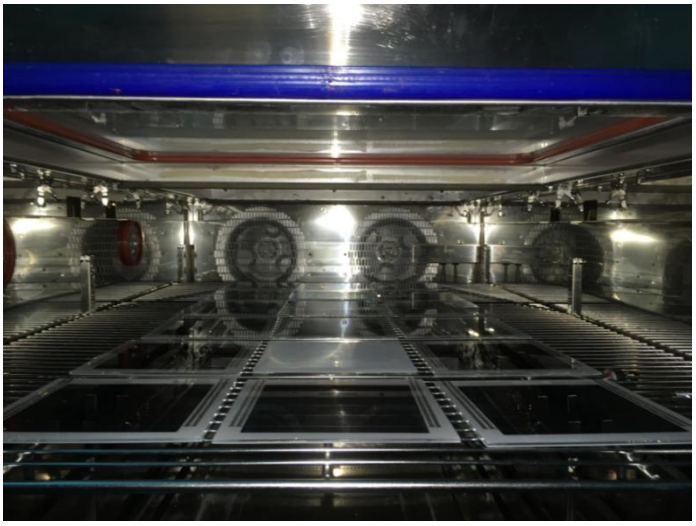


Abbildung 20 Gezeigt sind Minimodule in einer Damp-Heat-Kammer mit zusätzlicher UV-Bestrahlung.

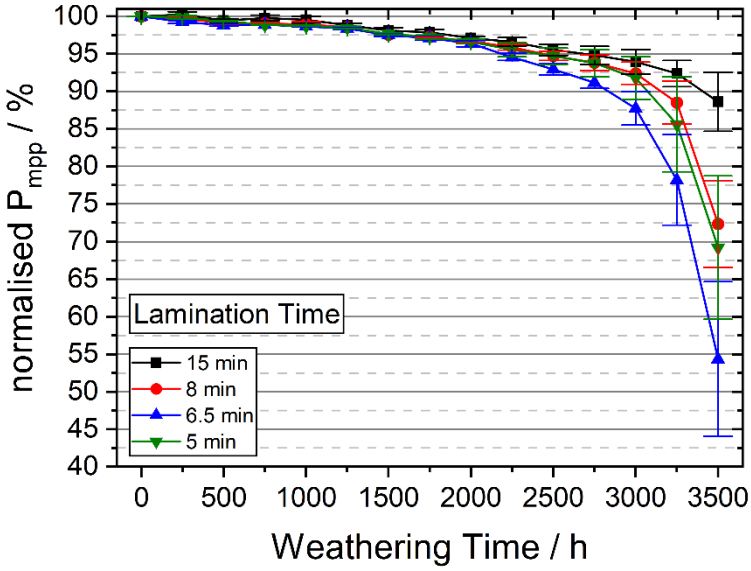


Abbildung 21: Normalisierter Mittelwert und Standardabweichung des maximalen Leistungspunktes von DH gealterten Mini-Modulen.

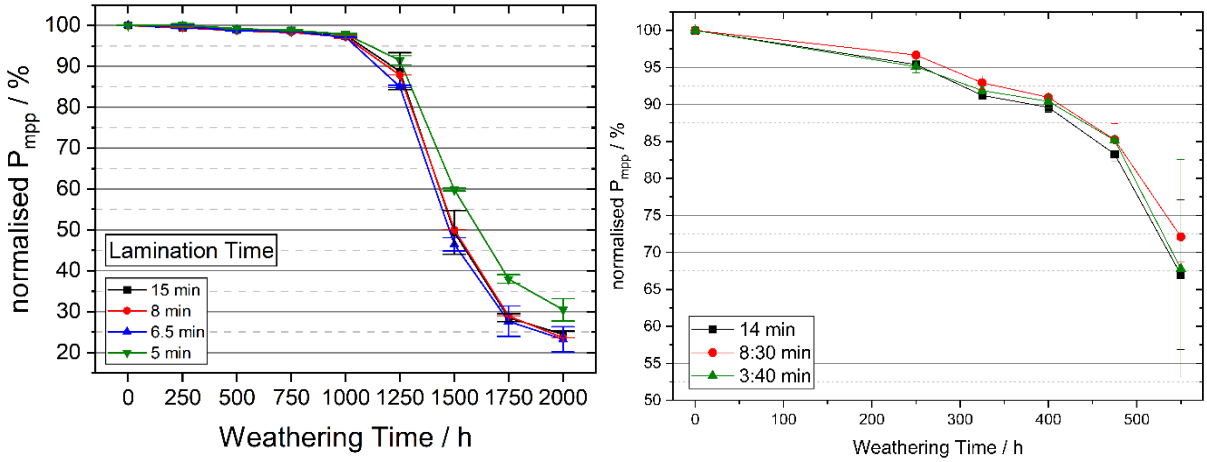


Abbildung 22: Normalisierter Mittelwert und Standardabweichung des maximalen Leistungspunktes von gealterten Mini-Modulen. Links: DH+UV, rechts: PCT.

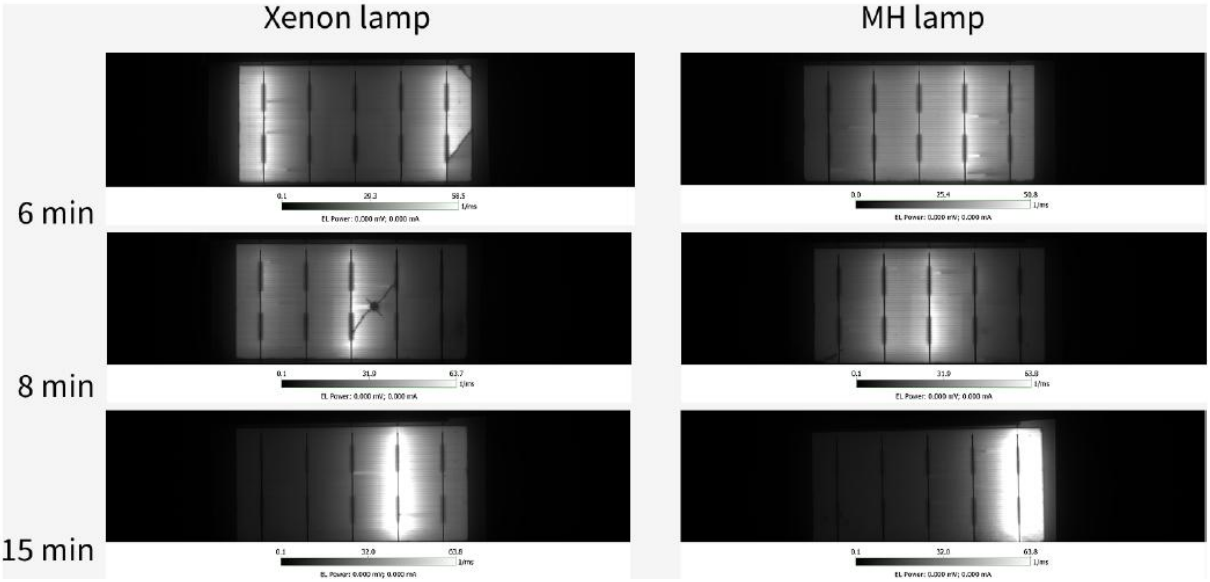


Abbildung 23: EL-Bilder von Mini-Module am Ende des IEC 63209-2 Zykluses. Links für die Bewitterung unter der Xenon-Lampe, Rechts bei Bewitterung unter der Metallhalid-Lampe. Und den Zeilen sind Module mit den Laminationszeiten von 6 min, 8 min, und 15 min gezeigt.

AP2.4d: Variabilität Additivierung in Folien und daraus folgende prozessbedingte Laminationsinhomogenitäten

> Es werden Proben in regelmäßigen Abständen aus Folien entnommen und an das CSP versandt, um mit GCMS und DSC vermessen zu werden. Es werden Prüfkörper aus benachbarten Foliensegmenten produziert, die die Variabilität der chemischen Zusammensetzung der Folie wider-spiegeln sollten. Die Prüfkörper werden mit X-Link charakterisiert, um die Laminationsqualität zu untersuchen.

Es wurden systematisch Proben aus kommerziellen Verkapselungs- und Rückseitenfolien entnommen, um mittels zerstörungsfreier und zerstörender Analytik (GCMS, DSC) die chemische Variabilität zu charakterisieren. Parallel wurden Prüfkörper aus benachbarten Foliensegmenten produziert und mit dem X-Link®-Verfahren analysiert, um den Einfluss chemischer Inhomogenitäten auf die Laminationsqualität zu untersuchen. Sunset und PI Berlin stellten kommerzielle EVA-Folien bereit, deren Additivvariabilität – insbesondere bei Vernetzern und Beschleunigern – im Fokus stand. Initiale DSC-Untersuchungen an EVA-Folien offenbarten signifikante Inhomogenitäten in der Vernetzerverteilung über die Folienrollen. Diese Variabilität erschwerte die Erzielung reproduzierbarer Vernetzungsgrade und verhinderte eine klare Korrelation zwischen Gelgehalt (Soxhlet-Extraktion) und X-Link®-Messwerten (LXM) in PV-Minimodulen (Abbildung 24). Zur vertieften Analyse wurde eine flächendeckende Probenentnahmestrategie umgesetzt: Über standardisierte Folienflächen (2 × 1 m²) wurden Rasterproben (Abbildung 25) für DSC und GCMS entnommen. Während DSC die kombinierte Vernetzer-Beschleuniger-Enthalpie über exotherme Peaks (100–200 °C) erfasste (Abbildung 26), ermöglichte GCMS eine separate Quantifizierung beider Komponenten nach abgeschlossener Methodenentwicklung. Das DSC-Mapping (Abbildung 27) identifizierte Gehaltsunterschiede bis zum Faktor 2 zwischen verschiedenen Folienbereichen. Ergänzend wurden kommerzielle Module (IBC Solar) untersucht. Ein kritischer Befund ergab sich aus dem Vergleich prä-laminierter DSC-Enthalpien mit post-laminiertem Gelgehalt: Trotz räumlicher Korrelation der Probenahmestellen (Abbildung 28) bestand keine signifikante Beziehung zwischen Vernetzungsenthalpie und Gelgehalt. Als Hauptursachen wurden identifiziert:

1. **Variables Vernetzer-Beschleuniger-Verhältnis**: Unterschiedliche Reaktionskinetiken kompensierten Gehaltsvariationen.
2. **Additivdiffusion während der Lamination**: Homogenisierungseffekte maskierten lokale Inhomogenitäten.

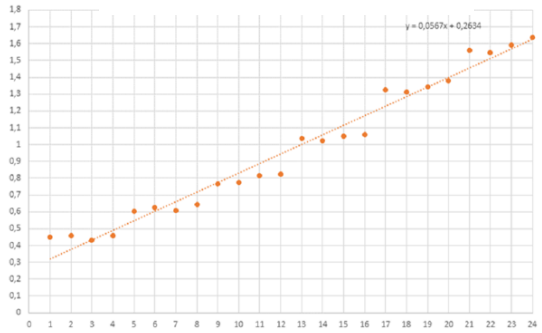
Zur Klärung etablierte das CSP eine Py-GCMS-Methode zur separaten Quantifizierung von Peroxiden (Vernetzern) und Beschleunigern. Referenzfolien mit definierten Additivgehalten bestätigten schließlich den direkten Zusammenhang zwischen chemischer Formulierung und Laminationsergebnis: Kontrollierte Variationen in Vernetzer- und Beschleunigeranteilen führten zu reproduzierbaren Unterschieden im Gelgehalt.

Schlussfolgerungen

Die Arbeiten demonstrierten, dass:

1. Chemische Inhomogenitäten in kommerziellen Folien (bis Faktor 2) die LXM-Messungen beeinflussen, jedoch nicht zwangsläufig den Vernetzungserfolg determinieren.1
2. Entscheidend ist auch das **Verhältnis von Vernetzer zu Beschleuniger** und nicht nur deren absolute Gehalte.
3. Die etablierte Py-GCMS-Methodik ermöglicht eine präzise Vorhersage der Laminationsqualität. Diese Erkenntnisse bilden die Grundlage für optimierte Qualitätskontrollverfahren in der Modulproduktion. Die Daten fließen in die Materialdatenbank ein, um zukünftig herstellerübergreifend Inhomogenitäten zu minimieren und die Langzeitzuverlässigkeit von PV-Modulen zu erhöhen.

Geringe Materialvariabilität



Erhöhte Materialvariabilität

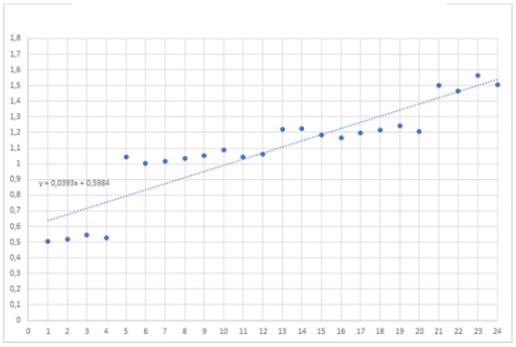


Abbildung 24: Korrelation von LXM-Messwerten vom X-Link-Verfahren mit Vernetzungsgrad aus der Soxhlet-Extraktion am Beispiel von PV-Minimodulen mit geringer (links) und erhöhter (rechts) Materialvariabilität.

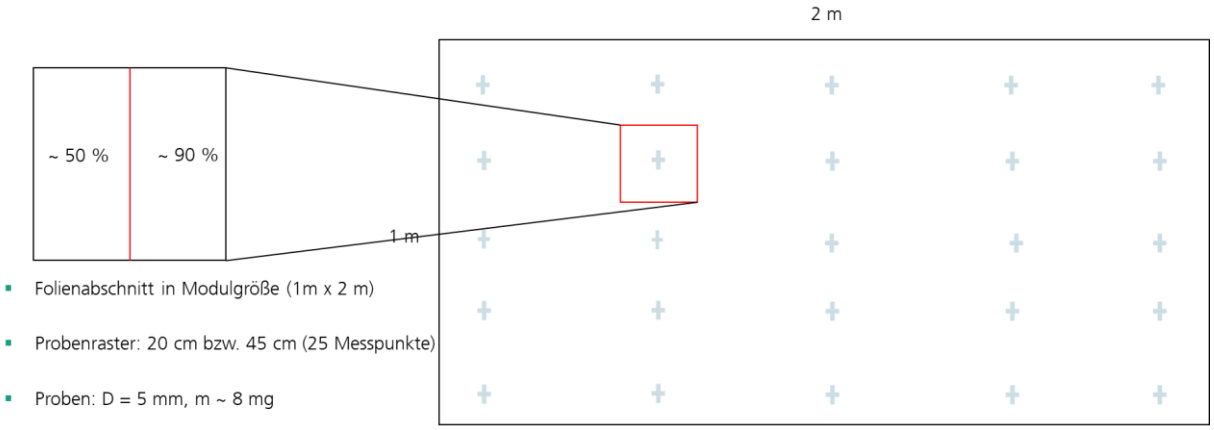


Abbildung 25 Beispiel der Probenentnahme fürs DSC-Mapping.

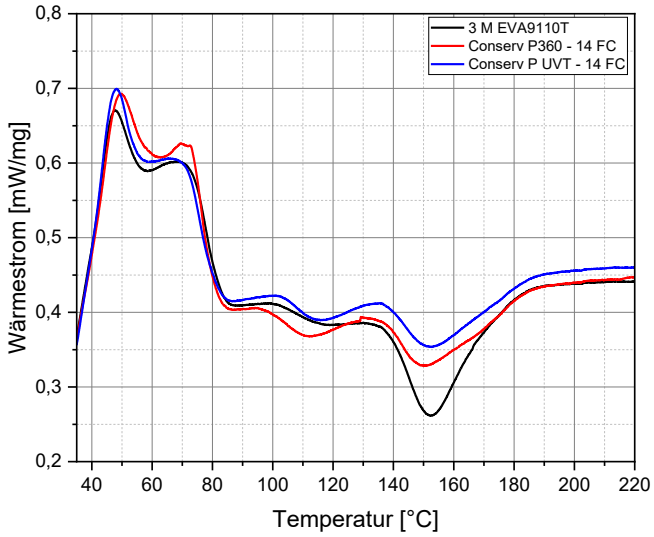


Abbildung 26 DSC-Kurven von 3 kommerziellen Verkapselungsfolien

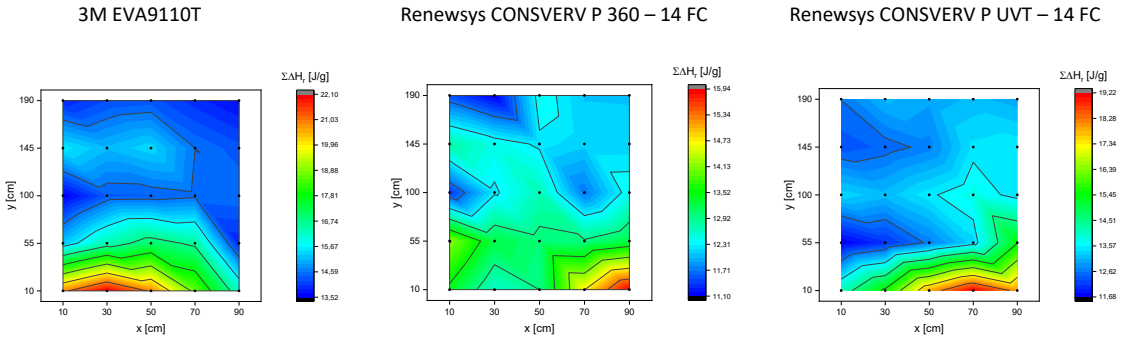


Abbildung 27 Vernetzerverteilung in 3 kommerziellen EVA-Folien, ermittelt mittels DSC-Mapping

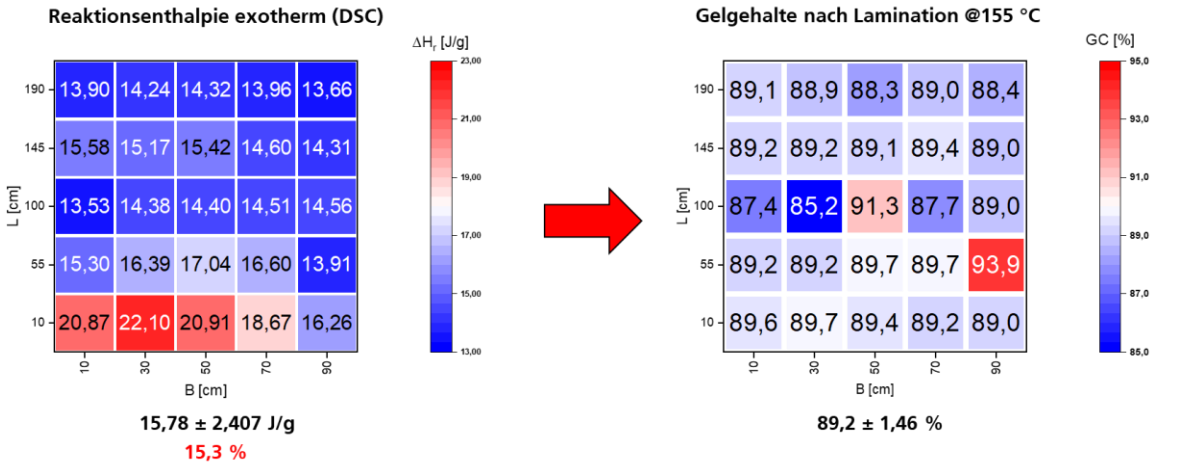


Abbildung 28: Einfluss der Folienvariabilität auf die Folienvernetzung, abgebildet in der Form vom Gelgehalt.

AP3: Optimierte Materialparameter für Langzeitzuverlässigkeit

AP3.1a: Bereich relevanter Materialparameter für zuverlässige Module, AP3.2b: Alterungstests & Bewertung (welcher Gelgehalt führt zum zuverlässigen PV-Modul) und AP3.2c: LXM-Korrelation nach Alterungsversuchen

> Es werden materialbasierte Untersuchungen zur Zuverlässigkeit durchgeführt. Es werden Standard-IEC Tests angewendet, um Materialeigenschaften mit der Zuverlässigkeit zu korrelieren. Des Weiteren werden Bewitterungstests entwickelt, um eine bessere Vorhersage der Lebensdauer zu erreichen. Hierzu werden von Partnern des CSP Feldrückläufer erstanden und untersucht. Für weitere Untersuchungen werden Tests in Bewitterungskammern entwickelt, die eine bessere Vorhersagbarkeit der Moduldegradation ermöglichen werden.

Gemäß der Aufgabenstellung wurden materialbasierte Zuverlässigkeitsuntersuchungen durchgeführt, bei denen standardisierte IEC-Tests zur Korrelation von Materialeigenschaften mit der Modulzuverlässigkeit eingesetzt wurden. Im Rahmen der verlängerten Damp-Heat-Bewitterung (DH) zeigte sich bei drei von vier Mini-Modulen eine signifikante Verringerung des Gelgehalts während des Testzeitraums (Abbildung 29). Diese Reduktion war jedoch nicht ausreichend, um den beobachteten, stärkeren Abfall der LXM-Werte vollständig zu erklären. Die Diskrepanz zwischen Gelgehaltsmessung und LXM-Wert-Rückgang lässt sich durch zusätzliche Degradationsphänomene der Rückseitenfolie erklären, die offenbar unabhängig von der Vernetzungsdichte der Verkapselungsfolie auftreten. Dieser Befund unterstreicht die Komplexität von Materialinteraktionen unter beschleunigten Alterungsbedingungen und liefert wichtige Inputs für die Weiterentwicklung der Bewitterungsprotokolle, um künftig realitätsnähere Lebensdauervorhersagen zu ermöglichen

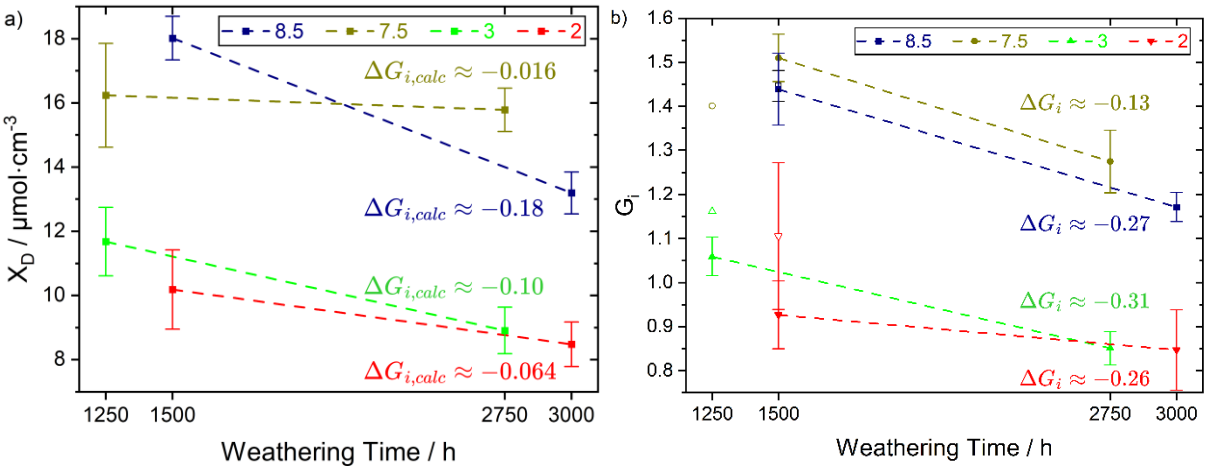


Abbildung 29: Verlauf von Vernetzungsdichte (Links) und LXM bzw. Gi-Werten Rechts während der DH-Bewitterung.

AP3.2b: Alterungstest & Bewertung

> Es werden Standard-IEC Alterungstests durchgeführt und der Leistungsverlust in Abhängigkeit von Gelgehalt durchgeführt. LXM wird genutzt um zerstörungsfrei die Veränderungen des Gelgehaltes mit verschiedenen Betriebsbedingungen/Umweltbedingungen abzuschätzen. Prüfkörper aus dem vorhergehenden AP werden genutzt, um eine Bewitterungssequenz zu entwickeln, welche basierend auf Multi-Stress-Alterung inklusive Beregnung eine verbesserte Lebensdauervorhersage ermöglicht und somit eine verbesserte und beschleunigte Bestimmung angemessener Gelgehalte in Modulen.

Gemäß der Aufgabenstellung wurden standardisierte IEC-Alterungstests durchgeführt, um den Zusammenhang zwischen Leistungsverlust und Gelgehalt systematisch zu analysieren. Dabei kam die zerstörungsfreie LXM-Methode zum Einsatz, um Veränderungen des Vernetzungsgrades unter verschiedenen Betriebs- und Umweltbedingungen zu erfassen. Prüfkörper aus vorangegangenen Arbeitspaketen wurden für die Entwicklung einer Multi-Stress-Bewitterungssequenz genutzt, die kombinierte Belastungen inklusive Beregnung integriert, um eine präzisere Vorhersage der Modullebensdauer zu ermöglichen und die Bestimmung optimaler Gelgehalte zu beschleunigen. Wie im Arbeitspaket AP2.3b dokumentiert, wurden fünf unterschiedliche Bewitterungstests durchgeführt, um den Einfluss des Vernetzungsgrades auf die Modulzuverlässigkeit zu untersuchen. Dabei zeigte sich ausschließlich im Damp-Heat-Test (DH) eine signifikante Abhängigkeit der Zuverlässigkeit vom Vernetzungsgrad: Ausgangswerte von 2%, 61%, 78% und 89% veränderten sich auf 79%, 85%, 87% bzw. 91%, was auf eine Homogenisierung der Vernetzungsstruktur unter feucht-warmen Bedingungen hindeutet. Beim beschleunigten Stress-Test nach IEC 63209-2 war zwar ein ähnlicher Trend zur Vernetzungserhöhung erkennbar, jedoch wiesen die Ergebnisse hier eine deutlich stärkere Streuung in Abhängigkeit von den Laminationsparametern auf. In den anderen 2 Stresstests war die Nachvernetzung so stark, dass keine Unterschiede messbar waren. Diese Beobachtungen unterstreichen die Notwendigkeit maßgeschneiderter Bewitterungssequenzen für zuverlässige Materialbewertungen und liefern wesentliche Inputs für die Weiterentwicklung der Lebensdauermodelle.

AP3.2c: LXM Korrelation nach Alterungsversuchen

Der Gelgehalt und damit auch der LXM Wert ändern sich während dem normalen Feldbetrieb. Um angemessene Werte für die Produktion zu erhalten, muss die Veränderung des Gelgehaltes im Betrieb bestimmt werden, um eine Interpretation des Gelgehaltes von Feldrückläufern zu ermöglichen. Hierzu werden unterschiedliche Standardtests genutzt, um die Sensitivität auf Temperatur bzw. Temperaturänderungen zu untersuchen.

Um die Veränderung des Gelgehalts und damit korrespondierender LXM-Werte während des Feldbetriebs zu charakterisieren – eine Grundvoraussetzung für die Interpretation von Feldrückläufern und die Ableitung produktspezifischer Richtwerte – wurden systematische Alterungstests unter variierten Temperatur- und Feuchtebedingungen durchgeführt. Im Damp-Heat-Test (DH) bei 85°C und 85% relativer Luftfeuchtigkeit zeigte sich bei 3500-stündiger Bewitterung von Mini-Modulen bereits nach 250 Stunden ein signifikanter Anstieg der LXM-Werte infolge von Nachvernetzungsprozessen (Abbildung 30). Die initialen Gelgehalte von 2%, 61%, 78% und 89% erhöhten sich dabei auf 79%, 85%, 87% bzw. 91%. Gegen Ende der Bewitterung ab ca. 2500 h sanken die LXM-Werte. Das liegt sowohl an einer Verringerung des Vernetzungsgrades als auch an der Alterung der Rückseitenfolie. Beide Effekte führen zur Minderung der LXM-Werte, wie es in AP3.1a beschrieben wurde.

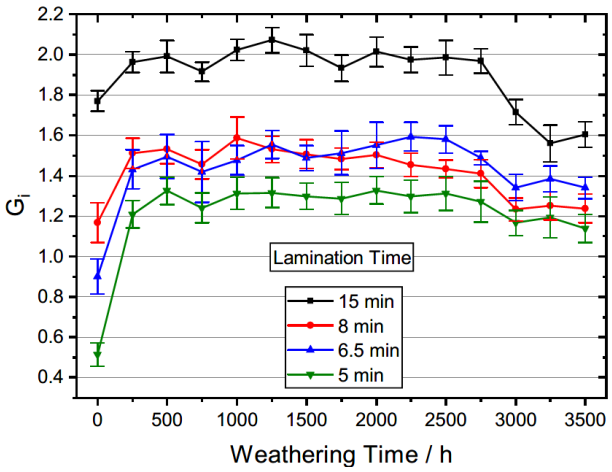


Abbildung 30: LXM- bzw. G^i-Werte von Mini-Modulen die 3500 h unter standard DH-Bedingungen bewittert wurden.

Beim Stress-Test nach IEC 63209-2 war eine ähnliche Nachvernetzung feststellbar, allerdings mit deutlich stärkerer Streuung zwischen den Mini-Modulen (Abbildung 31). Diese Streuung wird auf eine erhöhte Materialheterogenität in den Verkapselungsfolien zurückgeführt. Bemerkenswerterweise trat in diesem Test keine messbare Zellkorrosion auf, sodass kein Zusammenhang mit den Laminationsbedingungen hergestellt werden konnte. Gegen Ende der Bewitterung ist nur bei den Mini-Modulen, die mit der Metallhalid-Lampe bewittert wurden, ein leichter Abfall der LXM-Werte zu beobachten. Dieser ist jedoch geringer als bei DH. Mini-Module, die unter der Xenon-Lampe bewittert wurden, zeigen gegen Ende der Bewitterung keinen Abfall der LXM-Werte.

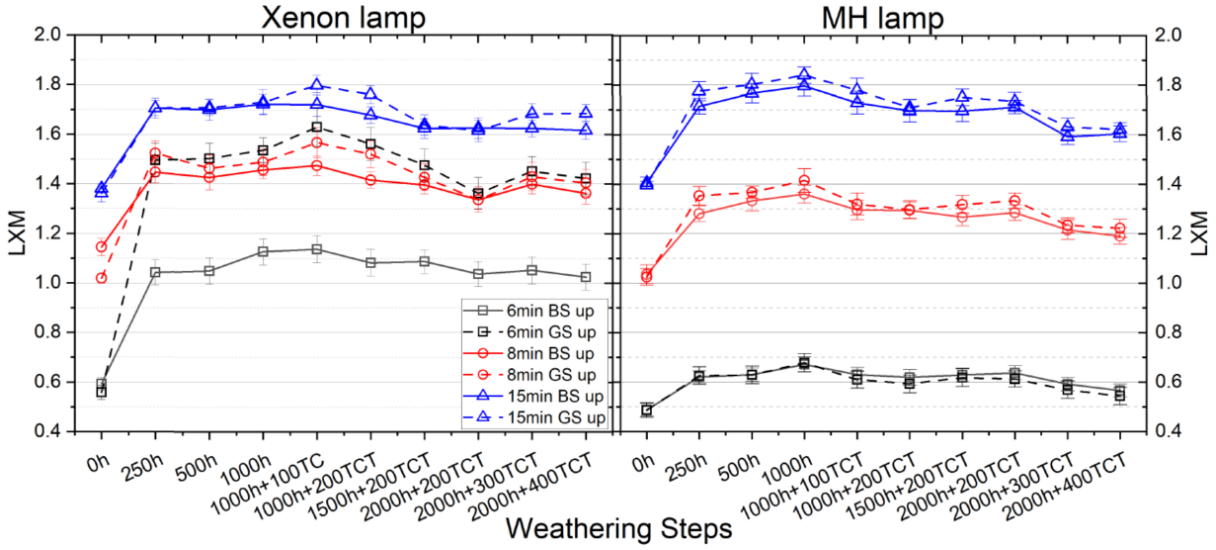


Abbildung 31: LXM-Werte nach der IEC 63209-2 Bewitterung. Links Alterung unter der Xenon-Lampe, rechts Alterung unter der Metallhalid-Lampe.

Unter extremen Bedingungen wie im kombinierten Damp-Heat-UV-Test (DHUV) und im Pressure-Cooker-Test (105°C, 100% r.F.) wurden anfängliche Gelgehaltsunterschiede bereits im ersten Bewitterungsabschnitt nivelliert (Abbildung 32). Anschließend führte die Degradation der Rückseitenfolien zu einem drastischen Abfall der LXM-Werte. Dieser Rückgang suggeriert fälschlich einen Verlust des Gelgehalts – ein kritischer Effekt, da die LXM-Gelgehalt-Kalibrierung ausschließlich für unbewitterte Proben validiert ist. Bei Feldrückläufern liegen solche Referenzdaten typischerweise nicht vor. Die Ergebnisse sind auf reale Feldbedingungen übertragbar. Die Frühphasen-Nachvernetzung kann initial unzureichende Gelgehalte nach der Lamination kaschieren. Dennoch ermöglicht der Vergleich relativer LXM-Werte zwischen verschiedenen Modulen im Feld die frühzeitige Identifikation von Laminationsfehlern, da charakteristische Unterschiede trotz nachträglicher Vernetzung erkennbar bleiben. Die Backsheet-Degradation verfälscht LXM-Messungen im fortgeschrittenen Betrieb, was bei der Analyse von Feldrückläufern berücksichtigt werden muss. Diese Erkenntnisse bilden eine wesentliche Grundlage für die Bewertung von Feldrückläufern und die Optimierung von Produktionsparametern, indem sie temperaturbedingte Materialveränderungen quantifizieren und Grenzen der zerstörungsfreien Messtechnik aufzeigen.

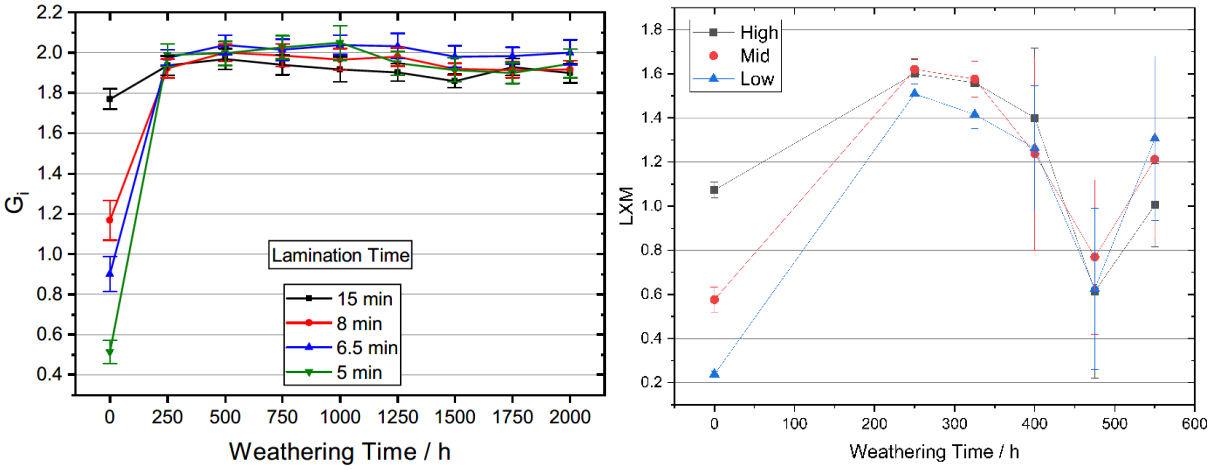


Abbildung 32: G_i-, bzw. LXM-Werte von bewitterten Mini-Modulen. Links: DH+UV, rechts: PCT.

AP3.2d: Untersuchungen von Feldrückläufern

> Es werden Feldrückläufer mit Folienproblemen von Partnern des CSP genutzt, welche auf Gelgehalt und Additivierung der Verkapselungs-folien untersucht werden. Die Daten werden in die Projektdatenbank hochgeladen und stehen für die Nutzung in der Simulation der Alterung zur Verfügung. Die LXM-Methode wird hier angewendet und weitere Messungen durchgeführt, um die Genauigkeit der X Link-Methode jenseits der Produktionsumgebung zu untersuchen und verifizieren.

Das CSP-Team analysierte Feldrückläufer von Projektpartnern, darunter ein von IBC Solar bereitgestelltes PV-Modul mit 18-jähriger Feldexposition (Abbildung 33). Dieses Modul wies einen deutlichen Gradienten in der Elektrolumineszenz (EL)-Intensität auf, der auf inhomogene Degradationsprozesse hindeutete. LayTec führte X-Link-Messungen (LXM) an diesem Feldmodul durch. Dabei zeigte sich eine schwache, aber signifikante Korrelation zwischen den LXM-Werten und der EL-Intensität (Abbildung 34). Regionen mit veränderter Vernetzungsdichte korrespondierten mit abweichender Lumineszenzleistung (Abbildung 35). Dieser Befund liefert erstmals empirische Hinweise darauf, dass langfristige Degradationsmuster im Feld mit materialbasierten Vernetzungsparametern zusammenhängen können.

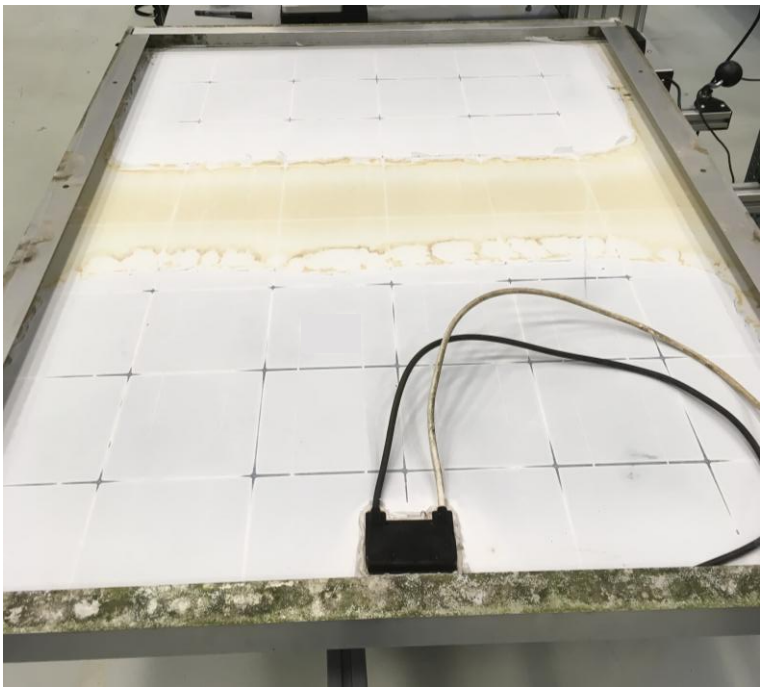


Abbildung 33: Rückseite des PV-Modules, welches 18 Jahre in Betrieb war.

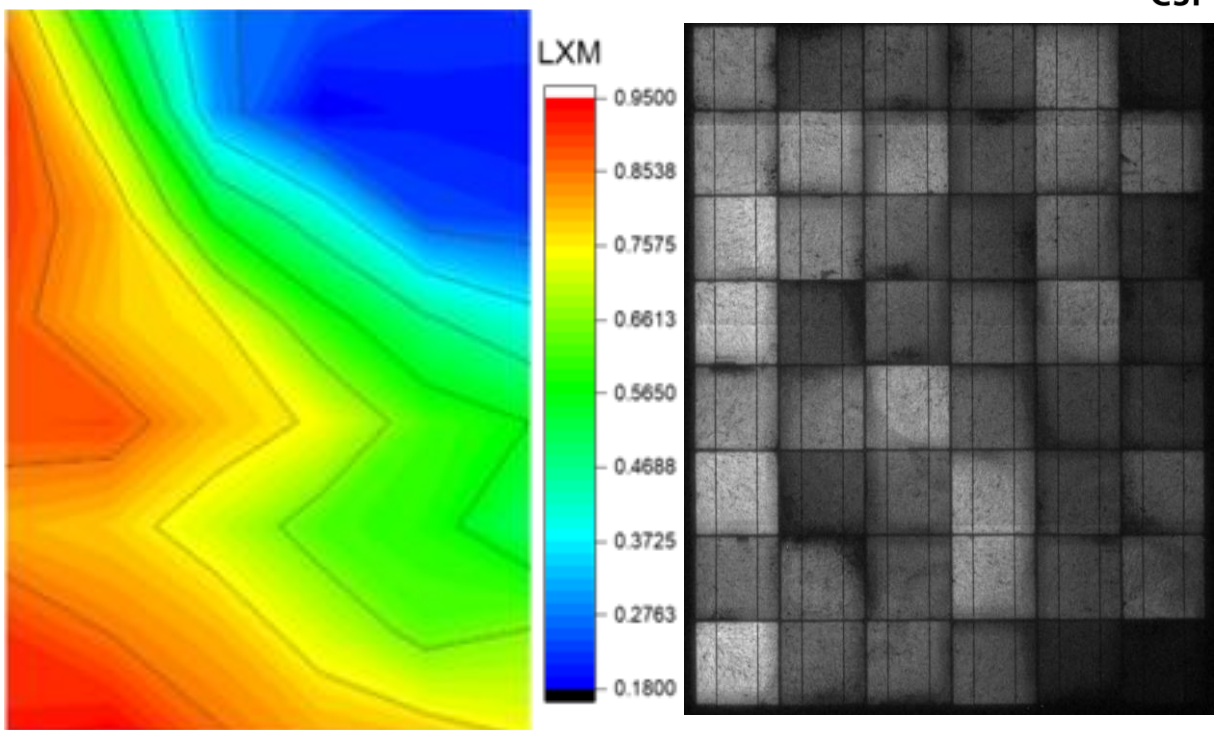


Abbildung 34: PV-Modul, welches 18 Jahre lang in Betrieb war. Links: Mapping der Rückseite. Rechts: EL-Bild.

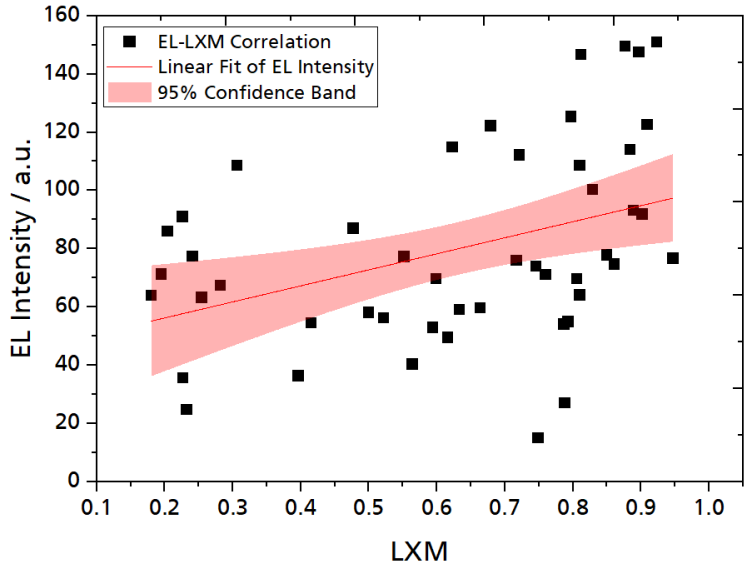


Abbildung 35: Korrelation der EL-Intensität mit den LXM-Werten aus Abbildung 34.

AP3.3a: Korrelation von Folienmaterial & Laminationsbedingungen

Das CSP nutzt hier die existierende Methode zur Extraktion eines chemischen Fingerabdrucks. Diese dient dazu, die chemische Zusammensetzung von Folien unbekannter Hersteller zu bewerten. Zusätzlich werden hier speziell gefertigte Prüfkörper verschiedenen Umweltstressen ausgesetzt und die Material- und Leistungsveränderungen während dieser Zeit untersucht. Die Daten werden in die Projektdatenbank eingespeist und dienen als Grundlage für die Laminations- und Prozessoptimierung.

Gemäß der Aufgabenstellung nutzte das CSP die etablierte Methode des chemischen Fingerabdrucks zur Bewertung der chemischen Zusammensetzung von Folien unbekannter Hersteller. Parallel wurden speziell gefertigte Prüfkörper definierten Umweltbelastungen ausgesetzt, wobei Material- und Leistungsparameter systematisch erfasst wurden. Die gewonnenen Daten wurden in die Projektdatenbank integriert und bilden die Grundlage für die Optimierung von Laminationsprozessen. Konkret erfolgte an den aus AP2.3b stammenden, bewitterten Modulen eine umfassende chemische Charakterisierung. Diese umfasste die Bestimmung von Gelgehalt und Vernetzungsdichte, ergänzt durch FTIR- und Raman-Spektroskopie zur Analyse molekularer Veränderungen sowie GCMS-Messungen zur Identifikation von Additivrückständen. Die Auswertung ergab, dass ausschließlich nach verlängerter Damp-Heat-Bewitterung ein signifikanter Einfluss des initialen Vernetzungsgrades auf die Modulzuverlässigkeit nachweisbar war. Zur gezielten Verbesserung der Laminationsqualität wurden gemäß den Vorgaben aus AP2.4d Referenzfolien mit definierten Eigenschaften hergestellt. Diese Referenzmaterialien ermöglichen die Kalibrierung von Prozessparametern und tragen so unmittelbar zur Steigerung der Produktzuverlässigkeit bei.

AP4: Industrie 4.0 Ansatz für Laminationsoptimierung

AP4.1c: Korrelation Folienqualität, Prozessführung und Prozessergebnis (CSP)

> Im Rahmen von AP3 wird von Sunset die Methodik für das Erzielen vorbestimmter Vernetzungsgrade für bekannte Folien entwickelt. Die Daten dieser Entwicklung werden als Grundlage genutzt, um ein Prozessergebnis (=Vernetzungsgrad) vorauszusagen und eine kontinuierliche Prozessführung zu ermöglichen. Speziell die Additivierung mit Vernetzungsbeschleunigern muss berücksichtigt werden sowie die thermische Kapazität des Laminats, um die Aufheizungsgeschwindigkeit des Polymers voraussagen zu können. Die Geschwindigkeit der thermischen Rampe in der Laminierung und auch die Genauigkeit der Kontrolle bestimmen, ob hier punktuell zu viel Energie zugeführt wird und somit eine Überheizung zustande kommen kann.

Gemäß der Aufgabenstellung entwickelte Sunset im Rahmen von AP3 eine eigenständige Methodik zur gezielten Einstellung vorbestimmter Vernetzungsgrade für bekannte Folientypen. Die hierbei generierten Prozessdaten bilden die Grundlage für die Vorhersage des Vernetzungsgrades und ermöglichen eine kontinuierliche Prozessführung. Das CSP unterstütze die Arbeiten mithilfe von DSC-Messungen zur Ermittlung der optimalen Prozesstemperatur (Abbildung 36). Ergänzend erwies sich die X-Link-Methode als Schlüsseltechnologie für eine kontinuierliche, zerstörungsfreie Prozesskontrolle. Durch zeitnahe Messungen des Vernetzungsgrads können Prozessparameter unmittelbar angepasst werden, sobald Abweichungen von den Sollwerten auftreten.

Das CSP konnte durch zerstörende GCMS-Analysen einen klaren Zusammenhang zwischen der Konzentration von Vernetzungsadditiven und dem resultierenden Gelgehalt nachweisen. Für die erforderliche schnelle und flächendeckende Messung von Folienadditivierungen zur Anpassung der Prozessbedingungen ist die Pyrolyse-GCMS-Methode hingegen ungeeignet, da sie weder zerstörungsfrei noch in Echtzeit durchführbar ist.

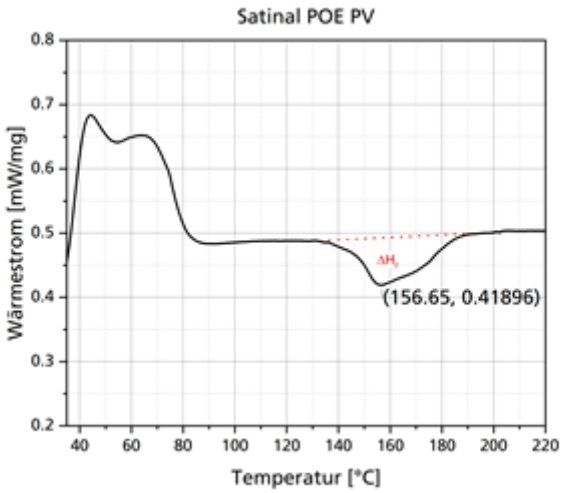


Abbildung 36: DSC-Daten einer POE-Verkapselungsfolie von Fa. Satinal.

AP4.3a: Prozessoptimierung

> Dieser Arbeitsschritt dient unter anderem dazu, die Ergebnisse der anderen Arbeitsschritte in diesem AP in eine Form zu bringen, die der Industrie weiterhilft. Die individuellen Ergebnisse wären zu vertraulich, um diese z.B. zu veröffentlichen. Die Daten der Voruntersuchungen werden hier zu einer quantitativen finanziellen Risikoanalyse verwendet. Dieses finanzielle Risiko ist der KPI oder Optimierungsparameter für eine Prozessoptimierung. Die realen Prozessdaten werden hier nur als Grundlage für die Bewertung genommen, alle öffentlichen Bewertungen verwenden nur zu erwartende Größenordnungen, ohne Hinweis auf die genauen Werte, die in dem Projekt erarbeitet werden. Die erarbeitete Zahlengrundlage erlaubt eine spezifische Prozessoptimierung zur Unterstützung der Projektarbeiten. Die Prinzipien und der Optimierungsprozess werden jedoch auch außerhalb des Konsortiums zugänglich sein, unter Beachtung der vertraulichen Daten der Projektpartner.

Die Gefahren der Reduzierung der Laminationszeit, welche zur Moduldegradationsbeschleunigung führen können und welche bei der DH und UV/TC-Bewitterung beobachtet wurden, können somit für das untersuchte Modul-BOM verallgemeinert und bei der Freibewitterung erwartet werden. Die Ergebnisse wurden sowohl innerhalb vom Projektkonsortium als auch an die Öffentlichkeit in den Konferenzbeiträgen (EUPVSEC, IEEE PVSC) kommuniziert.

AP5: Qualitätssicherung im Systembau

AP5.4: EPC Qualitätsverifizierung

Die Wareneingangskontrolle wird in einem vorherigen Arbeitsschritt untersucht. Hier werden der Energieertrag und die Kosten der Betriebsführung der untersuchten Module bewertet, mit der Erwartung, einen messbaren Unterschied zu identifizieren. Es kann sein, dass eine zuverlässige Quantifizierung schwierig ist, da Folienprobleme typischerweise erst nach 5-7 Jahren wirklich sichtbar werden und der Energieertrag sogar noch länger braucht. Daher wird als Plan B angestrebt, das Portfolio von ABO zu bewerten und Systeme mit Folienauffälligkeiten zu identifizieren. In dem Moment, in dem Folienauffälligkeiten beobachtet werden, entstehen auch Mehrkosten, da diese Auffälligkeiten bewertet werden müssen. Es wird bewertet, ob diese Auffälligkeiten von der hier entwickelten QC hätten verhindert werden können. Dies erlaubt somit eine Bewertung des Verfahrens insgesamt.

Unterschiedliche BOMs von IBC Solar wurden vor Ort mittels dem von LayTec installierten X Link vermessen. Die Messungen wurden zur Bestimmung der Tool-to-Tool-Reproduzierbarkeit auch von Laytec mit ihrem Gerät sowie vom CSP vermessen (Round-Robin). Die gewonnen Daten wurden ortsaufgelöst verglichen. Die Werte können später zum Nachvollziehen der Degradation herangezogen werden. Die Materialien wurden außerdem mittels NIR vermessen. Die NIR-Daten werden in die Materialdatenbank aufgenommen, was die Materialerkennungsvorgang verbessern kann.

Anhang

Es wurde eine Laminationsserie mit verschiedenen Vernetzungsgraden hergestellt und mittels Soxhlet-Extraktion, Quellversuche (Abbildung 37) und NMR-Spektroskopie vermessen. Die Soxhlet-Extraktion erfolgte mit Toluol für 24 h und anschließender Trocknung bei 110 °C. Die Quellversuche wurden einmal bei Raumtemperatur und einmal bei 80 °C in Toluol für jeweils 24 h durchgeführt. Nach 24 h wurde das gequollene Polymer gewogen und anschließend bei 110 °C getrocknet. Zum Trocknen wurden die gequollenen Polymere sowie die Extraktionshülsen vier Stunden bei Raumtemperatur gelüftet und anschließend bei 110 °C für 14 h getrocknet. Aus vorrangegangenen Messungen hat sich diese Trocknungszeit als ausreichend erwiesen, da sich die Masse nicht mehr ändert. In Abbildung 38 sind die gemessenen Vernetzungsgrade (Gelgehalte) gegen die Laminationszeit aufgetragen. Aus dem gequollenen Polymer lässt sich nach der Flory-Rehner-Theorie eine Vernetzungsdichte bestimmen. Diese ist in Abbildung 39 gegen den jeweils gemessenen Vernetzungsgrad nach der Extraktion bei 30°C und 80°C aufgetragen. Man sieht in Abbildung 39, dass die Vernetzungsgrad- und Vernetzungsdichte-Werte bei 30°C Extraktion größer als bei 80°C Extraktion sind. Die höheren Vernetzungsgrad- und zum Teil auch Vernetzungsdichte-Werte können mit geringerer Extraktionseffizienz erklärt werden. Die Extraktion bei 30°C ist daher mit systematischen Fehlern gegenüber Soxhlet-Werten verbunden. Die Vernetzungsdichte-Werte bei 80°C Extraktion wurden jeweils proportional zum höheren Vernetzungsgrad bei 30°C Extraktion korregiert, aber die Korrektur war trotzdem nicht ausreichend, um dieselben Werte wie bei 30°C Extraktion zu erhalten. Das deutet darauf hin, dass die unvernetzten, löslichen, aber noch in der Probe befindlichen Polymermoleküle zur Vernetzungsdichte mindestens temporär beitragen können. Das wird durch Verschlaufungen der Polymerketten erreicht.

Der Vorteil der Quellversuche gegenüber Soxhlet liegt in zusätzlich gelieferten strukturellen Informationen, höherer Empfindlichkeit bei hohen Vernetzungsgraden und kleineren Probenmengen, was Messungen mit erhöhter Ortsauflösung und nachhaltigeren Umgang mit organischem Lösungsmittel (10 ml statt 200 ml pro Probe) ermöglicht.

Des Weiteren wurden NMR-Experimente bei 80 °C in einem Benchtop-Spektrometer mit niedriger Magnetfeldstärke und niedriger Auflösung durchgeführt. Mit Hilfe eines speziellen Programms (CPMG-RF-Pulssequenz) lässt sich die transversale Relaxationszeit T_2 bestimmen. Diese kann als Maß für die Beweglichkeit der Moleküle gesehen werden in nimmt ab mit sinkender Beweglichkeit. Abbildung 9 zeigt, wie sich T_2 mit der Laminationszeit (und in Abbildung 10 gegen den Gelgehalt) verringert. Es gibt zwei T_2-Zeiten, einmal für Netzwerkketten und einmal gemittelt für Netzwerkketten und

Netzwerkdefekte (Kettenende, Schleifen), beide empfindlich gegenüber der Laminationszeit und Netzwerkstruktur.

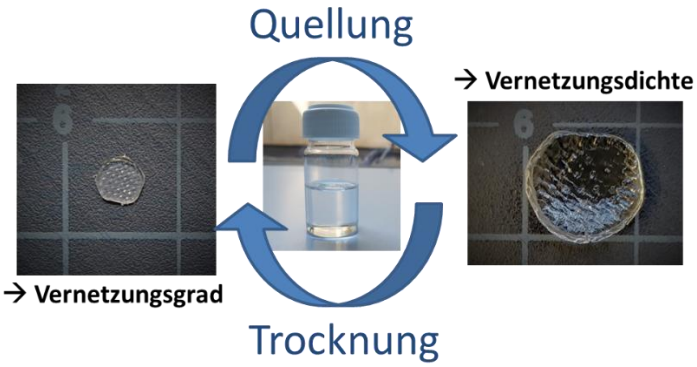
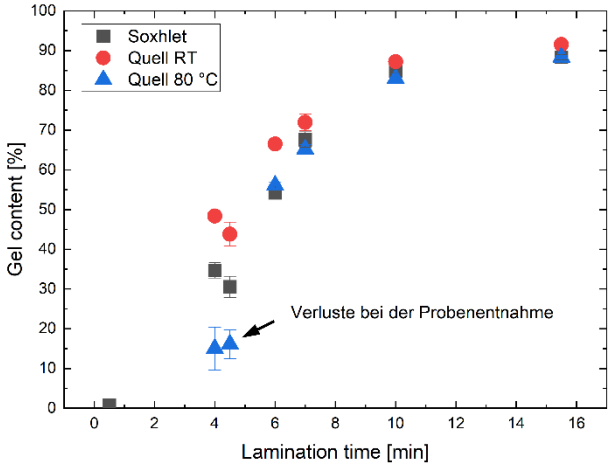


Abbildung 37: Schematische Darstellung des Quellversuches mit Angabe der ermittelten Parameter



,

Abbildung 38: Die gemessene Gelgehalte mittels Soxhlet und aus Quellversuchen bei Raumtemperatur (RT) und bei 80 °C für 24 h und in Toluol.

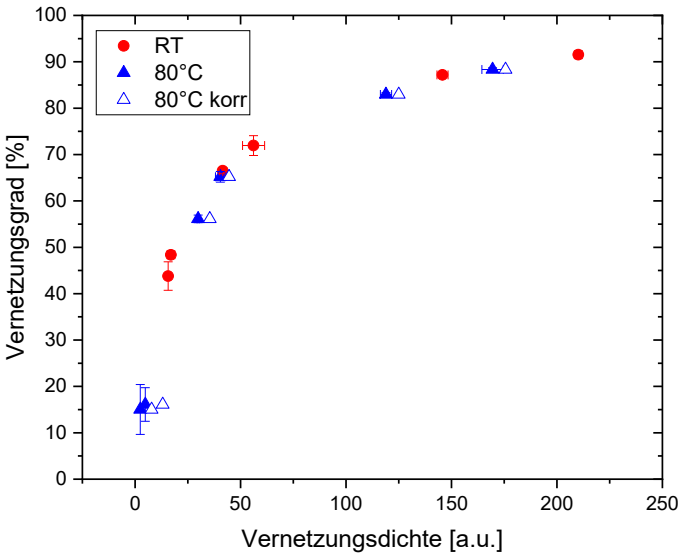


Abbildung 39: Ergebnisse der Quellversuche bei RT und 80°C: Vernetzungsdichte als Funktion des Vernetzungsgrads.

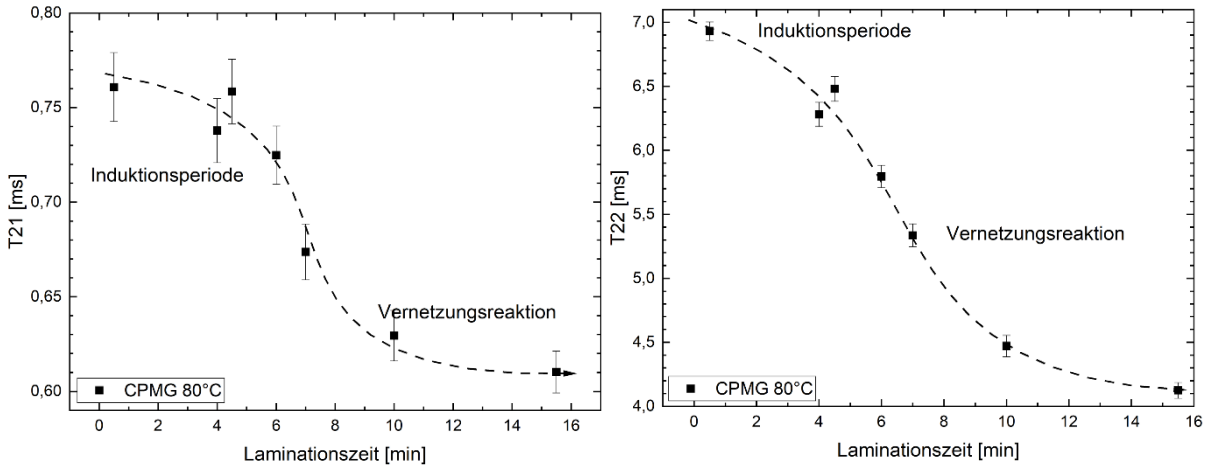


Abbildung 40: NMR-Ergebnisse: Die transversale Relaxationszeit T_2 unterschiedlich lang laminierter EVA-Folien als Funktion der Laminationszeit, gemessen bei 80 °C.

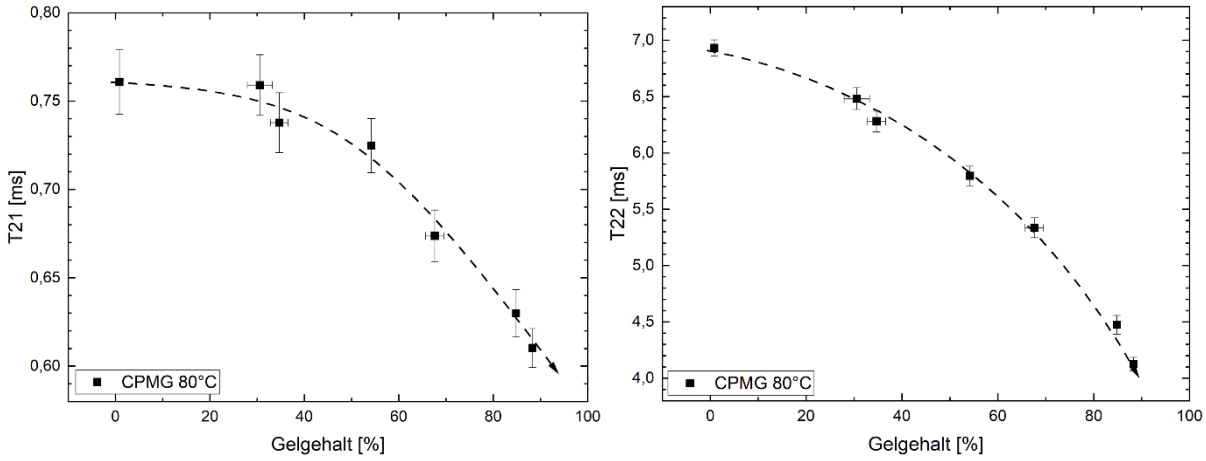


Abbildung 41: NMR-Ergebnisse: Transversale Relaxationszeit T_2 verschieden lang laminierter EVA-Folien als Funktion des Gelhalts, gemessen bei 80°C. Der Gelgehalt wurde via Soxhletextraktion bestimmt.

Meilensteine

Tabelle 6 Meilensteine

NR.	Beschreibung	Termin lfd. Projektmonat
AP1 Material- und BOM-Identifikation		
M1.1	Projektdatenbank für Materialcharakteristiken erstellt	12
	Eine Projektdatenbank wurde angelegt. Damit ist Meilenstein M1.1 erfüllt.	
M1.2	Abschätzung mikromechanischer Eigenschaften der verschiedenen Folienstrukturen durchgeführt	12
	Es wurde unterschiedliche Verkapselungsmaterialien und Rückseitenfolien mittels DMA und Rheometer gemessen. Dazu gehören auch Rückseitenfolien mit mehreren Schichten. Mittels FEM-Simulation wurden die Eigenschaften abgeschätzt und können für neue Folienstrukturen abgeschätzt werden. Damit ist M1.2 erfüllt.	
M1.3	Messung der Folienvariabilität in der Produktion durchgeführt	18
	Es wurden kommerzielle Verkapselungsmaterialien auf deren Heterogenität überprüft. Damit ist M1.3 erfüllt.	

M1.4	Identifikation eines ‚Fingerabdrucks' der Polymerkombinationen des PV-Laminates durchgeführt	24
	Mittels GCMS, FTIR, DSC und TGA wurden unterschiedliche Verkapselungsmaterialien und Rückseitenfolien charakterisiert. Damit ist M1.4 erfüllt.	
M1.5	Datenbank mit bekannten BOMs und zugehörigen Fingerabdrücken erstellt	36
	Die gemessenen Daten wurden in die Datenbank integriert. Damit ist M1.5 erfüllt.	
AP2 Untersuchungen zur Vernetzungsgradbestimmung		
M2.1	FEM-basierter Digitaler Zwilling des X-Link Verfahrens entwickelt	18
	Ein FEM-basierter digitaler Zwilling des X-Link Verfahren wurde entwickelt. Damit ist M2.1 erfüllt	
AP3 Optimierte Materialparameter für Langzeitzuverlässigkeit		
M3.1	Definition eines akzeptablen LXM Wertes oder Vernetzungsgrad gemacht	24
	Mit den künstlichen Bewitterung wurde ein akzeptabler LXM-Wert ermittelt. Damit ist M3.1 erfüllt.	
M3.2	Daten zur Alterung und Bewitterung in Projektdatenbank gesammelt	29
AP4 Industrie 4.0 Ansatz für Laminationsoptimierung		
M4.1	Konzept für kontinuierliche Prozessführung herausgearbeitet	36
M4.2	Richtlinien kostenoptimierte Qualitätssicherung der Lamination erstellt	36

7. Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Dieser Nachweis wird durch die Fraunhofer Zentralverwaltung in München erbracht.

8. 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.

9. 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.

10. 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.

11. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Konferenzbeiträge:

1. Non-destructive monitoring of mechanical and chemical changes in PV-mini-modules produced using variable lamination times (Nachwuchswissenschaftlerkonferenz, 2023)
    a. Beteiligte Partner: CSP (X Link®-Messungen, Modulbau, Polymeranalytik, Bewitterung), HSA (optische Messungen und Auswertung)

2. Computational Simulation and Experimental Verification of Non-Destructive Testing of Encapsulant Cross-Linking in Photovoltaic Modules (EUPVSEC, 2023)

    a. Beteiligte Partner: LayTec (technische Unterstützung, Paperschreiben), CSP (FEM-Simulationen, Messungen der Materialparameter)

3. 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 (EUPVSEC, 2023)

a. Beteiligte Partner: LayTec (X Link®-Messungen, Paperschreiben), Sunset (X Link®- und Soxhlet-Messungen, Modulbau), PI Berlin (Soxhlet-Messungen), IBC Solar (Bereitstellung der Benchmark-Module), CSP (X Link®- und Soxhlet-Messungen, Modulbau)

4. Non-destructive monitoring of mechanical and chemical changes in PV-mini-modules produced using variable lamination times (EUPVSEC, 2023)

a. Beteiligte Partner: CSP (X Link®-Messungen, Modulbau, Polymeranalytik, Bewitterung), HSA (optische Messungen und Auswertung)

5. Challenges for Quality Control Posed by New PV Encapsulation Materials (EUPVSEC, 2023)

a. Beteiligte Partner: PI Berlin (Messungen, Auswertung, Präsentation), CSP (Polymeranalytik, Bewitterung)

6. Neue Einblicke in den Zusammenhang von unzureichender Lamination mit der Modulzuverlässigkeit (PV Symposium, 2024)

a. Beteiligte Partner: CSP (X Link®-Messungen, Modulbau, Polymeranalytik, Bewitterung), HSA (optische Messungen und Auswertung)

7. Probing effects of the lamination time on module reliability using new variations of the sequential UV/TC stress testing (IEEE PVSC, 2024)

a. Beteiligte Partner: CSP und HSA

8. Backsheets-Degradation according to sequential UV/TC-Tests on module level (HI ERN Backsheet Workshop, 2025)

a. Beteiligte Partner: CSP und HSA

Veröffentlichungen:

9. Probing Effects of the Lamination Time on Module Reliability Using New Variations of the Sequential UV/TC Stress Testing (2024 IEEE 52nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), DOI: 10.1109/PVSC57443.2024.10748786)
   a. Beteiligte Partner: CSP und HSA
10. Crosslinking Behavior of Ethylene-Vinyl Acetate Copolymer Encapsulants in Dependence of the Additive Composition (Progress in Photovoltaics, 10.1002/pip.3849)
   a. Beteiligte Partner: CSP
11. Update of quality control tests for new PV encapsulation materials (EPJ Photovoltaics, 10.1051/epjpv/2024006)
   a. Beteiligte Partner: PIB und CSP
12. Non-Destructive Monitoring of Polymer Degradation in PV Modules by CSRM and implications for the PV Module reliability (Veröffentlichung steht aus)
   a. Beteiligte Partner: CSP und HSA

Anlage |BERICHTSBLATT

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Abschlussbericht des Verbundvorhabens: EVAplus - Erhöhung von Versorgungsicherheit, Anlagenperformance und Produktivität durch lebensdauerrelevante Untersuchungen der Stabilität der Modulverkapselung von PV-Modulen; Teilvorhaben: Materialzuverlässigkeit von EVA in realistischen Feldbedingungen	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Wessel, Patrick; Mordvinkin, Anton;	5. Abschlussdatum des Vorhabens 28.02.2025
	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation Abschlussbericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Fraunhofer - Center für Silizium-Photovoltaik Otto-Eißfeldt-Str. 12 06120 Halle (Saale)	9. Ber. Nr. Durchführende Institution 025/2025
	10. Förderkennzeichen 03EE1112B
	11. Seitenzahl 43
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Projektträger Jülich Energiesystem: Erneuerbare Energien (ESE) Photovoltaik ESE 1 Forschungszentrum Jülich GmbH 52425 Jülich	13. Literaturangaben -
	14. Tabellen 6
	15. Abbildungen 41
16. Zusätzliche Angaben -	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Projektträger Jülich, Forschungszentrum Jülich GmbH, Deutschland 29.08.2025	

18. Kurzfassung

AP1: Für die smarte Qualitätskontrolle der Lamination wurden Methoden entwickelt, um Vernetzungsgrad und Vernetzungsbeschleuniger-Gehalt in EVA-Folien präzise zu erfassen. In AP1.1 wurden optische Verfahren (NIR, FTIR) etabliert, die chemische Degradation und Materialzusammensetzung zerstörungsfrei analysieren. AP1.2a fokussierte auf mikrostrukturelle Parameter: Mittels ortsaufgelöster Messungen an speziellen Minimodulen und der Etablierung des Quellversuchs als effizienter Alternative zu Soxhlet-Tests wurde eine robuste Korrelation zwischen X-Link®-Messwerten (LXM) und Vernetzungsgrad erreicht. Round-Robin-Tests validierten die Reproduzierbarkeit der Methoden. Parallel wurde in AP1.3a/b eine BOM-Datenbank aufgebaut, die chemische Fingerabdrücke (u.a. durch Py-GCMS), Materialeigenschaften und Analyseverfahren integriert. Diese bildet die Grundlage für prädiktive FEM-Simulationen und industrielle Qualitätssicherung.

AP2: Zur Weiterentwicklung des zerstörungsfreien X-Link®-Verfahrens für die Vernetzungsgradmessung wurden FEM-Simulationen (AP2.2c) als digitaler Zwilling etabliert. Diese reproduzieren zuverlässig physikalische Trends – niedrige Vernetzung führt zu reduzierten LXM-Werten, hohe Vernetzung zu erhöhten Werten – und liegen nach Normalisierung für die meisten Rückseitenfolien innerhalb der messtechnischen Toleranz. Experimentell validierte Materialkombinationen (AP2.2d) bestätigten die Modellkonsistenz, zeigen jedoch systematische Abweichungen in Absolutwerten. Beschleunigte Alterungstests (AP2.3b) offenbarten, dass nur verlängerte Damp-Heat-Belastungen (DH) einen signifikanten Einfluss des Vernetzungsgrads auf die Leistungsdegradation zeigten. Tests mit Temperaturen um 100°C (DH+UV, PCT) maskierten den Einfluss durch thermisch induzierte Re-Laminationseffekte. Analysen zur Materialvariabilität (AP2.4d) identifizierten signifikante Inhomogenitäten: DSC-Messungen wiesen bis zu 25% Abweichungen in der Vernetzungsenthalpie auf, und Py-GCMS belegte den direkten Zusammenhang zwischen Additivkonzentration und Gelgehalt. Diese Schwankungen spiegeln sich in X-Link®-Messungen kommerzieller Module wider und unterstreichen die Notwendigkeit homogener Additivverteilung für konsistente Laminationsqualität.

AP3 identifizierte den optimalen Vernetzungsgrad-Bereich für zuverlässige PV-Module durch systematische Alterungstests und Feldanalysen. Beschleunigte Tests (AP3.2b/c) zeigten, dass nur verlängerte Damp-Heat-Belastung (85°C/85% r.F.) signifikante Korrelationen zwischen initialem Gelgehalt und Degradation aufwies. In kombinierten Stresstests (z.B. DH+UV) führte die starke thermische Nachvernetzung zu nicht unterscheidbaren Proben. Im Pressure Cooker Test degradierte die Rückseitenfolien sehr stark. Das verfälscht die LXM-Messwerte bei gealterten Modulen (AP3.2c). Feldrückläufer-Analysen (AP3.2d) belegten die praktische Relevanz: Bei einem 18-jährigen Modul korrelierte die Elektrolumineszenz-Intensität mit LXM-Werten, was auf materialbedingte Degradationsmuster hinweist. Chemische Fingerabdrücke (AP3.3a) ermöglichten die Identifikation von Folienzusammensetzungen und validierten Referenzmaterialien für die Prozessoptimierung. Die Ergebnisse definieren kritische Grenzwerte für den Gelgehalt und unterstreichen die Notwendigkeit materialangepasster Bewitterungsprotokolle.

AP4 zielte auf die industrielle Umsetzung einer zuverlässigkeitsoptimierten Produktionsbeschleunigung ab. Sunset entwickelte eine Methodik zur präzisen Einstellung vorbestimmter Vernetzungsgrade für bekannte Folientypen (Basierend auf AP3-Daten), wodurch kontinuierliche Prozessführung ermöglicht wird. Die X-Link®-Technologie erwies sich als Schlüssel für Echtzeit-Qualitätskontrolle, da sie zeitnahe Anpassungen der Laminationsparameter bei Abweichungen erlaubt. Das CSP bestätigte durch GCMS-Analysen den direkten Zusammenhang zwischen Additivkonzentration und Gelgehalt, identifizierte jedoch Pyrolyse-GCMS als ungeeignet für Inline-Anwendungen (nicht zerstörungsfrei und nicht echtzeitfähig). Kritisch wurde herausgestellt, dass verkürzte Laminationszeiten (wie in DH-Tests beobachtet) die Moduldegradation beschleunigen können – ein übertragbares Risiko für Freifeldbedingungen. Diese Erkenntnisse wurden in Fachkonferenzen (EUPVSEC, IEEE PVSC) kommuniziert und bilden die Grundlage für künftige Implementierungen.

AP5 entwickelte eine wirtschaftliche Qualitätssicherungsstrategie für PV-Systeme durch praxistaugliche Anwendung der X-Link®-Technologie. Bei IBC Solar erfolgten Vor-Ort-Messungen verschiedener Materialkombinationen (BOMs) mit dem X-Link. Ein Round-Robin-Test (LayTec, CSP, Sunset) bestätigte die robuste Tool-übergreifende Reproduzierbarkeit der Vernetzungsgradmessungen. Die ortsaufgelöste Datenerfassung etabliert eine Referenzbasis für künftige Degradationsanalysen bereits installierter Module. Parallel genutzte NIR-Messungen verbessern die Materialdatenbank und ermöglichen eine präzisere automatische Materialerkennung - eine Grundvoraussetzung für zuverlässige Kalibrierungen. Die Ergebnisse demonstrieren die Eignung für Servicedienstleistungen und legen den Grundstein für standardisierte Testprotokolle. Die etablierte Methodik ermöglicht erstmals eine quantifizierbare Risikobewertung über den gesamten Lebenszyklus von PV-Anlagen.

19. Schlagwörter

Vernetzungsgrad, Materialdatenbank, Beschleunigte Alterung, Prozessoptimierte Lamination, Risikobasierte Qualitätssicherung

20. Verlag	21. Preis
-	-

Anton Mordvinkin

Digital signiert von: Anton Mordvinkin
Name: CN = Anton Mordvinkin C = DE O = Fraunhofer OU = IMWS, People
Datum: 2025.09.26 10:25:02 +02'00'

Dr. Anton Mordvinkin

Halle, 25.09.2025

Unterschrift