



Leitfaden für die Bewertung von PV-Modulen mit defekten Backsheets

VDE SPEC 90027 V1.0 (de)

Vorwort

Veröffentlichungsdatum dieser VDE SPEC: 07.11.2023.

Zur vorliegenden VDE SPEC wurde kein Entwurf veröffentlicht.

Die vorliegende VDE SPEC ging aus dem Projekt „ANOMALOUS“ im Rahmen der vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderten Initiative „WIPANO – Wissens- und Technologietransfer durch Patente und Normen“ (Förderkennzeichen FKz 03TN0025) hervor.

Diese VDE SPEC ist **nicht** Bestandteil des VDE-Vorschriftenwerks oder des Deutschen Normenwerks. Diese VDE SPEC ist insbesondere auch **keine** Technische Regel im Sinne von § 49 EnWG.

Verfasserinnen und Verfasser dieser VDE SPEC sind:

- Brandenburg Marc, Aluminium Féron GmbH & Co. KG (Feron)
- Buerhop-Lutz Claudia, Forschungszentrum Jülich GmbH, IEK-11, HI ERN (HIERN)
- Dittmann Sebastian, Hochschule Anhalt (HSA)
- Evertz Marc, Aluminium Féron GmbH & Co. KG (Feron)
- Gottschalg Ralph, Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik (CSP) / Hochschule Anhalt (HSA)
- Jäckel Bengt, Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik (CSP)
- Klimm Elisabeth, Hochschule Anhalt (HSA)
- Kriening Jonathan, Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW)
- Lechner Peter, HaWe Engineering GmbH (HaWe)
- Linsenmeyer Aswin, Sunset Energietechnik GmbH (Sunset)
- Radacki Dominika, Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE (DKE)
- Reuter Anna, Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE (DKE)
- Stroyuk Oleksandr, Forschungszentrum Jülich GmbH, IEK-11, HI ERN (HIERN)
- Weinreich Bernhard, HaWe Engineering GmbH (HaWe)

An dieser Stelle herzlichen Dank an die Expertinnen und Experten für ihre wertvollen Beiträge und Anregungen.

Trotz großer Anstrengungen zur Sicherstellung der Korrektheit, Verlässlichkeit und Präzision technischer und nicht-technischer Beschreibungen kann die VDE SPEC-Projektgruppe weder eine explizite noch eine implizite Gewährleistung für die Korrektheit des Dokuments übernehmen. Die Anwendung dieses Dokuments geschieht in dem Bewusstsein, dass die VDE SPEC-Projektgruppe für Schäden oder Verluste jeglicher Art nicht haftbar gemacht werden kann. Die Anwendung der vorliegenden VDE SPEC entbindet den Nutzer nicht von der Verantwortung für eigenes Handeln und geschieht damit auf eigene Gefahr.

Im Zuge der Herstellung und/oder Einführung von Produkten in den Europäischen Binnenmarkt muss der Hersteller eine Risikoanalyse durchführen, um zunächst festzustellen, welche Risiken das Produkt möglicherweise mit sich bringt. Nach Durchführung der Risikoanalyse bewertet er diese Risiken und ergreift gegebenenfalls geeignete Maßnahmen, um die Risiken wirksam zu eliminieren oder zu minimieren (Risikobewertung). Die vorliegende VDE SPEC entbindet den Nutzer nicht von dieser Verantwortung.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte betreffen können. VDE ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Executive Summary

In PV-Modulen verbaute Backsheets zeigen im Feld vorzeitige Alterungserscheinungen mit Risiken des elektrischen Schlags und Brands bzw. mit dem Risiko des Totalausfalls. Die vorliegende VDE SPEC gibt eine Übersicht der Folientypen, Degradationserscheinungen und Analysemethoden. Zusätzlich werden Empfehlungen zum Umgang mit verschiedenen Befunden gegeben.

Inhalt

Einleitung	1
1 Anwendungsbereich	2
2 Normative Verweisungen	2
3 Begriffe	2
4 Abkürzungen	4
5 Bewertung von PV-Modul-Backsheets	4
5.1 Allgemeines	4
5.2 Typische Aufbauten von Backsheets	5
5.2.1 Monofolienlösungen, coextrudiert: polyamidbasiert / polyolefinbasiert	5
5.2.2 Monofolienlösung Typ „CPC“: (fluorhaltige) Beschichtung / PET / (fluorhaltige) Beschichtung	5
5.2.3 Folienverbund Typ „CPE“: (fluorhaltige) Beschichtung / PET / Primer für Einbettungsmaterialhaftung	5
5.2.4 Folienverbund Typ „PPE“: PET / PET / Primer für Einbettungsmaterialhaftung	5
5.2.5 Folienverbund Typ „TPT“ / „KPK“: PVF oder PVDF / PET / PVF oder PVDF	5
5.2.6 Folienverbund Typ „TPE“ / „KPE“: PVF oder PVDF / PET / Primer für Einbettungsmaterialhaftung	5
5.3 Definition zur Bewertung des Backsheets	6
5.4 Klassifizierung der Backsheet-Defekte	6
5.4.1 Abkreiden / Chalking	6
5.4.2 Verfärbung I (browning, yellowing)	6
5.4.3 Verfärbung II (browning, yellowing)	6
5.4.4 Korrosion der elektrischen Verbinder	6
5.4.5 Risse in Backsheets	6
5.4.6 Delamination	7
5.4.7 Mechanische Schäden	7
5.4.8 Brandstellen	7
5.5 Klassifizierungsmatrix	8
5.6 Entscheidungsmatrix und weiterführende Prüfungen	10
5.7 Bewertungs- und Charakterisierungsmethoden	12
5.7.1 Optische Bewertung	12
5.7.2 Fourier-Transformations-Infrarot-(FTIR-)Spektroskopie	12
5.7.3 Raman-Spektroskopie	12
5.7.4 Nah-Infrarots-Absorptions-(NIRA-)Spektroskopie (NIRA)	13
5.8 Sicherheitsrelevante Messmethoden	13
5.8.1 Isolationsprüfung unter Benässung	13
5.8.2 Isolationsprüfung unter Benässung bei abweichenden Temperaturen	13
5.8.3 Isolationsprüfung nach Langzeitbenässung	14
5.8.4 Kriterien zum Bestehen der Isolationsprüfung	15
6 Prüfbericht	15
6.1 Systemdaten	15
6.1.1 Grundlegende Systemangaben	15
6.1.2 Angaben über Systementwickler und -installateur(e)	15
6.1.3 Angaben über Systembetreiber und Wartungsbetrieb(e): O&M	16

6.2	Angaben zum Prüfer / zur Prüferin und der Ausrüstung	16
6.3	Dokumentation der Auffälligkeiten	16

Anhang A : Beispielbilder der Klassifizierung bekannter Backsheet-Defekte 17

Anhang B : Charakterisierungsbeispiele bekannter Backsheet-Defekte mittels FTIR-Spektroskopie 25

Anhang C : Charakterisierungsbeispiele bekannter Backsheet-Defekte mittels Raman-Spektroskopie 28

Anhang D : Charakterisierungsbeispiele bekannter Backsheet-Defekte mittels NIRA-Spektroskopie 31

Abbildungsverzeichnis

Bild 1	– Monofolienlösung, coextrudiert	5
Bild 2	– Monofolienlösung Typ "CPC"	5
Bild 3	– Folienverbund Typ „CPE“	5
Bild 4	– Folienverbund Typ „PPE“	5
Bild 5	– Folienverbund Typ „TPT“ / „KPK“	5
Bild 6	– Folienverbund Typ "TPE" / "KPE"	5
Bild 7	– Schematische Darstellung der Eindring- bzw. Informationstiefe unterschiedlicher Methoden zur Charakterisierung von Backsheets	12
Bild 8	– Schematische Darstellung der Referenzmessung des Isolationswiderstands. Hinweis: Die Isolationswiderstandsachse ist logarithmisch.	14
Bild 9	– Typische Verläufe des Isolationswiderstands während der Langzeitbenässung	15

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	– Klassifizierungsmatrix	8
Tabelle 2	– Entscheidungsmatrix	10
Tabelle 3	– Beispielbilder der Klassifizierung bekannter Backsheet-Defekte	17
Tabelle 4	– Charakterisierungsbeispiele bekannter Backsheet-Defekte mittels FTIR-Spektroskopie	25
Tabelle 5	– Charakterisierungsbeispiele bekannter Backsheet-Defekte mittels Raman-Spektroskopie	28
Tabelle 6	– Charakterisierungsbeispiele bekannter Defekte mittels NIRA-Spektroskopie	31

Einleitung

Photovoltaik (PV) ist, neben der Windkraft, die weltweit wichtigste erneuerbare Energiequelle auf dem Wege der CO₂-freien Erzeugung von elektrischer Energie. Der Anteil der Photovoltaik im deutschen Strommix steigt jährlich an und damit auch die Anforderungen an den reibungslosen und vorhersagbaren Betrieb.

Die EU-Ziele im Rahmen des Green Deals sehen eine Reduktion der CO₂-Emission um 55 % bis 2030 bzw. 100 % bis 2050 vor. Zum Erreichen dieser hochgesteckten Ziele ist eine gewaltige Kraftanstrengung nötig. Zieht man nun noch in Betracht, dass durch die e-Mobilität und die Umstellung der Gebäudeerwärmung von fossilen Brennstoffen auf elektrische Wärmepumpen der Bedarf deutlich steigen wird, ist ein Anstieg so genannter E-Energy (Electronic Energy) zu erwarten.

Neben einem raschen Ausbau der erneuerbaren Energieerzeugung muss gewährleistet werden, dass die Laufzeit der bestehenden PV-Anlagen so weit wie möglich verlängert wird. Dazu gehört die Sicherstellung der Rahmenbedingungen für sowohl alte als auch neue Anlagen. Aber es besteht darüber hinaus die Gefahr, dass viele jüngere Anlagen wegen frühzeitig auftretender Fehler und Defekte an den Backsheets der PV-Module vom Netz genommen werden müssen.

Auf dem Markt gibt es mittlerweile einige Firmen, die Reparaturlösungen für PV-Module anbieten. Allerdings gibt es für die Reparatur bisher keine Richtlinien oder Vorgaben für Durchführung bzw. für anschließende Überprüfungen.

Diese VDE SPEC gibt Richtlinien für die Bewertung und Handlungsempfehlungen für Auffälligkeiten von PV-Modul-Backsheets. Neben optischen Bewertungen werden Analyseverfahren vorgeschlagen und mögliche elektrische Sicherheitsprüfungen zur vertieften Bewertung.

1 Anwendungsbereich

Diese VDE SPEC beinhaltet eine Fehlerklassifizierung von PV-Modul-Backsheets. Die Erkennung und die sicherheitsrelevante Bewertung, z. B. in einer wiederkehrenden PV-Anlagen-Begehung, und die darauf zurückzuführenden möglichen Handlungsmöglichkeiten werden beschrieben.

Die VDE SPEC ist für die meisten auf dem Markt verbauten kristallinen Silizium- sowie Dünnschicht-Module anwendbar, die nur nach Aufbau und den aufgetretenen Fehlern klassifiziert werden müssen.

Andere für den sicheren Betrieb notwendige Inspektionen und Prüfungen, wie z. B. Prüfung von Anschlussdosen, Leitungen und Steckern, sind entsprechend anderer Inspektionsnormen durchzuführen.

Zusätzliche strengere Bewertungen können erfolgen, wenn das PV-System auf z. B. systemkritischer Infrastruktur (bspw. Krankenhaus) oder anderweitig gefährdeten Gebäuden / Installationen (bspw. Region mit hoher Waldbrandgefahr, bandgefährdete Dächer) installiert ist. Brand- und andere sicherheitsrelevante Normen müssen eingehalten bleiben.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

DIN EN 62446-1 (VDE 0126-23-1):2019-04, *Photovoltaik (PV)-Systeme – Anforderungen an Prüfung, Dokumentation und Instandhaltung – Teil 1: Netzgekoppelte Systeme – Dokumentation, Inbetriebnahmeprüfung und Prüfanforderungen (IEC 62446-1:2016 + A1:2018); Deutsche Fassung EN 62446-1:2016 + A1:2018*

DIN EN IEC 61215-1 (VDE 0126-31-1):2022-08 *Terrestrische Photovoltaik (PV)-Module – Bauarteignung und Bauartzulassung – Teil 1: Prüfanforderungen (IEC 61215-1:2021 + COR1:2021); Deutsche Fassung EN IEC 61215-1:2021 + AC:2021*

DIN EN IEC 61215-2 (VDE 0126-31-2), *Terrestrische Photovoltaik (PV)-Module – Bauarteignung und Bauartzulassung – Teil 2: Prüfverfahren*

DIN EN IEC 61730-1 (VDE 0126-30-1), *Photovoltaik (PV)-Module – Sicherheitsqualifikation – Teil 1: Anforderungen an den Aufbau*

DIN EN IEC 61730-2 (VDE 0126-30-2), *Photovoltaik (PV)-Module – Sicherheitsqualifikation – Teil 2: Anforderungen an die Prüfung*

DIN EN IEC 62446-2 (VDE 0126-23-2), *Photovoltaik (PV)-Systeme – Anforderungen an Prüfung, Dokumentation und Instandhaltung – Teil 2: Netzgekoppelte Systeme – Instandhaltung von PV-Systemen*

DIN EN ISO 9001:2015, *Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen (ISO 9001:2015); Deutsche Fassung und englische Fassung EN ISO 9001:2015*

DIN IEC/TS 62446-3 (VDE V 0126-23-3), *Photovoltaik(PV)-Systeme – Anforderungen an Prüfung, Dokumentation und Instandhaltung – Teil 3: Photovoltaische Module und Betriebsanlagen – Infrarot-Thermografie im Freien*

DIN VDE 0105-100/A1 (VDE 0105-100/A1:2017-06), *Betrieb von elektrischen Anlagen – Teil 100: Allgemeine Festlegungen; Änderung A1: Wiederkehrende Prüfungen*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe.

DIN und DKE stellen terminologische Datenbanken für die Verwendung in der Normung unter den folgenden Adressen bereit:

- DIN-TERMinologieportal: verfügbar unter <https://www.din.de/go/din-term>
- DKE-IEV: verfügbar unter <https://www.dke.de/DKE-IEV>

3.1

Standardtestbedingungen (STC)

(en: Standard Test Conditions)

Normierte Standardbedingungen für Leistungsmessung von PV-Modulen

3.2

Schichtpressstoff

Erzeugnis, bei dem zwei oder mehr Lagen desselben Werkstoffs oder verschiedener Werkstoffe miteinander verbunden wurden. Dazu gehören alle Komponenten vor der Befestigung der Anschlussdose, des Rahmens oder der Montageschiene und des Typschilds.

[QUELLE: IEC 60050-212:2010, 212-15-52, modifiziert – Der zweite Satz wurde ergänzt.]

3.3

Hersteller

jede juristische Person, die ein Produkt herstellt oder ein Produkt entwickelt bzw. hergestellt hat und dieses Produkt unter seinem Namen oder Warenzeichen auf den Markt bringt

3.4

Verkapselungsstoff

Zwischenschicht(en) zwischen Frontseiten- und Rückseitenfolie des PV-Moduls, die die aktiven Teile des PV-Moduls umschließt (umschließen)

3.5

Gehäuse

Teil einer Baugruppe, der einen festgelegten Schutzgrad für die Einbauten gegen äußere Einwirkungen und einen festgelegten Schutzgrad gegen Annähern oder Berühren aktiver Teile bietet

[QUELLE: IEC 60050-441:1984, 441-13-01, modifiziert – „sich bewegender Teile“ wurde gestrichen]

3.6

Frontsheet

äußere Schicht (Verbund äußerer Schichten) an der Frontseite des PV-Moduls zum Schutz der inneren Bauteile des PV-Moduls vor Beanspruchung von außen und Witterungseinflüssen sowie als elektrische Isolierung

3.7

Backsheet

Rückseitenfolie, die die Solarzelle vor Umwelteinflüssen wie UV-Strahlung und Feuchtigkeit schützt sowie elektrische Isolierung und mechanische Stabilität bietet

3.8

Primer

Haftvermittelnde Lage zwischen Einkapselungsmaterial und Folie des Backsheets, typischerweise Bestandteil der Folie

3.9

Ethylenvinylacetat

eine formulierte Folie, die als Einkapselungsmaterial bei der Laminierung von PV-Modulen verwendet wird

3.10

Fluoropolymer

Polymer auf Basis von Fluorkohlenwasserstoffen (teil- oder vollfluorierte Kohlenwasserstoffe); zum Beispiel PVF oder PVDF

3.11

Kynar®

Handelsname der Firma Arkema für Polyvinylidenfluoride

3.12

Polyamid

Thermoplastischer Kunststoff, der z. B. als Backsheet-Material verwendet wird

3.13

Polyethylen

Thermoplastischer Kunststoff auf Polyolefinbasis

3.14

Polyethylenterephthalat

Thermoplastischer Kunststoff aus der Polyesterfamilie (z. B. Einwegplastikflaschen)

3.15

Tedlar®

Handelsname der Firma DuPont für Polyvinylfluoride

4 Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
AATR	Essigsäure-Transmissionsrate (englisch <i>Acetic Acid Transmission Rate</i>)
BOM	Materialzusammenstellung (englisch <i>Bill of Material</i>)
EVA	Ethylenvinylacetat
FTIR	Fourier-Transformations-Infrarot-Spektroskopie
KPK	Backsheet-Konstruktion basierend auf Kynar® / PET / Kynar®
NIRA	Nah-Infrarot-Absorption-Spektroskopie
PA	Polyamid
PE	Polyethylen
PET	Polyethylenterephthalat
PO	Polyolefin
PP	Polypropylen
POE	Polyolefin-Elastomer-Einkapselungsmaterial
PPE	Backsheet-Konstruktion auf Basis von PET / PET / Einkapselungsmaterial (oft Mischungen aus PE und EVA)
PV	Photovoltaik
PVB	Polyvinylbutyral
PVDF	Polyvinylidenfluorid; thermoplastisches Fluorpolymer (Handelsname Kynar® von Arkema)
PVF	Polyvinylfluorid; thermoplastisches Fluorpolymer (Handelsname Tedlar® von DuPont))
TPE	Backsheet-Konstruktion basierend auf Tedlar® / PET / Einkapselungsmaterial
TPT	Backsheet-Konstruktion basierend auf Tedlar® / PET / Tedlar®

5 Bewertung von PV-Modul-Backsheets

5.1 Allgemeines

Das Backsheet eines PV-Moduls besteht in der Regel aus einem Glas- (Glas-Glas Module) oder einem Polymer-Backsheet (Glas-Backsheet-Module). PV-Module sind in der Regel Klasse II Produkte und sind CE-kennzeichnungspflichtig. Die Basis zur Konformitätserklärung nach Niederspannungsrichtlinie ist die Einhaltung von DIN EN IEC 61730-1 (VDE 0126-30-1) und DIN EN IEC 61730-2 (VDE 0126-30-2). Neben konstruktiven Anforderungen werden beschleunigte Alterungstest durchgeführt mit abschließender Bewertung der elektrischen Sicherheit. Ist die elektrische Sicherheit der PV-Anlage nicht mehr gewährleistet, so muss diese in einen sicheren Zustand überführt werden.

Dieses Dokument soll die Grundlage für die Bewertung legen und mögliche Überprüfungsmöglichkeiten sowie Handlungsempfehlungen geben. Ein explizites Reparaturverfahren ist nicht Teil dieser VDE SPEC.

Gebrochene Vorder- oder Rückseitengläser, abgefallene oder beschädigte Anschlussdosen, Leitungen oder Stecker stellen ebenfalls ein inhärentes Sicherheitsrisiko dar und müssen repariert oder die Module

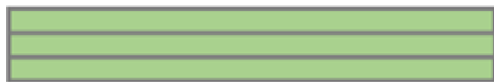
durch neue ersetzt werden. Auf diese Aspekte wird in dieser VDE SPEC nicht weiter eingegangen. Der Fokus ist die technische Bewertung des polymeren Backsheets.

5.2 Typische Aufbauten von Backsheets

Grundsätzlich können zwischen Monofolienlösungen (teilweise coextrudiert) und Folienverbunden unterschieden werden. In den folgenden Darstellungen ist oben stets die Luftseite, unten die Innenlage in Richtung der Solarzellen abgebildet.

5.2.1 Monofolienlösungen, coextrudiert: polyamidbasiert / polyolefinbasiert

Coextrudierte Backsheets auf Basis von zum Beispiel Polyamiden und Polyolefinen werden hier als Monofolienlösungen betrachtet, da sie im Vergleich zu herkömmlichen Folienverbunden in der Regel keine Delamination der einzelnen Lagen der Folie zeigen und nicht mit Hilfe von Kaschierklebstoffen verbunden worden sind.



(modifizierten) PA / PO
(modifizierten) PA / PO
(modifizierten) PA / PO

Bild 1 – Monofolienlösung, coextrudiert

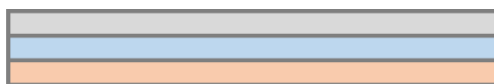
5.2.2 Monofolienlösung Typ „CPC“: (fluorhaltige) Beschichtung / PET / (fluorhaltige) Beschichtung



(fluorhaltige) Beschichtung
PET
(fluorhaltige) Beschichtung

Bild 2 – Monofolienlösung Typ "CPC"

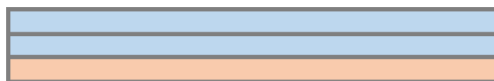
5.2.3 Folienverbund Typ „CPE“: (fluorhaltige) Beschichtung / PET / Primer für Einbettungsmaterialhaftung



(fluorhaltige) Beschichtung
PET
Primer für Einbettungsmaterialhaftung

Bild 3 – Folienverbund Typ „CPE“

5.2.4 Folienverbund Typ „PPE“: PET / PET / Primer für Einbettungsmaterialhaftung



PET
PET
Primer für Einbettungsmaterialhaftung

Bild 4 – Folienverbund Typ „PPE“

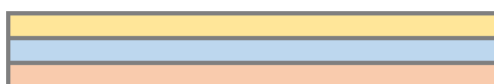
5.2.5 Folienverbund Typ „TPT“ / „KPK“: PVF oder PVDF / PET / PVF oder PVDF



PVF /PVDF
PET
PVF /PVDF

Bild 5 – Folienverbund Typ „TPT“ / „KPK“

5.2.6 Folienverbund Typ „TPE“ / „KPE“: PVF oder PVDF / PET / Primer für Einbettungsmaterialhaftung



PVF /PVDF
PET
Primer für Einbettungsmaterialhaftung

Bild 6 – Folienverbund Typ "TPE" / "KPE"

5.3 Definition zur Bewertung des Backsheets

Ziel der allgemeinen Bewertung soll eine realistische Einschätzung des elektrischen Sicherheitspotentials sein. Die Bewertung des Backsheets setzt sich aus mindestens einer optischen Untersuchung und entsprechender Dokumentation (siehe Abschnitt 5) zusammen. Sollte hiermit keine eindeutige Bewertung möglich sein, müssen weitere Bewertungs- und Analysemethoden herangezogen werden, um eine Aussage zum aktuellen Zustand und zu einer möglichen Entwicklung zu geben.

5.4 Klassifizierung der Backsheet-Defekte

5.4.1 Abkreiden / Chalking

Beschreibung: Beim Abstreichen des Backsheets bleibt ein weißlicher Rückstand auf dem Handschuh bzw. auf dem für den Abstrich verwendeten Hilfsmittel.

Sicherheitshinweis: Bei PV-Anlagen, die unter Spannung stehen, darf der Abstrich nur mit geeigneten Isolationsschutzmaßnahmen durchgeführt werden; es besteht sonst für den Prüfer / die Prüferin die Gefahr eines elektrischen Schlags.

Erklärung: Fotokatalytisch aktives Titandioxid (weißes Farbpigment) löst sich aus dem Polymer des Backsheets (Zersetzung des Polymers).

Auswirkung: Abkreiden hat nach dem aktuellen Stand der Technik keine direkten negativen Auswirkungen auf das Backsheet, wird jedoch oftmals zusammen mit anderen Effekten wie Sprödigkeit und Rissbildung beobachtet.

5.4.2 Verfärbung I (browning, yellowing)

Beschreibung: Lokale bräunliche, gelbliche Verfärbungen des in der Regel weißen Backsheets. Häufig in Korrelation mit deutlich wärmeren Zellen (sichtbar im Betrieb mittels Infrarot-Thermografie gem. DIN IEC/TS 62446-3 (VDE V 0126-23-3)) und im Falle kristalliner Silizium Solarzellen ausgelöst durch Zellbruch.

Erklärung: Anzeichen für eine lokale dauerhafte Erwärmung, die zu einer beschleunigten Alterung der Polymere führt.

Auswirkung: Dies führt häufig zu einer Braunfärbung und langfristig zu Rissbildung und / oder Versprödung. Langfristig besteht zudem die Gefahr der Rissbildung der Folie und damit eines elektrischen Sicherheitsrisikos.

5.4.3 Verfärbung II (browning, yellowing)

Beschreibung: Großflächige bräunliche, gelbliche Verfärbungen des in der Regel weißen Backsheets. Im Falle einer frontseitigen Verfärbung kann es sich entweder um eine Veränderung im Verkapselungsmaterial oder des Backsheets handeln, ggf. zerstörende Untersuchungen notwendig.

Erklärung: Aufgrund von UV-Strahlung, die zu einer beschleunigten Alterung der Polymere führt.

Auswirkung: Langfristig besteht die Gefahr der Rissbildung / Delamination (siehe 5.4.6) der Folien und damit die Gefahr eines elektrischen Sicherheitsrisikos.

5.4.4 Korrosion der elektrischen Verbinder

Beschreibung: Optische Verfärbungen an den Querverbindern, Zellverbindern und / oder an den Verbindungspunkten. Typischerweise sind die Verfärbungen bräunlich / grünlich.

Erklärung: Chemische Reaktion zwischen metallischen Komponenten (Fingerkontakte, Zell- und Querverbinder) mit Sauerstoff, Wasser und weiteren Stoffen.

Auswirkung: Elektrische Verbindungen werden hochohmiger bzw. verlieren den Kontakt. Es können sich Hotspots entwickeln. Korrosion der elektrischen Verbinder ist ein deutliches Anzeichen für chemisch aktive Reaktionen im Laminat, in der Regel durch erhöhten Feuchtigkeitseintritt hervorgerufen.

5.4.5 Risse in Backsheets

Beschreibung: Die Risse können auf der Innen- oder Außenseite der Backsheets sichtbar sein. Hinzu kommen vollständig durch die Backsheets gehende Risse.

Erklärung: Risse stellen Zersetzungserscheinung der Backsheets dar. Die Ursachen der Rissbildung sind vielfältig und hängen vom verwendeten Material des Backsheets, der verwendeten Einkapselungsfolie und dem Einsatzort ab.

Auswirkung: Durch die Risse im Backsheet kann stärker Feuchtigkeit und Wasser in das Modul eindringen. Es besteht die Gefahr, dass dadurch elektrisch aktive Komponenten mit der äußeren Umgebung (Erde) in Kontakt kommen. Dadurch kann es zu beschleunigter Korrosion / Degradation kommen und die elektrische Isolation ist nicht mehr gewährleistet, so dass die Betriebssicherheit ebenfalls nicht mehr gewährleistet ist.

5.4.6 Delamination

Beschreibung: Zersetzung des Laminatverbundes und damit der Integrität des PV-Moduls. Es liegt eine flächige Ablösung an einer Grenzfläche im Laminat vor. Delaminationen können grundsätzlich an allen Grenzflächen entstehen. Hauptsächlich treten aber zwischen Frontglas und Einkapselungsmaterial, Backsheet und Einkapselungsmaterial oder Zelle Delaminationen auf. Möglich sind außerdem Delaminationen von der Solarzelle.

Erklärung: Delamination wird häufig ausgelöst durch Wassereintritt, meistens vom Modulrand her, oder durch Mikro- oder Makrorisse im Backsheet oder durch Verunreinigungen.

Auswirkung: Am Rand des Moduls besteht die erhöhte Möglichkeit des Feuchtigkeitseintritts, wodurch die Alterung des gesamten PV-Moduls beschleunigt wird. Abhängig von der Stelle im Modul kann die elektrische Isolation nicht mehr gewährleistet werden.

5.4.7 Mechanische Schäden

Beschreibung: Bei mechanischen Schäden handelt es sich bspw. um Risse, Eindrücke, Dellen, Schnitte, Kratzer, Brüche der Backsheets. In der Regel treten sie vereinzelt auf.

Erklärung: Äußere, mechanische Einwirkung auf das Backsheet.

Auswirkung: Abhängig von der Art der mechanischen Schäden können zum Beispiel Zellbruch (siehe 5.4.2) oder Verlust der elektrischen Isolation auftreten.

5.4.8 Brandstellen

Beschreibung: Bei Brandstellen handelt es sich um Beschädigungen des Backsheets durch extreme Hitze. Sie treten häufig lokal auf und sind in der Regel erkennbar anhand der schwarzen Färbung der Defektstelle (bei weißen Folien) und der starken Brüchigkeit der Folie um die Brandstelle.

Erklärung: Partielle Abschattungen (stark abhängig vom Zelltyp), defekte Lötstellen, Korrosion durch eingedrungene Feuchtigkeit oder Ermüdung von Bändchen sowie Erdschlüsse zum Rahmen können zu Brandstellen führen. Glasbruch, ausgelöst durch starke Erwärmung einzelner Zellen, ist als Ursache von Brandstellen entlang der Bändchen nicht möglich.

Auswirkung: In der Regel ist die elektrische Sicherheit nicht mehr gewährleistet. Außerdem besteht ein erhöhtes Brandrisiko.

5.5 Klassifizierungsmatrix

Die nachstehende Tabelle gibt einen Überblick über die allgemeine Klassifizierung des Backsheets. Beispielbilder zu den Klassen sind in Anhang A: Beispielbilder der Klassifizierung bekannter Backsheet-Defekte gegeben.

In der Spalte **Beschreibung** werden die Ergebnisse der optischen Untersuchung in Zusammenhang mit Anhang A aufgelistet und anhand der darauffolgenden Spalten klassifiziert (0 bis 3, steigende Kritikalität) und einem elektrischen Sicherheitsrisiko zugeordnet. Die **Handlungsempfehlungen** geben einen Überblick zu den nächsten Schritten (Entscheidungsmatrix siehe 5.6).

Tabelle 1 – Klassifizierungsmatrix

#	Beschreibung	Klassifizierung	Elektrisches Sicherheitsrisiko	Handlungsempfehlung
1	Keine optischen Auffälligkeiten auf dem Backsheet, keine Verfärbung, kein Abkreiden, keine Beschädigungen, auch von der Fronseite des Moduls sichtbar (z. B. Delamination in den Ecken, oder kleine Risse).	0	Sehr gering	keine
2	Abkreiden / Chalking. Typischerweise fast alle Module betroffen.	1	Sehr gering	Prüfung und Charakterisierung des Rückseitenfolientyps Handlungen siehe 5.6.
3	Leichte Verfärbungen (browning, yellowing), keine Versprödung/Rissbildung sichtbar, sonst Klassen 5-7.	1	Gering	Prüfung und Charakterisierung des Rückseitenfolientyps Handlungen siehe 5.6.
4	Korrosionserscheinungen der elektrischen Verbinder. Typischerweise nur einzelne Module betroffen, außer Serienfehler.	1	Gering, wenn nur Zellverbinder. Mittel bis sehr hoch, wenn deutliche (Grün)färbung vom Querverbinder in Richtung Rahmen.	Prüfung und Charakterisierung des Rückseitenfolientyps Handlungen siehe 5.6.
5	Risse in der Rückseitenfolie: Luftseite (outer surface). Typischerweise fast alle Module betroffen, wenn nicht ausgelöst durch schadhafte einzelne Zellen.	2	Mittel	Prüfung und Charakterisierung des Rückseitenfolientyps, Isolationsprüfung. Handlungen siehe 5.6.
6	Risse in der Rückseitenfolie: Laminatsseite (inner surface). Typischerweise fast alle Module betroffen, wenn nicht ausgelöst durch schadhafte einzelne Zellen.	2	Mittel	Prüfung und Charakterisierung des Rückseitenfolientyps, Isolationsprüfung. Handlungen siehe 5.6.

#	Beschreibung	Klassifizierung	Elektrisches Sicherheitsrisiko	Handlungsempfehlung
7	Risse in der Rückseitenfolie: durchgehend. Typischerweise fast alle Module betroffen, wenn nicht ausgelöst durch schadhafte einzelne Zellen.	3	Sehr hoch	Prüfung und Charakterisierung des Rückseitenfolientyps, Isolationsprüfung. Handlungen siehe 5.6.
8	Delaminationen I: allgemein: kleinere Blasen in der Mitte des Moduls, keine direkte Gefährdung der elektrischen Isolation.	1	Gering	Handlungen siehe 5.6.
9	Delaminationen II: großflächig oder am Rand liegend: Delaminationen am Rand reduzieren die Luft/ Kriechstrecken durch Feuchteintrag. Großflächige Delaminationen können zu großflächiger Freilegung von elektrischen Teilen im Laminat führen und sind daher ein inhärentes elektrisches Sicherheitsrisiko. Häufig mit deutlicher Korrosion der Querverbinder verbunden.	3	Sehr hoch	Prüfung und Charakterisierung des Rückseitenfolientyps, Isolationsprüfung. Handlungen siehe 5.6.
10	Mechanische Schäden durch Werkzeuge oder/ und Steinschlag oder/ und andere mechanische Einwirkungen (Tiere, Reinigung, Wartungsarbeiten). Typischerweise nur einzelne Module betroffen.	2	Hoch	Handlungen siehe 5.6.
11	Brandstellen. Typischerweise nur einzelne Module betroffen.	3	Sehr hoch	Modul außer Betrieb setzen.
12	Produktionsbedingte Fehler:			
	Falsch orientiertes BS (Typischerweise sehr selten).	2	Hoch	Handlungen siehe 5.6.
	Zellbruch in der Nähe des Modulrands (Typischerweise sehr selten).	2	Mittel	Handlungen siehe 5.6.
	Bändchen oder andere elektrisch aktive Elemente in der Nähe des Modulrands (Typischerweise sehr selten).	2	Mittel	Handlungen siehe 5.6.
	Verfärbte Isolationsheets in der Nähe Anschlussdose (Typischerweise sehr selten).	1	gering	Handlungen siehe 5.6.
	Fixierungstapes (typischerweise alle Module eine Charge).	1	In der Regel sehr gering.	keine
13	Biofilme	1	In der Regel sehr gering.	Dokumentation Ggf. Bestimmung des Biofilms

5.6 Entscheidungsmatrix und weiterführende Prüfungen

Entsprechend der Klassifizierungsmatrix (siehe 5.5) leiten sich empfohlene Handlungen ab. Abhängig von den Ergebnissen der durchzuführenden, in der folgenden Tabelle dargestellten, Untersuchungen können dann Entscheidungen hinsichtlich des zukünftigen Betriebs des Moduls getroffen werden.

Tabelle 2 – Entscheidungsmatrix

#	Beschreibung	Optische Prüfung gemäß 5.7.1	Bestimmung Typ Backsheet gemäß 5.7.2, 5.7.3 u. 5.7.5	Isolationstest gemäß 5.8.1	Isolations-test gemäß 5.8.3	Empfohlene Handlungen
1	Keine optischen Auffälligkeiten					keine
2	Abkreiden / Chalking	x	x			<ul style="list-style-type: none"> • PA-Folie: Überprüfung nach spätestens 1 Jahr, Gefahr der Rissbildung • Andere Folien: Überprüfung nach spätestens 2 Jahren, wenn optisch sonst OK • Andere Folien: Überprüfung nach spätestens 1 Jahr, wenn optisch Delaminations- oder Korrosionserscheinungen sichtbar
3	Leichte Verfärbungen (browning, yellowing)	x	x			<ul style="list-style-type: none"> • PA-Folie: Überprüfung nach spätestens 1 Jahr • Andere Folien: Überprüfung nach spätestens 2 Jahren, wenn optisch sonst OK • Andere Folien: Überprüfung nach spätestens 1 Jahr, wenn optisch Delaminations- oder Korrosionserscheinungen sichtbar
4	Korrosionserscheinungen der elektrischen Verbinder	x		x		<ul style="list-style-type: none"> • Überprüfung nach spätestens 1 Jahr für leichte Korrosionserscheinungen und bestandenem Isolationstest • Detaillierte Prüfung der ganzen Anlage, wenn einige Module starke Korrosionserscheinungen aufweisen und Isolationsprüfung ein FAIL ist. Gefahr von Brand, Stilllegung / Austausch der betroffenen Module
5	Risse in der Rückseitenfolie: Luftseite (outer surface)	x	x	x	x	PASS: Überprüfung nach spätestens 1 Jahr FAIL: Stilllegung / Austausch der betroffenen Module
6	Risse in der Rückseitenfolie: Laminatsseite (inner surface)	x	x	x		PASS: Überprüfung nach spätestens 1 Jahr FAIL: Stilllegung / Austausch der betroffenen Module
7	Risse in der Rückseitenfolie: durchgehend	x		x	x	PASS: Weiterbetrieb möglich, Warnhinweise für Personal, Überprüfung nach spätestens ½ Jahr, Arbeiten auf der Anlage nur bei Trockenheit FAIL: Anlage in elektrisch sicheren Zustand versetzen und Austausch der betroffenen Module
8	Delaminationen I: allgemein: kleinere Blasen in der Mitte des Moduls	x				<ul style="list-style-type: none"> • Überprüfung nach spätestens 2 Jahren

#	Beschreibung	Optische Prüfung gemäß 5.7.1	Bestimmung Typ Backsheet gemäß 5.7.2, 5.7.3 u. 5.7.5	Isolationstest gemäß 5.8.1	Isolations-test gemäß 5.8.3	Empfohlene Handlungen
9	Delaminationen II: großflächige oder am Rand liegend	x	x	x	x	<ul style="list-style-type: none"> Bestimmung der Rückseitenfolie und des Einkapselungsmaterials <small>PASS: Überprüfung in 1 Jahren (ggf. 2 Jahre)</small> <small>FAIL: Stilllegung / Austausch der betroffenen Module</small>
10	Mechanische Schäden	x	x	x		<small>PASS: Überprüfung nach spätestens 1 Jahren</small> <small>FAIL: Reparatur der Defektstelle mittels kompatibler Reparaturlösung und Überprüfung nach spätestens 1 Jahr</small>
11	Brandstellen	x				<ul style="list-style-type: none"> Stilllegung / Austausch der betroffenen Module
12	Falsch orientiertes Backsheet	x	x			<ul style="list-style-type: none"> Siehe Punkt 9 Delamination
	Zellbruch in der Nähe des Modulrands	x		x		<ul style="list-style-type: none"> Prüfung, ob Luft-Kriechstrecken nicht eingehalten, Überprüfung CE-Konformität <small>PASS: Notieren in Dokumentation, Überprüfung nach spätestens 1 Jahr</small> <small>FAIL: Stilllegung / Austausch der betroffenen Module</small>
	Bändchen oder andere elektrisch aktive Elemente in der Nähe des Modulrands	x		x		<ul style="list-style-type: none"> Prüfung, ob Luft-Kriechstrecken nicht eingehalten, Überprüfung CE-Konformität <small>PASS: Notieren in Dokumentation, Überprüfung nach spätestens 1 Jahr</small> <small>FAIL: Stilllegung / Austausch der betroffenen Module</small>
	Verfärbte Isolationsheets in der Nähe Anschlussdose	x				<ul style="list-style-type: none"> Dokumentation der Verfärbungen Überprüfung nach spätestens 2 Jahren
	Fixierungstapes (typischerweise alle Module einer Charge)	x		x		<small>PASS: Überprüfung nach spätestens 1 Jahr</small> <small>FAIL: Stilllegung / Austausch der betroffenen Module</small>
13	Biofilm	x				<ul style="list-style-type: none"> Überprüfen auf Veränderung / Wachstum nach spätestens 2 Jahren

5.7 Bewertungs- und Charakterisierungsmethoden

In diesem Abschnitt werden mögliche Charakterisierungsmethoden beschrieben. Diese weisen unterschiedliche Informationstiefen in das Backsheet auf. Dies ist bei der Bewertung zu berücksichtigen. Die Informationstiefe ist schematisch in nachfolgender Graphik dargestellt.

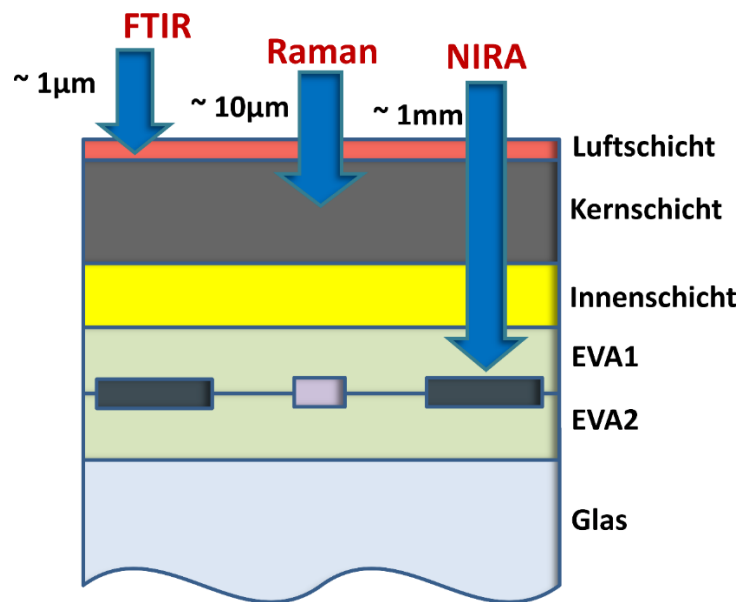


Bild 7 – Schematische Darstellung der Eindring- bzw. Informationstiefe unterschiedlicher Methoden zur Charakterisierung von Backsheets

5.7.1 Optische Bewertung

Die optische Bewertung erfolgt analog zu den Kriterien der DIN EN IEC 61215-1 (VDE 0126-31-1): 2022-02, Abschnitt 8 „Größere sichtbare Schäden“.

Fotos der vorgefundenen Defekte gehören zusammen mit der Modulbeschreibung (Typ, Seriennummer) zur Dokumentation.

5.7.2 Fourier-Transformations-Infrarot-(FTIR-)Spektroskopie

Fourier-Transformations-Infrarot-(FTIR-)Spektroskopie ist eine zerstörungsfreie, schnelle Analyseverfahren zur Identifikation chemischer Verbindungen an Oberflächen. Durch einen Infrarotlichtstrahl wird die Probe angeregt. Jede elektromagnetische Strahlung hat Einfluss auf die Bindungen organischer Moleküle. Bei der Absorption von Infrarot-Strahlung werden die Bindungen zu Schwingungen (durch nahes, mittleres oder fernes Infrarot) und Rotationen (fernes Infrarot) angeregt. Die Molekülschwingungen werden vom FTIR-Gerät als Absorption der Strahlung im Infrarotspektrum gemessen; das Spektrometer detektiert nach dem Durchgang des Infrarotstrahls durch die Probe einen gedämpften Strahl. Der Grad der Abschwächung jeder Frequenz wird als Absorptionsbande im Spektrum sichtbar. Je stärker absorbiert wird, desto intensiver sind die Absorptionsbanden. Zur Identifikation von Polymeren eignet sich die Messung im abgeschwächte-Totalreflektion-(ATR-)Modus. Diese Methode ist sehr oberflächensensitiv, was bedeutet, dass man Informationen über das Polymermaterial aus einer Tiefe von wenigen Mikrometern erhält. Das resultierende Spektrum enthält ausschließlich Informationen über die außenliegende Polymerschicht. Damit eignet sich das Verfahren für die sichere Identifikation der außenliegenden Polymerschicht. Die Identifikation weiterer Polymerschichten mit dieser Methode ist zerstörungsbehaftet und nur am Querschnitt der Rückseitenfolie möglich. Neben Laborgeräten sind auch tragbare Lösungen für Messungen im Feld verfügbar.

Bekannte Folien sind exemplarisch in Anhang B: Charakterisierungsbeispiele bekannter Backsheet-Defekte mittels FTIR-Spektroskopie dargestellt.

5.7.3 Raman-Spektroskopie

Raman-Spektroskopie basiert auf dem Raman-Effekt, einer Wechselwirkung zwischen Licht und Materie und ist eine zerstörungsfreie Analyseverfahren zur Identifikation chemischer Verbindungen. Die

Probe wird mit einer Laserquelle bestrahlt und das resultierende Streulichtspektrum wird gemessen. Eine Frequenzanalyse des gestreuten Lichts ermöglicht Rückschlüsse auf das Material aufgrund der charakteristischen Schwingungsform der Moleküle. Aus dem enthaltenen Spektrum lassen sich Rückschlüsse auf die untersuchte Probe ziehen. Die Eindringtiefe des Laserstrahls liegt bei wenigen μm bis $100\ \mu\text{m}$, je nach Fokusslage. Damit werden bei Rückseitenfolien mit einem mehrlagigen Aufbau nicht nur Informationen der außenliegenden Polymerlage, sondern auch der Kernschicht der Folie gesammelt. Durch eine Auswertung des resultierenden Mischspektrums kann neben der außenliegenden Polymer-schicht auch die Kernschicht der Rückseitenfolie identifiziert werden. Neben Laborgeräten existieren Handgeräte für den mobilen Einsatz.

Bekannte Folien sind exemplarisch in Anhang C: Charakterisierungsbeispiele bekannter Rückseitenfoliendefekte mittels Raman-Spektroskopie dargestellt.

5.7.4 Nah-Infrarots-Absorptions-(NIRA-)Spektroskopie (NIRA)

Nah-Infrarots-Absorptions-(NIRA-)Spektroskopie basiert auf der Schwingungsanregung im nahen Infrarotbereich, das heißt, im Bereich der Obertonschwingungen und Kombinationen. Aus der hohen Energie des Anregungslichts ($750\ \text{nm} - 2500\ \text{nm}$) resultiert eine größere Eindringtiefe bzw. Informationstiefe (bis $1\ \text{mm} - 1,5\ \text{mm}$). Damit können einfache Lichtquellen, Wellenleiter, verwendet und die Proben ohne Vorbereitung analysiert werden. Daraus wiederum resultiert ein Summenspektrum über alle Schichten des Folienmaterials. Mithilfe von Referenzspektren bekannter Materialien und Schichtaufbauten können die vorliegenden sowie fremde, unbekannte Folienschichten identifiziert werden. Neben Laborgeräten sind verschiedene portable, für den Feldeinsatz geeignete Geräte verfügbar. Da diese Geräte in ihrer Spezifikation variieren können, ist auf den Spektralbereich und die laterale Auflösung zu achten.

Bekannte Folien sind exemplarisch in Anhang D: Charakterisierungsbeispiele bekannter Rückseitenfolien mittels NIRA dargestellt.

5.8 Sicherheitsrelevante Messmethoden

5.8.1 Isolationsprüfung unter Benässung

Zur Überprüfung der allgemeinen elektrischen Sicherheit kann die Isolationsprüfung beschrieben in DIN EN 62446-1 (VDE 0126-23-1):2019-04, Abschnitt 6.7 „Prüfung des Isolationswiderstands von PV-Arrays“ werden.

Die detaillierte Überprüfung erfolgt mittels DIN EN IEC 61215-2 (VDE 0126-31-2):2022-02, Abschnitt 4.15 „Prüfung des Isolationswiderstandes unter Benässung (MQT 15)“. Zur Sicherstellung der vollständigen flächigen Kontaktierung der Rückseite des Moduls muss abweichend zu MQT 15 die Rückseite vollständig mit Wasser bedeckt sein, inklusive der Dichtung zur Anschlussdose und des Abschluss zum Rahmen.

Der Test kann im Labor, aber auch im Feld mittels entsprechenden Equipments durchgeführt werden. Der gemessene Isolationswiderstand und die genaue Modul- und Wassertemperatur sind zu dokumentieren.

5.8.2 Isolationsprüfung unter Benässung bei abweichenden Temperaturen

Per DIN EN IEC 61215-2 (VDE 0126-31-2):2022-02, Abschnitt 4.15 „Prüfung des Isolationswiderstandes unter Benässung (MQT 15)“ ist eine Wassertemperatur von $23\ \text{°C} \pm 2\ \text{K}$ vorgegeben. Für Messungen im Feld kann es jedoch schnell zu erheblichen Abweichungen nach oben und unten kommen. Es ist bekannt, dass der Isolationswiderstand sehr stark von der Temperatur abhängt. Um Messungen auch im Feld und das ganze Jahr über durchführen zu können, ist ein Korrekturverfahren notwendig.

Unter der Voraussetzung, dass die allgemeine Materialzusammenstellung des PV-Moduls gleich ist, kann mittels einer Temperaturreferenzmessung ein Korrekturfaktor bestimmt und die gemessenen Werte auf $23\ \text{°C}$ normiert werden.

An mindestens 2 Modulen ist eine temperaturabhängige Messung durchzuführen, die den Bereich der Temperaturen im Feld und das Temperaturfenster von $23\ \text{°C} \pm 2\ \text{K}$ vollständig abdeckt (siehe Bild 8).

Hiermit lassen sich dann die Messungen der großen Stichprobe der Module bei anderen Temperaturen auf den Referenzwert von 23 °C zurückrechnen und vergleichen.

In der Dokumentation ist die Referenzmessung vollständig anzugeben. Außerdem ist sicherzustellen, dass durch längeres Benässen des Moduls der Widerstand nicht signifikant verändert wird (10% Änderung über 10h sind akzeptabel!). Validiert kann dies gemäß 5.8.3 werden.

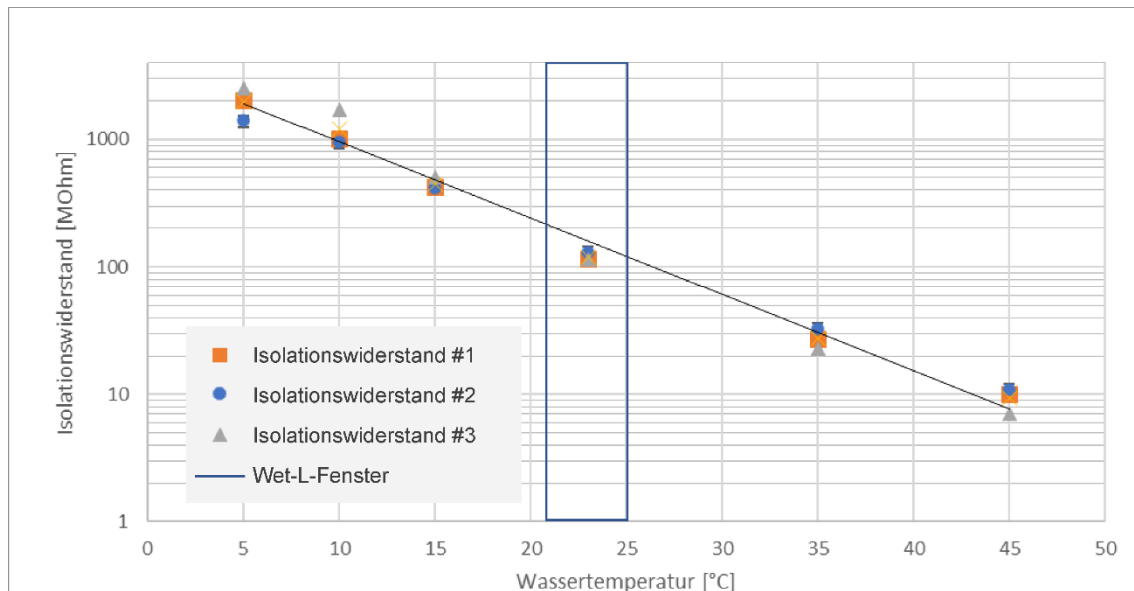


Bild 8 – Schematische Darstellung der Referenzmessung des Isolationswiderstands. Hinweis: Die Isolationswiderstandsachse ist logarithmisch.

5.8.3 Isolationsprüfung nach Langzeitbenässung

Es ist außerdem bekannt, dass der Isolationswiderstand von gealterten PV-Module mit Rückseitenfoliendefekten sehr stark von der Historie der letzten Tage abhängt, d. h. wie warm und wie feucht es war. Das kann dazu führen, dass Module selbst mit starker Rissbildung in der Rückseitenfolie als ausreichend isoliert eingestuft werden, obwohl die PV-Anlage sehr oft FAIL anzeigt wegen zu geringen Isolationswiderstands. Im Sinne der Risikobewertung zur elektrischen Sicherheit ist an einer Stichprobe von mindestens 5 Modulen (gleiche Materialzusammensetzung) und repräsentativen Schäden eine Isolationsprüfung nach Langzeitbenässung durchzuführen.

5.8.3.1 Durchführung I: Bewertung von Modulen mit Rissen in der Rückseitenfolie

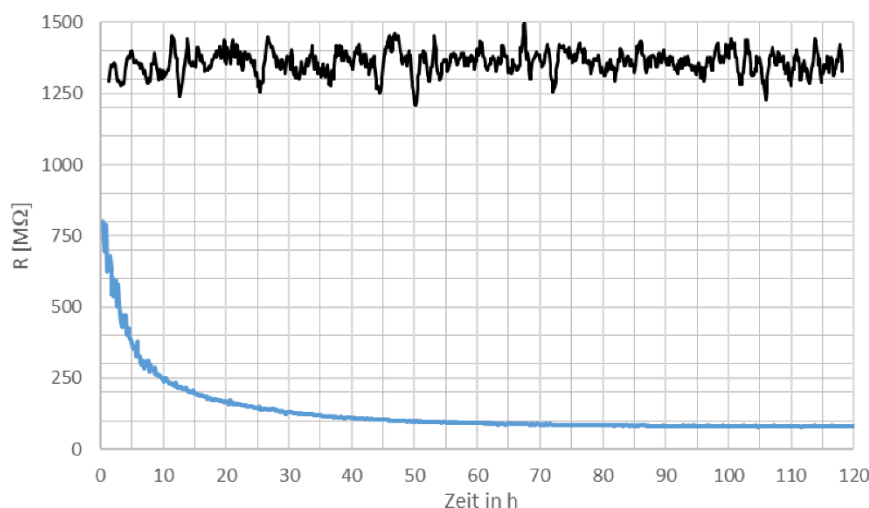
Bei einer Temperatur von 23 °C +/- 2 K müssen die Modulrückseiten 48 h vollständig mit Wasser bedeckt gelagert werden. Die Kabel und Stecker sind aus dem Wasser fernzuhalten. Sollte sich ein sichtbarer Defekt an den Kabeln und Steckern befinden und diese ggf. Ursache von geringen Isolationswiderständen sein, sind separate Prüfungen notwendig.

Der Isolationswiderstand ist davor und danach zu messen und zu dokumentieren. Die Modul-/ Wassertemperatur muss über den Zeitraum stabil sein und ebenfalls dokumentiert werden.

5.8.3.2 Durchführung II: Bewertung von Modulen mit Delamination (primär im Randbereich)

Abweichend zu 5.8.3.1 muss das gesamte Modul, inklusive Frontseite, mit Wasser bedeckt werden, das heißt, es muss eingetaucht werden.

Der Isolationswiderstand ist davor und danach zu messen und zu dokumentieren. Die Modul-/ Wassertemperatur muss über den Zeitraum stabil sein und ebenfalls dokumentiert werden.



Legende

Schwarz: PV-Modul ohne Schädigung der Isolation (Schwankungen resultieren aus dem Grenzbereich des Messinstruments).

Blau: PV-Modul mit auffälligem Verlauf des Isolationswiderstands. Anzumerken ist hier, dass der Wert nach 48 h noch oberhalb des Mindestwertes ($40 \text{ M}\Omega \text{ m}^2$) war.

Bild 9 – Typische Verläufe des Isolationswiderstands während der Langzeitbenässung

5.8.4 Kriterien zum Bestehen der Isolationsprüfung

Der gemessene Wert für Module, die größer als $0,1 \text{ m}^2$ sind, muss mindestens, gemäß DIN EN IEC 61215-2 (VDE 0126-31-2), $40 \text{ M}\Omega \text{ m}^2$ bei $23 \text{ }^\circ\text{C}$ betragen (Beispiel: ein $1,7 \text{ m}^2$ großes Modul muss mindestens einen Isolationswert von $23,5 \text{ M}\Omega$ aufweisen).

6 Prüfbericht

Nach dem Abschluss der Prüfungen ist ein Prüfbericht vorzulegen. Dieser Prüfbericht muss die folgenden Angaben (siehe auch DIN EN IEC 62446-1 (VDE 0126-23-1):2019-04, Abschnitt 9) enthalten.

6.1 Systemdaten

6.1.1 Grundlegende Systemangaben

Die folgenden grundlegenden Systemangaben sind als Mindestangaben bereitzustellen. Nachfolgende Angaben auf dem Typenschild stehen im Regelfall auf dem Deckblatt der Systemdokumentation.

- Projektidentifikation (sofern anwendbar);
- Bemessungsleistung des Systems (nach dem Typenschild) (kW DC oder kVA AC);
- PV-Module und Wechselrichter – Hersteller, Modell und Anzahl;
- Installationsdatum;
- Datum der Inbetriebnahme;
- Name des Kunden;
- Anschrift des Aufstellungsorts.

6.1.2 Angaben über Systementwickler und -installateur(e)

Die folgenden Angaben sind als Mindestumfang allen Beteiligten zur Verfügung zu stellen. Sind mehrere Unternehmen an der Entwicklung und des Baus des Systems beteiligt, sollten für alle Unternehmen, gemeinsam mit einer Beschreibung ihrer Aufgabe im Projekt, die folgenden Angaben bereitgestellt werden:

- Systementwickler / -installateur, Unternehmen;
- Systementwickler/ -installateur, Ansprechpartner;

- c) Systementwickler/ -installateur, Postanschrift, Telefonnummer und E-Mail-Adresse.

6.1.3 Angaben über Systembetreiber und Wartungsbetrieb(e): O&M

Die folgenden Informationen sind als Mindestumfang allen Beteiligten im Bereich O&M zur Verfügung zu stellen. Sind mehrere Unternehmen an der Installation des Systems beteiligt, sollten für alle Unternehmen, gemeinsam mit einer Beschreibung ihrer Aufgabe im Projekt, die folgenden Angaben bereitgestellt werden:

- a) Systembetreiber und Wartungsbetrieb(e), Unternehmen;
- b) Systembetreiber und Wartungsbetrieb(e)r, Ansprechpartner;
- c) Systembetreiber und Wartungsbetrieb(e), Postanschrift, Telefonnummer und E-Mail-Adresse.

6.2 Angaben zum Prüfer / zur Prüferin und der Ausrüstung

Die folgenden Informationen zum Prüfer / zur Prüferin und der Ausrüstung sind allen Beteiligten zur Verfügung zu stellen:

- a) Name des Prüfers / der Prüferin, Unternehmen, Postanschrift, Telefonnummer und E-Mail-Adresse, ggf. Schulungsnachweise und Zertifikate
- b) Ausrüstung: verwendete Geräte wie z. B. Kameras, Spektrometer inklusive Spezifikationen und Kalibrationen, ggf. Datenbank für Materialabgleich

6.3 Dokumentation der Auffälligkeiten

Vorgefundene Auffälligkeiten bzw. einzelne Fehler müssen vollständig mittels Seriennummer und Position in der PV-Anlage und detaillierter Fehler- und Charakterisierungsbeschreibung dokumentiert werden. Hier kann z. B. zur Vereinfachung auf die Nummern in den Tabellen (A-xy, B-xy, C-xy und D-xy) aus dieser VDE SPEC verwiesen werden.




Bei Serienfehlern müssen exemplarische Bilder mit Verweis auf die genaue Position in der Anlage angegeben werden und alle betroffenen Module müssen mittels Seriennummer dokumentiert werden (z. B. über vorhandene Liste aus der Installation).

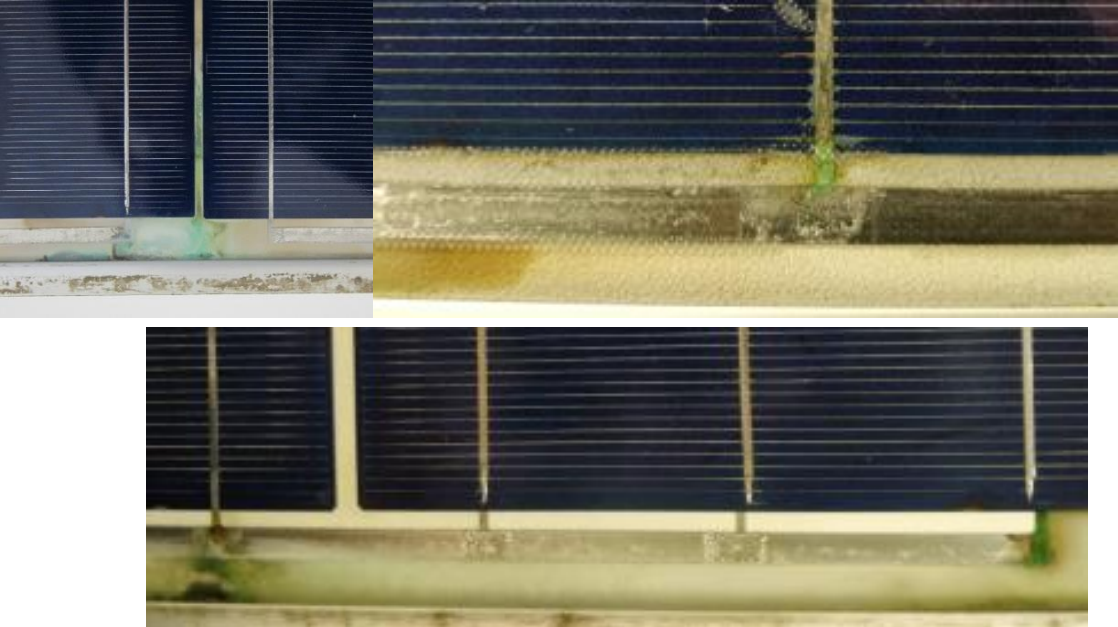

Die folgenden Einzelheiten müssen jeder Beobachtung beigelegt werden:

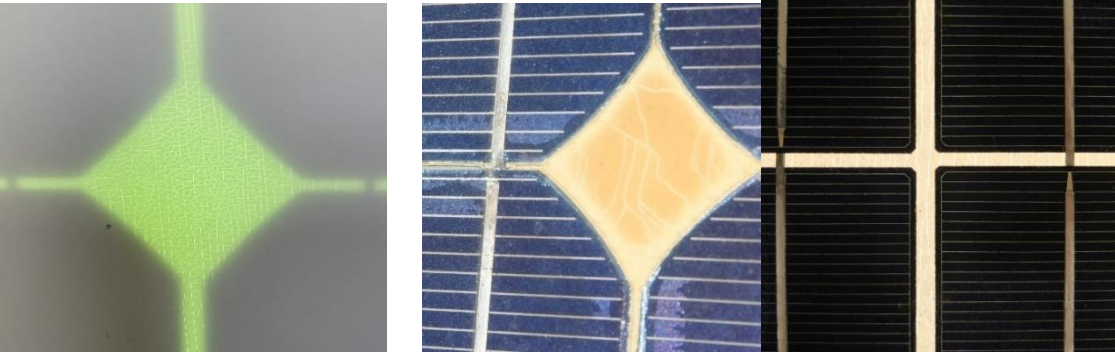
- a) umfassende Beschreibung des Objekts;
- b) Dateiname und Datum der Aufnahme des Fotos;
- c) bei der Nutzung spezieller Charakterisierungsmethoden ist das Messinstrument und ggf. die Referenzierungskette anzugeben;
- d) falls Sofortmaßnahmen erforderlich sind, muss neben dem Fehler auch die entsprechende Handlungsempfehlung beschrieben werden;
- e) bei besonders sicherheitskritischen Auffälligkeiten ist speziell auf das Risiko und mögliche weitere Vorgehensweisen hinzuweisen; dazu gehört unter anderem die Information an Betreiber und Lieferanten.

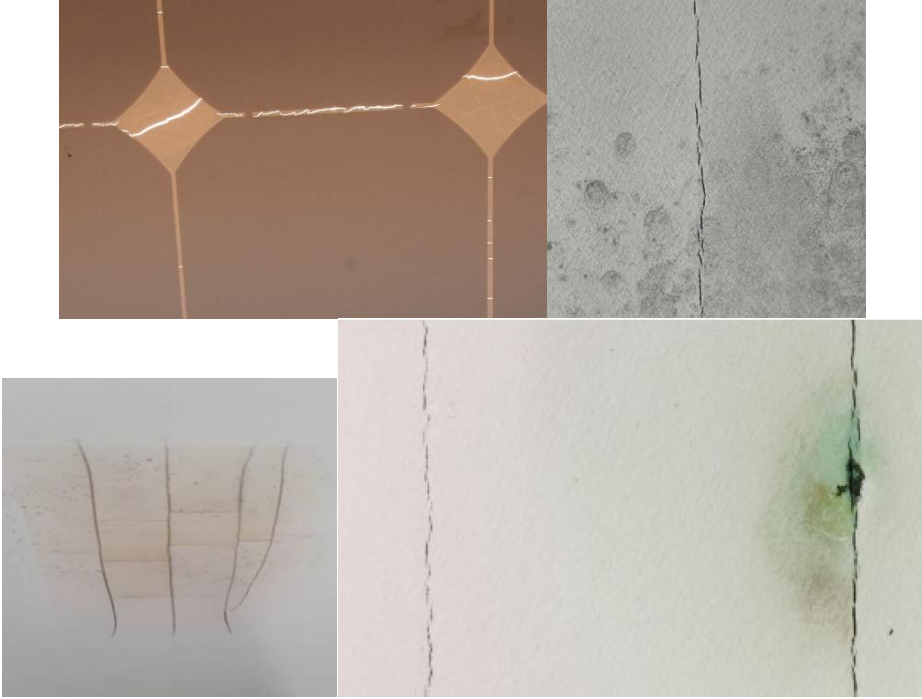
Anhang A: Beispielbilder der Klassifizierung bekannter Backsheet-Defekte


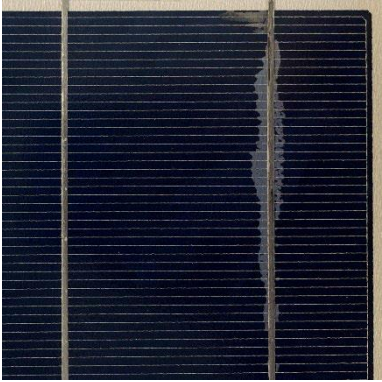
Tabelle 3 – Beispielbilder der Klassifizierung bekannter Backsheet-Defekte

Referenznummer	Beschreibung	Beispielbilder	
A-01	Keine optischen Auffälligkeiten auf der Rückseite, keine Verfärbung, kein Abkreiden, keine Beschädigungen, auch von der Frontseite des Moduls sichtbar (z. B. Delamination in den Ecken, oder kleine Risse).	keine	
A-02	Abkreiden / Chalking. Typischerweise fast alle Module betroffen.		
A-03	Leichte Verfärbungen (browning, yellowing), keine Versprödung / Rissbildung sichtbar, sonst Klassen 5-7 (siehe Abschnitt 5.6). Typischerweise nur einzelne Module betroffen.		

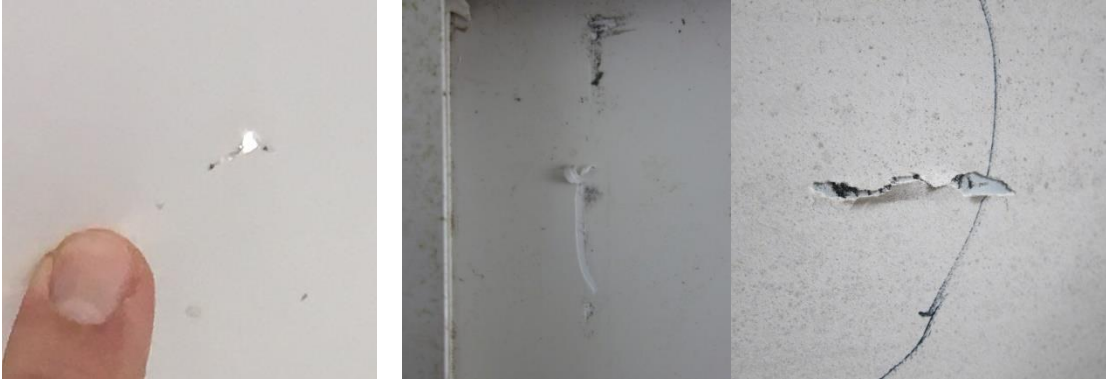
Referenznummer	Beschreibung	Beispielbilder
A-04	Korrosionserscheinungen der elektrischen Verbinder.	
A-05	<p>Risse in der Rückseitenfolie: Luftseite (outer surface).</p> <p>Typischerweise fast alle Module betroffen, wenn nicht ausgelöst durch schadhafte einzelne Zellen.</p>	


Referenznummer	Beschreibung	Beispielbilder
A-06	<p>Risse in der Rückseitenfolie: Laminatsseite (inner surface)</p> <p>Typischerweise fast alle Module betroffen, wenn nicht ausgelöst durch schadhafte einzelne Zellen.</p>	

Referenznummer	Beschreibung	Beispielbilder
A-07	<p>Risse in der Rückseitenfolie: durchgehend</p> <p>Typischerweise fast alle Module betroffen, wenn nicht ausgelöst durch schadhafte einzelne Zellen.</p>	

Referenznummer	Beschreibung	Beispielbilder
		
A-08	<p>Delaminationen I: kleinere Blasen in der Mitte des Moduls, keine direkte Gefährdung der elektrischen Isolation.</p>	

Referenznummer	Beschreibung	Beispielbilder
A-09	<p>Delaminationen II:</p> <p>großflächige oder am Rand liegend: Delaminationen am Rand reduzieren die Luft- / Kriechstrecken durch Feuchteintrag. Großflächige Delaminationen können zu großflächiger Freilegung von elektrischen Teilen im Laminat führen und sind daher ein inhärentes elektrisches Sicherheitsrisiko.</p>	

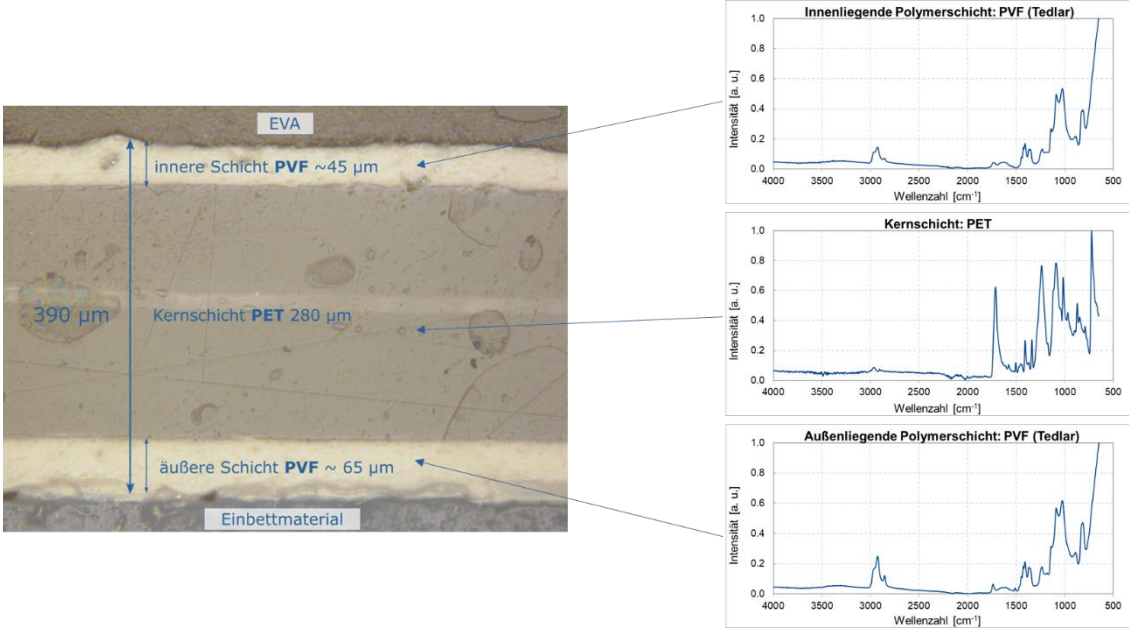
Referenznummer	Beschreibung	Beispielbilder
A-10	<p>Mechanische Schäden:</p> <p>durch Werkzeuge oder / und Steinschlag oder / und andere mechanische Einwirkungen (Tiere, Reinigung, Wartungsarbeiten).</p> <p>Typischerweise nur einzelne Module betroffen.</p>	

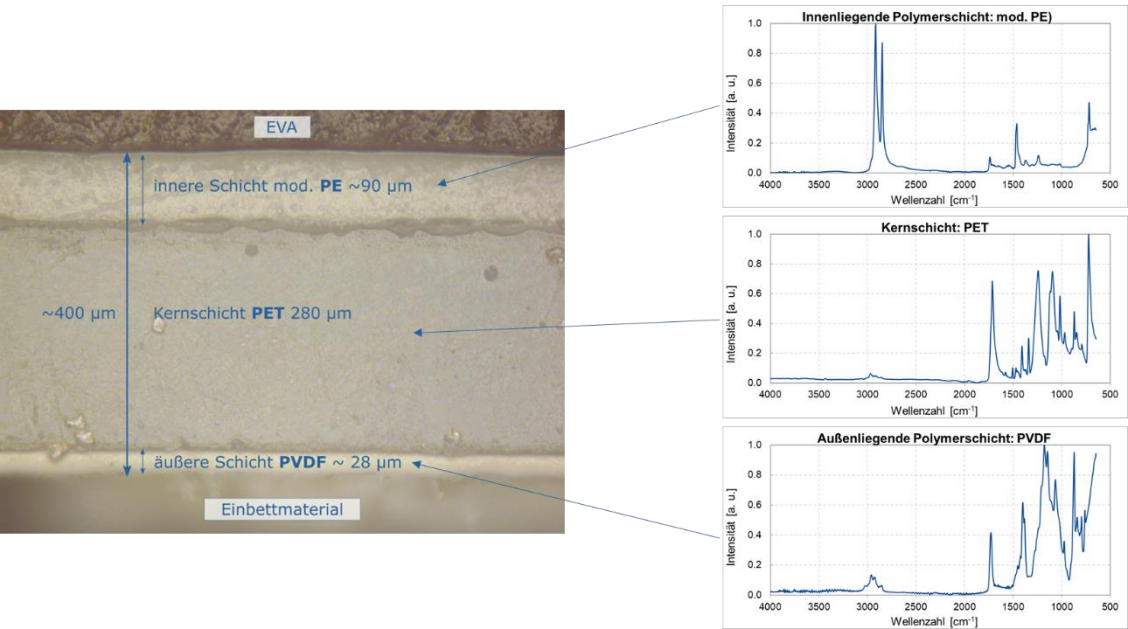
Referenznummer	Beschreibung	Beispielbilder
A-11	<p>Brandstellen.</p> <p>Typischerweise nur einzelne Module betroffen.</p>	 <p>The 'Beispielbilder' section contains four photographs illustrating fire damage on solar panels. The top-left image shows a large, dark, charred circular spot on a green solar panel. The top-middle image shows a small, dark hole in a white panel. The top-right image shows a white panel with a hole and several cracks. The bottom-left image shows a white panel with two small, dark spots. The bottom-right image shows a green panel with a large, dark, vertical crack.</p>

Anhang B: Charakterisierungsbeispiele bekannter Backsheet-Defekte mittels FTIR-Spektroskopie

Tabelle 4 – Charakterisierungsbeispiele bekannter Backsheet-Defekte mittels FTIR-Spektroskopie

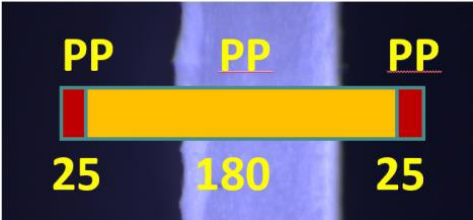
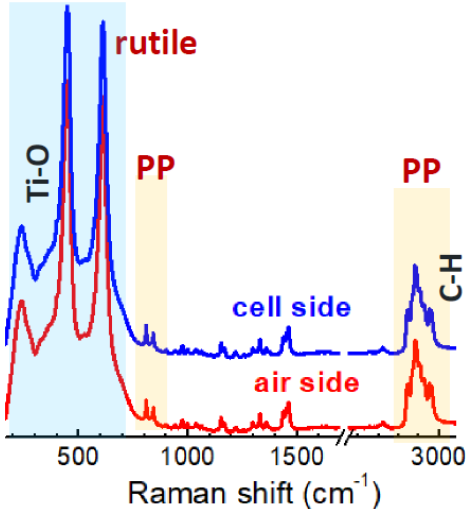
Referenznummer	Beschreibung	Beispiel
B-01 Polyamid (AAA)	<p>Backsheet (RSF) mit 3-lagigem coextrudierten Polyamid (PA-PA-PA).</p> <p>Die Folien wurden unter dem Handelsnamen AAA® vom Hersteller Isovolta vertrieben.</p>	 <p>The micrograph shows a cross-section of the backsheet with the following layers and labels:</p> <ul style="list-style-type: none"> EVA (top layer) Inner Schicht ~40 µm (middle layer, indicated by a blue arrow) 365 µm (total thickness of the polyamide core, indicated by a blue arrow) RSF "AAA" (middle layer, indicated by a blue arrow) äußere Schicht ~35 µm (bottom layer, indicated by a blue arrow) Einbettmaterial (bottom layer) <p>Three FTIR spectra are shown on the right, corresponding to the layers:</p> <ul style="list-style-type: none"> Innenliegende Polymerschicht: PA (top spectrum) RSF Kernschicht: PA (middle spectrum) Außenliegende Polymerschicht: PA (bottom spectrum) <p>Each spectrum plots Intensity [a. u.] on the y-axis (0.0 to 1.0) against Wavenumber [cm⁻¹] on the x-axis (4000 to 500). The spectra show characteristic peaks for polyamide, with the most prominent peaks around 3300, 1650, and 1550 cm⁻¹.</p>

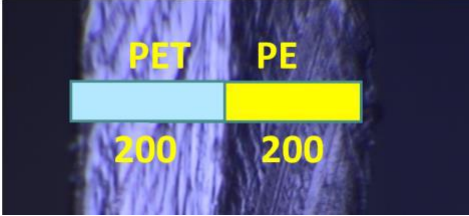
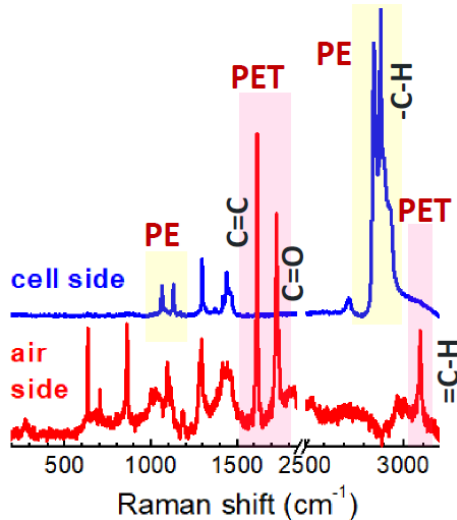
Referenznummer	Beschreibung	Beispiel
B-02 TPT	Backsheet (RSF) mit 3-lagigem Aufbau. Außenliegende Polymerschicht PVF (Tedlar®), Kernschicht PET, innenliegende Polymerschicht PVF (Tedlar®).	 <p>The image displays a microscopic cross-section of a three-layer backsheet (TPT) and its corresponding IR spectra. The cross-section shows the following layers from top to bottom: EVA, an inner PVF layer (~45 μm thick), a PET core layer (280 μm thick), an outer PVF layer (~65 μm thick), and bedding material. The total thickness of the three polymer layers is 390 μm. Three IR spectra are provided, each showing Intensity [a.u.] on the y-axis (0.0 to 1.0) and Wavenumber [cm⁻¹] on the x-axis (4000 to 500). The top spectrum is for the inner PVF layer, the middle for the PET core, and the bottom for the outer PVF layer. Arrows connect the spectra to their respective layers in the cross-section.</p>

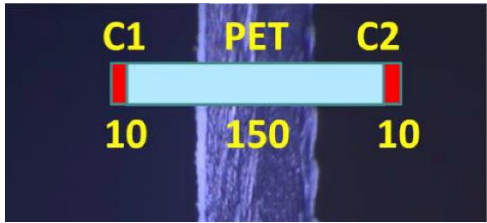
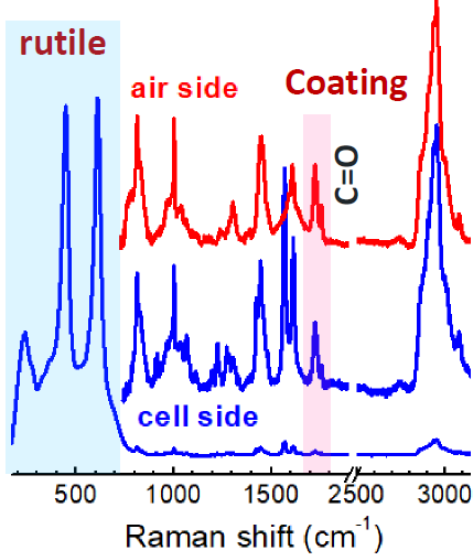
Referenznummer	Beschreibung	Beispiel
B-03 PVDF-PET-PE	Backsheet mit 3-lagigem Aufbau. Außenliegende Polymerschicht PVDF, Kernschicht PET, innenliegende Polymerschicht mod. PE.	 <p>The figure shows a cross-section of a 3-layered backsheet structure. The layers are labeled as follows:</p> <ul style="list-style-type: none"> EVA (top layer) innere Schicht mod. PE ~90 µm (middle layer) Kernschicht PET 280 µm (core layer) äußere Schicht PVDF ~28 µm (outer layer) Einbettmaterial (bottom layer) <p>The total thickness of the three polymer layers is indicated as ~400 µm. To the right of the micrograph are three IR spectra corresponding to the layers:</p> <ul style="list-style-type: none"> Innenliegende Polymerschicht: mod. PE: Shows characteristic peaks for polyethylene, including a sharp peak at approximately 2900 cm⁻¹ and a peak at 1470 cm⁻¹. Kernschicht: PET: Shows characteristic peaks for polyethylene terephthalate, including a sharp peak at approximately 1720 cm⁻¹ and a peak at 1510 cm⁻¹. Außenliegende Polymerschicht: PVDF: Shows characteristic peaks for polyvinylidene fluoride, including a sharp peak at approximately 1780 cm⁻¹ and a peak at 1510 cm⁻¹.

Anhang C: Charakterisierungsbeispiele bekannter Backsheet-Defekte mittels Raman-Spektroskopie

Tabelle 5 – Charakterisierungsbeispiele bekannter Backsheet-Defekte mittels Raman-Spektroskopie

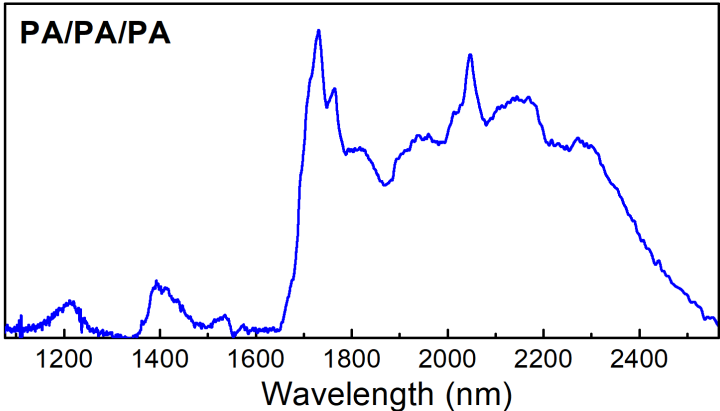
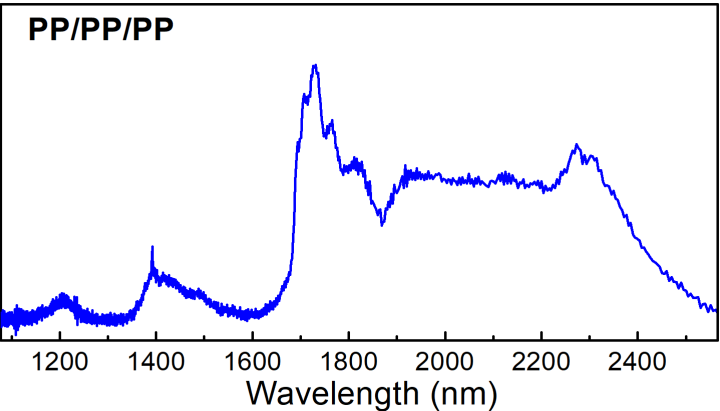
Referenznummer	Beschreibung	Beispiel
C-01	<p>Kombination von einem Polymer, hier PP.</p> <p>Aufbau:</p>  <p>Spektren sind einmal von der Luftseite und einmal von der Zellseite der Rückseitenfolie aufgenommen.</p> <p>Rutil ist für die weiße Farbe verantwortlich.</p>	

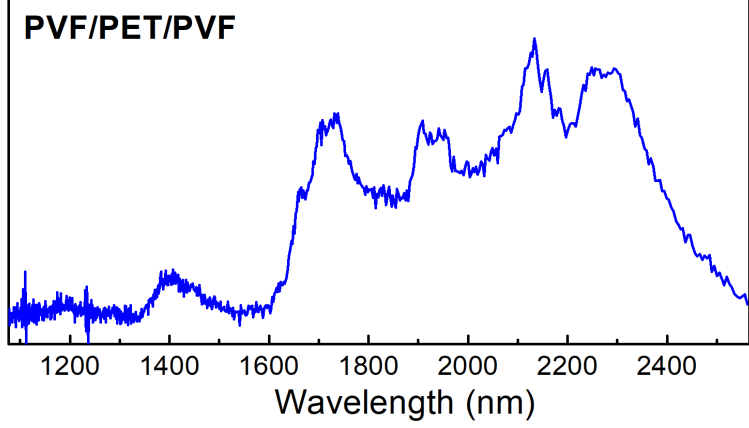
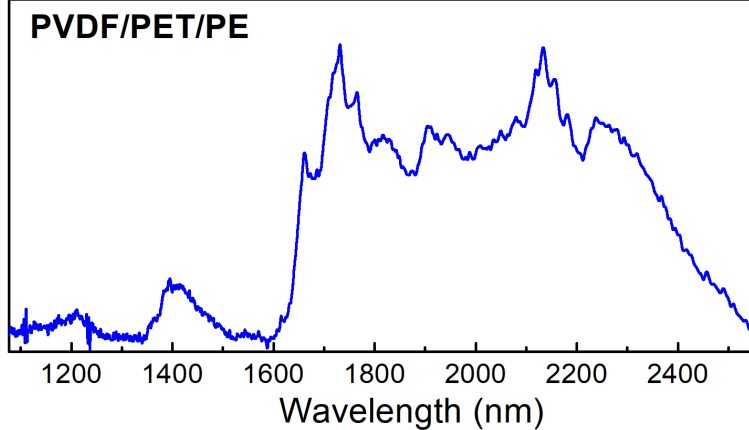
Referenznummer	Beschreibung	Beispiel
C-02	<p data-bbox="309 292 936 317">Kombination von zwei Polymeren, hier PET und PE.</p>  <p data-bbox="309 571 936 632">Spektren sind einmal von der Luftseite und einmal von der Zellseite der Rückseitenfolie aufgenommen.</p>	

Referenznummer	Beschreibung	Beispiel
C-03	<p data-bbox="309 292 936 317">Kombination von drei Polymeren und einem Coating (C).</p>  <p data-bbox="309 580 936 635">Spektren sind einmal von der Luftseite und einmal von der Zellseite der Rückseitenfolie aufgenommen.</p> <p data-bbox="309 660 936 715">Spektren sind einmal von der Luftseite und einmal von der Zellseite der Rückseitenfolie aufgenommen.</p> <p data-bbox="309 740 936 762">Rutil ist für die weiße Farbe verantwortlich.</p>	 <p data-bbox="1249 292 1720 852">The figure displays Raman spectra for two different sides of a sample: 'air side' (red line) and 'cell side' (blue line). The x-axis represents the Raman shift in cm⁻¹, ranging from 500 to 3000. Two regions are highlighted: 'rutile' (around 500-1000 cm⁻¹) and 'Coating' (around 1500-3000 cm⁻¹). A vertical pink line marks a peak at approximately 1700 cm⁻¹, labeled 'C=O'. The 'rutile' region shows characteristic peaks for both sides, while the 'Coating' region shows a significant peak on the 'air side' and a much smaller one on the 'cell side'.</p>

Anhang D: Charakterisierungsbeispiele bekannter Backsheet-Defekte mittels NIRA-Spektroskopie

Tabelle 6 – Charakterisierungsbeispiele bekannter Defekte mittels NIRA-Spektroskopie

Referenznummer	Beschreibung	Beispiel
D-01	<p>Backsheet mit 3-lagigem coextrudierten Polyamid (PA-PA-PA). Die Folien wurden unter dem Markennamen AAA® vom Hersteller Isovolta vertrieben.</p>	 <p>The figure shows the NIRA spectrum for a 3-layer coextruded polyamide (PA/PA/PA) backsheet. The y-axis is labeled 'Absorbance' and the x-axis is 'Wavelength (nm)' ranging from 1200 to 2400. The spectrum exhibits several characteristic absorption bands: a small peak at ~1200 nm, a medium peak at ~1400 nm, a very sharp and intense peak at ~1700 nm, a secondary peak at ~1800 nm, a broad absorption region between 1900 and 2200 nm, and a final peak at ~2200 nm.</p>
D-02	<p>Backsheet mit 3-lagigem coextrudierten Polypropylen (PP-PP-PP).</p>	 <p>The figure shows the NIRA spectrum for a 3-layer coextruded polypropylene (PP/PP/PP) backsheet. The y-axis is labeled 'Absorbance' and the x-axis is 'Wavelength (nm)' ranging from 1200 to 2400. The spectrum shows characteristic absorption bands: a small peak at ~1200 nm, a medium peak at ~1400 nm, a very sharp and intense peak at ~1700 nm, a secondary peak at ~1800 nm, a broad absorption region between 1900 and 2200 nm, and a final peak at ~2200 nm.</p>

Referenznummer	Beschreibung	Beispiel
D-03	Baksheet mit 3-lagigem Aufbau. Außenliegende Polymerschicht PVF (Tedlar®), Kernschicht PET, innenliegende Polymerschicht PVF (Tedlar®).	 <p>PVF/PET/PVF</p> <p>The graph shows the absorbance spectrum for a three-layer structure of PVF/PET/PVF. The x-axis is labeled 'Wavelength (nm)' and ranges from 1200 to 2400 with major ticks every 200 nm. The y-axis is labeled 'Absorbance'. The spectrum shows a broad absorption band starting around 1600 nm, with a primary peak at approximately 1750 nm and a secondary peak at approximately 2150 nm. There are also smaller peaks at approximately 1400 nm and 1850 nm.</p>
D-04	Baksheet mit 3-lagigem Aufbau. Außenliegende Polymerschicht PVDF, Kernschicht PET, innenliegende Polymerschicht mod. PE.	 <p>PVDF/PET/PE</p> <p>The graph shows the absorbance spectrum for a three-layer structure of PVDF/PET/PE. The x-axis is labeled 'Wavelength (nm)' and ranges from 1200 to 2400 with major ticks every 200 nm. The y-axis is labeled 'Absorbance'. The spectrum shows a broad absorption band starting around 1600 nm, with a primary peak at approximately 1750 nm and a secondary peak at approximately 2150 nm. There are also smaller peaks at approximately 1400 nm and 1850 nm.</p>

VDE Verband der Elektrotechnik
Elektronik Informationstechnik e.V.

Merianstraße 28
63069 Offenbach am Main
Tel. +49 69 6308-0
service@vde.com
www.vde.com

VDE