



**Fachbereich Ingenieur- und Naturwissenschaften  
Fachgebiet Maschinenbau Produktionstechnik**

**Bachelorarbeit**  
zur Erlangung des Grades Bachelor of Engineering (B.Eng)

Thema der Arbeit

**Anwendung und Charakterisierung  
von Leitklebstoffverbindungen für  
gebäudeintegrierte  
Photovoltaik-Fassadenelemente**

vorgelegt bei  
Prof. Dr. Christoph Sammler  
Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Ringo Köpge

eingereicht von:  
Nick Schröter  
Matrikel-Nr.: 26221

Abgabedatum:  
14.02.2025

# Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur . . . . .	II
Zielstellung der Arbeit . . . . .	IV
Abstract . . . . .	V
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Erneuerbare Energie: Photovoltaik . . . . .	2
1.2 Motivation . . . . .	2
1.3 Aufgabenstellung . . . . .	4
<b>2 Grundlagen</b>	<b>5</b>
2.1 Photovoltaik-Module . . . . .	5
2.1.1 Stringfertigung . . . . .	7
2.1.2 Modulfertigung . . . . .	10
2.1.3 Modulcharakterisierung . . . . .	12
2.2 Leitklebstoffe . . . . .	19
2.2.1 Eigenschaften und Anwendung von Leitklebstoffen . . . . .	19
2.2.2 Klebstoffcharakterisierung . . . . .	19
<b>3 Durchführung</b>	<b>26</b>
3.1 Versuchsplan . . . . .	26
3.2 Probenübersicht . . . . .	29
3.2.1 Materialien . . . . .	29
3.2.2 Probenherstellung . . . . .	32
3.3 Prozesse . . . . .	33
3.3.1 Stringen . . . . .	33
3.3.2 Lamination . . . . .	38
3.4 Charakterisierung . . . . .	40
3.4.1 Klebstoffcharakterisierung . . . . .	40
3.4.2 Modulcharakterisierung . . . . .	44
<b>4 Ergebnisse</b>	<b>47</b>
4.1 Stringen . . . . .	47
4.2 Lamination . . . . .	51
4.3 Charakterisierung . . . . .	53
4.3.1 Klebstoffcharakterisierung . . . . .	53
4.3.2 Modulcharakterisierung . . . . .	65
<b>5 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>74</b>
Abbildungsverzeichnis . . . . .	75
Tabellenverzeichnis . . . . .	78
Literaturverzeichnis . . . . .	79
Eidesstattliche Erklärung . . . . .	81
Danksagung . . . . .	82
Anlagenverzeichnis . . . . .	83
Anlagen . . . . .	84

# Nomenklatur

## Formelverzeichnis

<b>Zeichen</b>	<b>Bedeutung</b>	<b>Einheit</b>
$A_{mod}$	Modulfläche	$m^2$
$E_{STC}$	Bestrahlungsstärke unter Standard-Testbedingungen	$\frac{W}{m^2}$
$F$	Schälkraft	N
$FF$	Füllfaktor	dimensionslos
$I_{mpp}$	Stromstärke am maximalen Leistungspunkt	A
$I_{sc}$	Kurzschlussstrom	A
$P_{mpp}$	Leistung am maximalen Leistungspunkt	W
$R_S$	Serienwiderstand	%
$T$	Temperatur	$^{\circ}\text{C}$
$T_{i,r}$	Temperaturpunkt des Reaktionsbeginns in der DSC-Messung	$^{\circ}\text{C}$
$T_{f,r}$	Temperaturpunkt des Reaktionsendes in der DSC-Messung	$^{\circ}\text{C}$
$T_{p,r}$	Peaktemperatur in der DSC-Messung	$^{\circ}\text{C}$
$V_{mpp}$	Spannung am maximalen Leistungspunkt	V
$V_{oc}$	Leerlaufspannung	V
$W$	Mittlere Breite des Klebstoffs zwischen Verbin-der und Zelle	mm
$\eta_{mod}$	Modulwirkungsgrad	%
$\eta_{front}$	vorderseitige Modulwirkungsgrad	%
$\eta_{back}$	rückseitige Modulwirkungsgrad	%
$dQ/dt$	Wärmestrom bezogen auf die Probenmasse	$\frac{W}{g}$
$\Delta H$	Änderung der Enthalpie	J
$\sigma_{180^{\circ}}$	Schälfestigkeit bei einem Abzugswinkel von $180^{\circ}$	$\frac{N}{mm}$

## Abkürzungsverzeichnis

<b>Zeichen</b>	<b>Bedeutung</b>
$ACA$	anisotrope Leitklebstoffe
$BB$	Busbars
$BIPV$	building integrated photovoltaic - gebäudeintegrierte Photo-voltaik
$C$	Charge
$C1$	Fassadenmodul Probenkörper Nr.1
$CO_2$	Kohlenstoffdioxid
$DH$	Damp Heat - Feucht Hitze
$DSC$	Differential Scanning Calorimetry - Dynamische Differenz Kalorimetrie
$ECA$	Electrically Conductive Adhesives - elektrisch leitfähige Klebstoffe bzw. Leitklebstoff
$ECA1$	Klebstoffproben des Acrylat-Klebstoffs
$ECA2$	Klebstoffproben des Epoxid-Klebstoffs

<b>Zeichen</b>	<b>Bedeutung</b>
<i>EL</i>	Elektrolumineszenz
<i>EU</i>	Europäische Union
<i>EVA</i>	Ethylenvinylacetat
<i>GF</i>	Glasfaser
<i>HF</i>	Humidity Freeze - Gefrieren bei Feuchtigkeit
<i>HMI</i>	Human Machine Interface - Bedienoberfläche der Maschine
<i>ICA</i>	isotrope Leitklebstoffe
<i>ID</i>	Identifikation (Nummer)
<i>IR</i>	Infrarot
<i>I – U – bzw. I – V – Kennlinie</i>	Strom-Spannungs-Kennlinie
<i>MPE</i>	Hochleistungspolymer (lineare Metallocene)
<i>MPP</i>	Maximum Power Point - maximaler Leistungspunkt
<i>P – U – Kennlinie</i>	Leistung-Spannungs-Kennlinie
<i>PM</i>	Prozessmodul
<i>POE</i>	Polyolefin Elastomer
<i>pn</i>	positiv-negativ
<i>PV</i>	Photovoltaik
<i>PV – Anlagen</i>	Photovoltaikanlagen
<i>PV – Modul</i>	Photovoltaikmodul
<i>RoHS</i>	Restriction of Hazardous Substances - Beschränkung (der Verwendung) gefährlicher Stoffe
<i>SHJ</i>	Silizium-Heterojunction
<i>SnPb37</i>	Zinn-Blei-Legierung mit 37% Anteil von Blei
<i>STC</i>	standard test conditions - Standardtestbedingungen
<i>TC</i>	Temperature Cycling - Temperaturzyklen
<i>US</i>	United States - Vereinigte Staaten (Amerika)
<i>UV</i>	Ultraviolet
<i>WLC</i>	Wet Leakage Current - Nasser Kriechstrom

# Zielstellung der Arbeit



## Fachbereich Ingenieur- und Naturwissenschaften

Prof. Dr. Christoph Sammler  
Eberhard-Leibnitz-Straße 2  
06217 Merseburg  
Telefon + 49 3461 46-2018  
[christoph.sammler@hs-merseburg.de](mailto:christoph.sammler@hs-merseburg.de)

## Aufgabenstellung für die Bachelorarbeit

**Thema:** Anwendung und Charakterisierung von Leitklebstoffverbindungen für gebäudeintegrierte Photovoltaik-Fassadenelemente

**Bearbeiter:**

Nick Schröter

**Themenstellender Hochschullehrer:**

Prof. Dr. Christoph Sammler

**Betrieblicher Betreuer:**

Dipl.-Ing. Ringo Köpge

Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik CSP, Otto-Eißfeldt-Straße 12, 06120 Halle

Aktuell gelten für Solarmodule in Europa Sonderregelungen, welche es erlauben bleihaltige Lötverbindungen zu verwenden. Ein Auslaufen dieser Sonderregelung ist zu erwarten. Zudem fordert die Anwendung neuer Solarzellkonzepte Niedertemperatur-Verbindungsprozesse, welche durch Lötverbindungen zum Teil nicht realisiert werden können. Leitfähige Klebstoffe (ECA - Electrically Conductive Adhesives) werden derzeit zunehmend in die Solarmodulfertigung genutzt (aktuell ca. 5% Marktanteil). Die „International Technology Roadmap for Photovoltaic“ prognostiziert einen Zuwachs des Marktanteiles von ECA's und was der Bewertung dieser Neuartige Verbindungstechnologie erfordert.

### Teilaufgaben:

1. Literaturstudie in rezensierten Fachzeitschriften und in der aktuellen wissenschaftlichen Literatur zum Thema Leitklebstoffverbindungen in der Photovoltaik Industrie
2. Versuchsplanung bezüglich Anwendung von Leitklebstoffen zur Zell-Stringfertigung sowie zur qualitativen und quantitativen Charakterisierung der Verbindungsqualität
3. Herstellung von Zell-Strings in einem industrienahen ECA Stringer bis hin zur Fertigung funktionsfähiger Solarmodule, Durchführung von Untersuchungen zur Bewertung des Fertigungsprozesses und der Qualität
4. Wissenschaftliche Auswertung der gewonnenen Erkenntnisse sowie schriftliche Dokumentation der Ergebnisse entsprechend den Vorgaben für die Erstellung einer Bachelorarbeit (Abgabe von zwei gebundenen Exemplaren)

abzugebende Exemplare: 2 + pdf-Datei

Prof. Dr.-Ing. Beate Langer  
Vorsitzende des Prüfungsausschusses

Prof. Dr. Christoph Sammler  
Themenstellender Hochschullehrer

## **Abstract**

This study focuses on the development and evaluation of lead-free photovoltaic facade modules, with an emphasis on their reliability. The core objective is to utilize electrically conductive adhesives (ECA) as an alternative to traditional soldered connections. The aim is to investigate the properties and durability of these modules through innovative manufacturing techniques and comprehensive testing methods to assess their suitability for facade applications.

Initially, the characterization of the adhesives is carried out using Differential Scanning Calorimetry (DSC) to identify optimal curing parameters. The mechanical stability of the string interconnections is evaluated through peel tests, while climate tests according to DIN EN 61730 and IEC 61215 standards assess the modules' resistance to environmental influences. Soldered connections and various adhesive types, including epoxy- and acrylate-based variants, are also compared. The modules are manufactured using specific material combinations and lamination processes, which are subsequently tested for defects such as cracks and contact issues. Electrical power measurements under standard test conditions show the power values and efficiencies that can be achieved by ECA-connected modules. However, the findings also highlight the impact of mechanical damage and manufacturing defects on performance, emphasizing the need for further cyclic stress testing.

This work not only contributes to the advancement of sustainable photovoltaic technologies but also provides valuable insights for the integration of lead-free modules into modern facade applications.

# 1 Einleitung

Seit dem Beginn der Industrialisierung ist eine Versorgung mit Energie unverzichtbar geworden. Energie, wie wir sie im normalen Alltag wahrnehmen, ist fast schon selbstverständlich. Die Bereitstellung, der für uns anwendbaren elektrischen Energie, erfolgt über Primärenergien. Dies können Ressourcen oder Energieträger wie Kohle oder Erdöl sein. Allerdings sind jene fossilen Energieträger endlich. Global betrachtet sind fossile Energieträger die am häufigsten verwendeten Primärenergien. Dies wird in Abbildung 1 verdeutlicht.

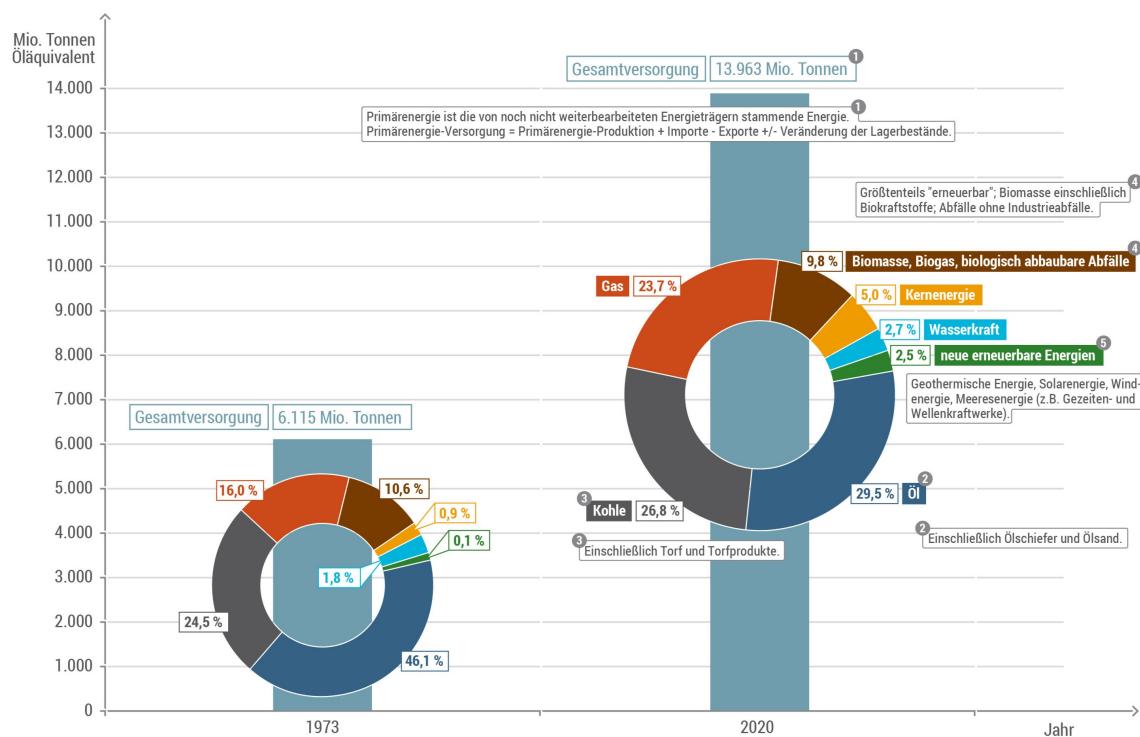


Abbildung 1: Statistischer Verbrauch und Verteilung verschiedener Primärenergien  
[1]

Es ist davon auszugehen, dass aktuell deutlich mehr als die Hälfte der Energie, durch fossile Rohstoffe erzeugt wird. Hinzu kommt ein massiver Zuwachs an gesamter benötigter Versorgungsenergie innerhalb von 47 Jahren um mehr als 200%. Das sind Hintergründe, die den Gedanken an erneuerbare Energie immer mehr Zuspruch geben sollten. Innerhalb der Grafik, lässt sich schon eine Realisierung dieses Gedankens vernehmen (Abbildung 1). Aber trotz eines erstaunlichen Zuwachses um das 25-Fache der erneuerbaren Energie von 1973 bis 2020, erscheinen anteilig 2,5% der globalen Energie noch nicht sehr viel. Mit dem steigenden Bedarf an Primärenergien und der Endlichkeit der Ressourcen, steht noch ein großes zu lösendes Problem bevor. Dieses Problem lässt irgendwann nicht mehr auf sich warten, da die Reichweite der fossilen Energieträger schätzungsweise noch 28 bis 64 Jahre anhalten wird. [2] Mögliche Auswirkungen könnten sich sowohl in der Wirtschaft als auch im politischen Bereich abzeichnen. Es existieren bereits verschiedene Ansätze, um die Reichweite der Rohstoffe zu verlängern. Bisher zeigen sich neue Wege der Gewinnung, neue Vorkommen oder alternative Ressourcen als fragwürdig. Zum Beispiel weist die Gewinnung synthetischen Erdöls einen hohen Energieaufwand auf. An dieser Stelle bietet sich die Ablösung fossiler Ressourcen vor allem durch erneuerbare Energien an. [2]

## 1.1 Erneuerbare Energie: Photovoltaik

Erneuerbare Energien sind Energiequellen, die sich auf natürliche Weise erneuern und somit unerschöpflich sind. Sie stellen eine nachhaltige Alternative zu fossilen Brennstoffen wie Kohle, Erdöl und Erdgas dar. Die wichtigsten Arten erneuerbarer Energien sind Wasserkraft, Biomasse, Erdwärme, Gezeiten-, Solar- und Windenergie. [3] Diese Energien spielen eine entscheidende Rolle bei der Bekämpfung des Klimawandels und der Reduzierung der Treibhausgasemissionen, da sie im Gegensatz zu fossilen Brennstoffen weitgehend  $CO_2$ -neutral sind. Der Einsatz erneuerbarer Energien bringt zahlreiche Vorteile mit sich, darunter die Reduzierung der Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen, die Schaffung von Arbeitsplätzen und die Förderung technologischer Innovationen. Dennoch gibt es auch Herausforderungen, wie die intermittierende Verfügbarkeit von Sonnen- und Windenergie sowie die Notwendigkeit von Energiespeichersystemen und dem Netzausbau. [4]

Photovoltaik ist eine Technologie zur Umwandlung von Sonnenlicht in elektrische Energie durch den Einsatz von Solarzellen. Die Bezeichnung Photovoltaik ist zusammengesetzt aus Photo (bezieht sich aus dem Griechischen auf das Wort Licht) und Volt, wie die physikalische Einheit der Spannung. Die Solarzellen bestehen meist aus Halbleitermaterialien wie kristallinem Silizium. Wenn Licht auf die Solarzelle trifft, wird ein elektrischer Strom durch den sogenannten photovoltaischen Effekt erzeugt. [5] Unter allen erneuerbaren Energieformen, hat sich die Solarenergie global gesehen mittlerweile sehr verbreitet. Als Vorteile der Solarenergie gelten neben der sauberen Energiegewinnung sowie der reichlichen Verfügbarkeit auch Faktoren wie Kontinuität, einfacher Betrieb und Installation. [6]

## 1.2 Motivation

Die Preisentwicklung von Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen) spielt schon immer eine wichtige Rolle. Sie ist ausschlaggebend für die Wettbewerbsfähigkeit gegenüber den fossilen Brennstoffen. Bei den Photovoltaikmodulen (PV-Modulen) liegt ein Kostenschwerpunkt in den Materialkosten. Durch neue Zelltechnologien, wie die Vergrößerung der Zellformate (z.B. M10), steigert sich die Leistung der Module. Gleichzeitig müssen die Module den Zellen angepasst und vergrößert werden, wodurch der Materialaufwand und damit der Modulpreis steigt. Daraus ergibt sich das Ziel, eine Leistungsvergrößerung der PV-Module zu erzeugen, ohne höhere Kosten zu verursachen. Ein leistungssteigernder Aspekt ist die Reduzierung von Verbindungsverlusten und die Verringerung von Widerstandsverlusten.

Einige PV-Module stellen einen Nachteil in der Flächennutzung dar. Bisher wird der Ausbau von Aufdachanlagen als die effizienteste Nutzungsform angesehen, da keine freien Flächen von nutzbarem Land blockiert werden. Das Blockieren kommt bei sogenannten Freiland-PV-Anlagen vor, welche zu den weltweit am häufigsten eingesetzten Formen von PV-Anlagen zählen. Neben den Aufdachanlagen, gibt es bereits einige Ansätze, um die Flächennutzung sinnvoller zu gestalten. Dazu zählen gebäudeintegrierte, schwimmende oder Landwirtschafts-PV-Anlagen. Eine besondere Form der gebäudeintegrierten PV-Module sind Fassadenmodule. Für den weltweiten Einsatz von gebäudeintegrierten PV-Anlagen wird in den nächsten 2-3 Jahren eine Steigerung um das Doppelte prognostiziert. In 10 Jahren soll der internationale Marktanteil bei ca. 5-10% liegen. Der Anteil der Aufdachanlagen soll in dieser Zeit konstant bleiben bei 25-30%. Für die klassischen PV-Freiflächen wird ein Rückgang des Marktanteils erwartet, welcher aber auch in 10 Jahren den globalen Markt mit etwa 53% dominieren soll. [7] Gegenüber herkömmlichen Freiland PV-Anlagen verbrauchen die Fassadenmodule keine frei nutzbaren Flächen, reduzieren Baumaterial und benötigen keine zusätzlichen Installationseinheiten (z.B. Stützschiene). [6]

Für die Produktion von Solarmodulen wird herkömmlich Blei für die Verbindung der Solarzellen eingesetzt (Kapitel 2.1.1). Diese Verbindungsart hat sich als zuverlässige und kosteneff

fiziente Methode durchgesetzt. [7] Doch die Besorgnis über den allgemeinen Einsatz von Blei hat deutlich zugenommen. Die US-Umweltschutzbehörde (Environmental Protection Agency) listet Blei als einen von 17 Stoffen auf, welche die größten Gefahren für den Mensch und die Umwelt darstellen. 2006 trat die EU-Richtlinie RoHS in Kraft. Diese schränkt die Verwendung von Blei in Elektrogeräten sowie Elektronik ein und wird voraussichtlich auch für PV-Module gelten. [8] Zusätzlich wurde 2011 die Richtlinie (RoHS 2) ergänzt. Dabei sind PV-Module nach wie vor von den festgelegten Grenzwerten ausgenommen. Allerdings gilt das nur solange die Komponenten fest installiert (z.B. Kraftwerke, Dächer, Gebäudeintegration usw.) sind. Handelt es sich um ein bewegliches Bauteil (z.B. mobile Ladeanwendung), würden die in der Richtlinie festgelegten Bedingungen für die Verwendung von Blei gelten. [7] Die Fertigung von Solarmodulen mit elektrisch leitfähigen Klebstoffen (ECAs) gewinnen im Gegensatz zu den gelöteten Zellverbindungen immer mehr an Popularität. Sie können bereits in verschiedenen PV-Technologien wie bei der Schindeltechnik verarbeitet werden. Außerdem erhalten sie eine besonderes Interesse für neuartige, oft temperaturempfindliche Hocheffizienz-Zelltypen wie die Silizium-Heterojunction-Technologie (SHJ). [9] Der weltweite

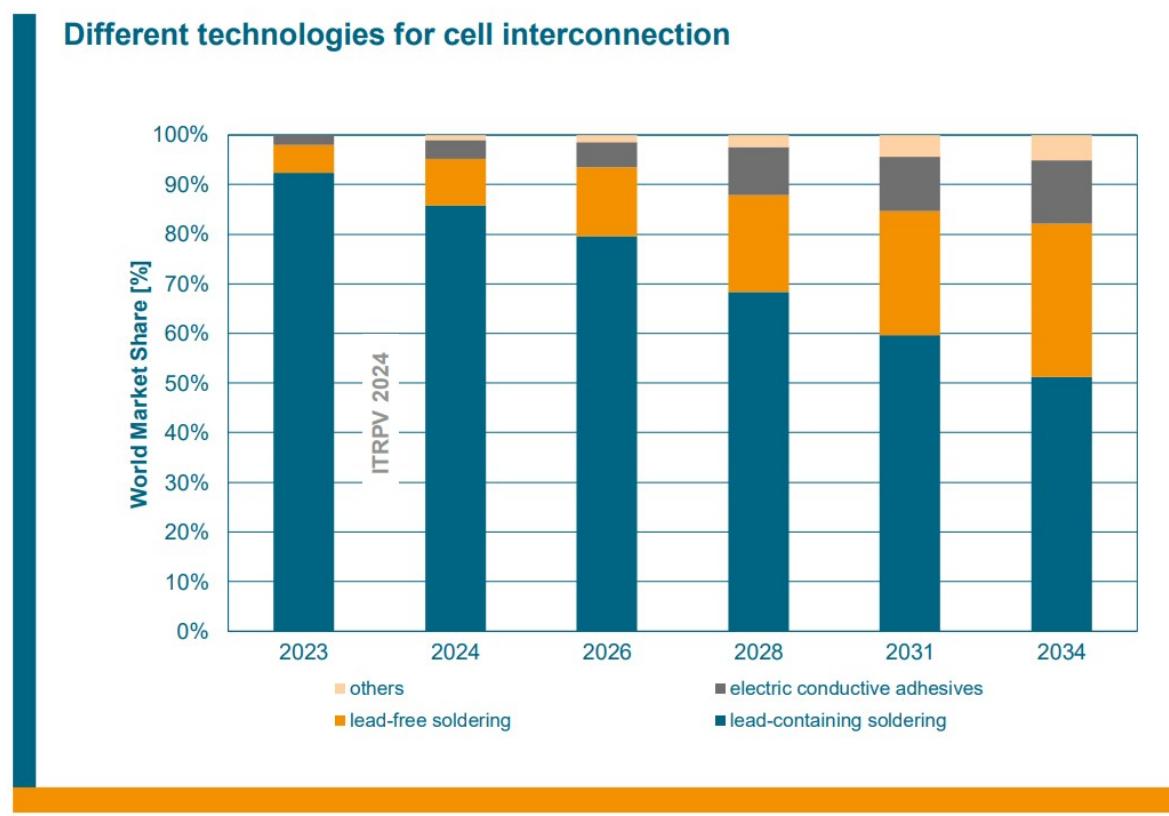


Abbildung 2: Prognostische Weltmarktanteil der verschiedenen Zellverbindungs-Technologien  
[7]

Marktanteil von Leitklebstoffen liegt im letzten Jahr bereits bei etwa 2% (Abbildung 2). In den nächsten 10 Jahren wird ein Marktanstieg auf ca. 13% erwartet. In Konkurrenz dazu steht die Methode des bleifreien Löten. Bei dieser Methode wird ein noch größerer Marktanteil von 31% im Jahr 2034 erwartet. Wobei der Zuwachs bei den geklebten ECA Verfahren größer ausfällt, da bereits derzeit 6% weltweiter Marktanteil dem bleifreien Löten zugesprochen ist. [7]

Die Anzahl der kommerziell erhältlichen Leitklebstoffe ist erheblich gestiegen und erhält eine höhere Marktakzeptanz. Dadurch entsteht eine gewisse Vielfalt auf dem Markt mit verschiedenen hergestellten ECAs, deren Eigenschaften sich maßgeblich unterscheiden können (Kapitel 2.2). [9] Die Produktionskosten von PV-Modulen werden mit solchen neuen Materialien und hochproduktiven Technologien gesenkt. Dabei müssen einige Informationen über den Prozess

und dessen Parameter gesammelt werden. Daraus können neue Erkenntnisse resultieren, welche die Produktivitätssteigerung vorantreiben. [7]

Aus der Verknappung und der aktuellen Verwendung von Ressourcen wird deutlich, wie bedeutend der Wechsel zu regenerativen Energiesystemen ist. Besonders die Solarenergie sticht dabei als bewährte Methode hervor. Aufgrund der Problematik der Flächenutzung sind Fassadenmodule als gebäudeintegrierte Module interessant. Diese Fassadenmodule sollen umweltschonend als bleifreie Kontaktierung gefertigt werden. Eine geeignete Variante stellt die Leitklebstoff-Verarbeitung dar.

### 1.3 Aufgabenstellung

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung von bleifreien Fassadenmodulen und der Konzeptionierung eines Vergleichsschemas hinsichtlich der Zuverlässigkeit der Fassadenmodule.

In den Bereichen der Modulproduktion und Charakterisierung findet eine aktuelle Recherche statt. Mit diesen erforderlichen Kenntnissen soll ein Versuchsablauf für die Fertigung und Bewertung von Leitklebstoff verbundenen Fassadenmodulen geplant werden. Für dessen Charakterisierung werden dabei verschiedene Messmethoden eingesetzt. Darunter findet für die Klebstoffcharakterisierung eine Dynamische Differenz Kalorimetrie-Messung und Schältests statt. Nach der Planung sollen die Fassadenmodule konzeptionell produziert und hinsichtlich der Qualität ausgewertet werden. Für die Qualitätsbewertung werden Standard-Klimatests durchgeführt. Die gewonnenen Ergebnisse gilt es anschließend auszuwerten sowie zu dokumentieren. Im Mittelpunkt steht die Produktion von Photovoltaik-Fassadenmodulen qualitätsbewertend sowie qualitätsgerecht mit einem Leitklebstoffverfahren im Schwerpunkt der Stringherstellung aus ökologisch motivierten Hintergrund zu gestalten und zu charakterisieren.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Photovoltaik-Module

Der äußere Photoeffekt wurde erstmals 1839 von Alexandre Edmond Becquerel entdeckt. Als Kombination des inneren Photoeffekts und dem pn (positiv-negativ)-Übergang wurde das Konzept des photovoltaischen Effekts entwickelt. Der pn-Übergang wird durch das Dotieren eines Halbleiters, das beinhaltet das Einbringen von Fremdatomen, realisiert. Mit diesem erzeugten elektrischen Feld findet bei Lichteinfall der Transport der gelösten Ladungsträger über die äußeren Kontakte statt (Abbildung 3). [2]

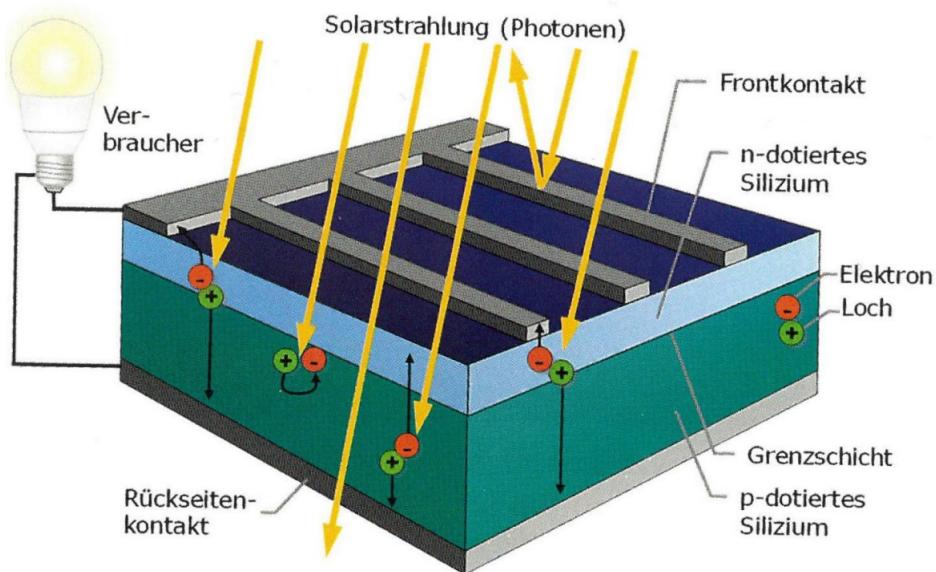


Abbildung 3: Aufbau und Funktionsweise einer Solarzelle  
[10]

Ein in der Praxis herkömmliches Modulformat bestand aus 60-72 ganzen Zellen, welche in 6 Reihen bzw. Strings (Zellreihe in einer Richtung) mit je 10-12 Zellen aufgeteilt sind. Aktuell werden die Zellen als halbe Zellen in einem Modul verbaut. Damit stiegen die Stückzahlen auf 120-134 Zellen. Das Format eines Solarmoduls ist etwa 990mm bis 1134mm breit und 1640mm bis 1762mm lang. Die Höhe beträgt dabei je nach Ausführung des Rahmens 30mm bis 50mm. Ein solches Modul ist in Abbildung 4 rechts dargestellt.[8] [11]

Die Basis einer Photovoltaikanlage stellt die Solarzelle dar. Eine einzelne Zelle kann eine Spannung an den Kontakten von 0,5-0,75 Volt erzeugen. Bei einem Standard Modul liegt die Stromstärke zwischen 0 und 14 Ampere und hängt von der Einstrahlung, dem Wirkungsgrad und der Zellgröße ab. Damit zunächst nützliche Spannungen erzeugt werden können, schalten man Solarzellen in Reihe. Dabei erhält man eine Spannung um die 20 bis 50 Volt. Dieser aus Solarzellen geschaltete Aufbau mit diversen zusätzlichen Schutzbauteilen für die Absicherung gegen Umwelteinflüsse, wird als Solarmodul bezeichnet. [2] [11]

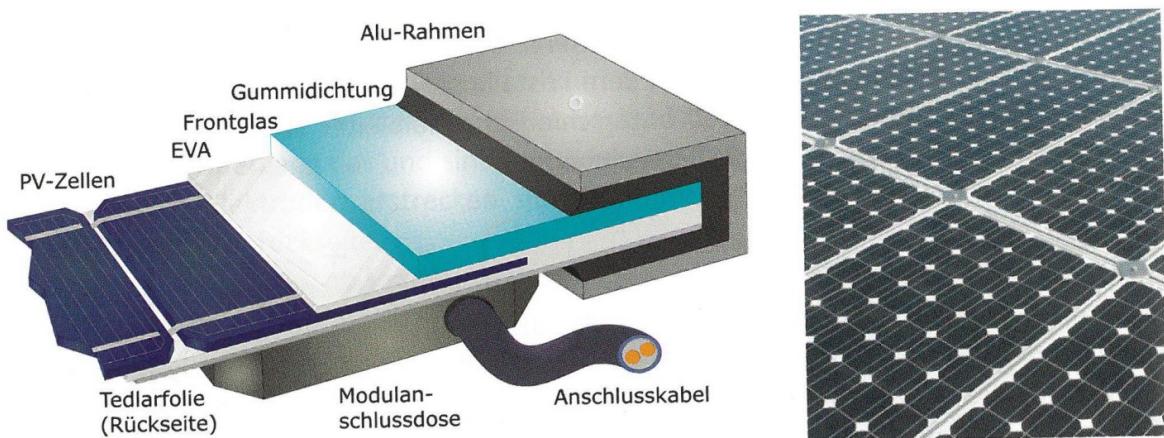


Abbildung 4: Aufbaustruktur eines Standard PV-Moduls und Darstellung installierter PV-Module [10]

Aufgrund vieler verschiedener Einsatzmöglichkeiten und daraus resultierenden Geometrien der PV-Module, existieren verschiedene Modulvarianten. Eine dieser Varianten sind gebäudeintegrierte PV-Module (BIPV-building integrated photovoltaic modules). Darunter versteht man die Integration von PV-Modulen oder Komponenten in Gebäudeteilen als zugehöriges Bauteil bzw. Gebäudehülle. Eine spezielle Form der BIPV-Module sind Fassadenmodule. Angewendet werden diese hauptsächlich an sehr hohen Gebäuden, wie z.B. Bürokomplexen. Aufgrund der vertikalen Ausrichtung ist der Neigungswinkel für den Strahlungseingang nicht sonderlich ertragreich. Ausgehend von einem Standort in Deutschland, gehen im Gegensatz zu einem optimal ausgerichteten Modul 30% der Strahlung verloren. [2]



Abbildung 5: Verschiedene Möglichkeiten und Ausführungen von gebäudeintegrierten PV-Modulen [6]

Dennoch sind gebäudeintegrierte PV-Module aufgrund der effizienten Bauweise und der Umwelteffizienz stark bevorzugt. Ein hauptsächliches Merkmal für den Einsatz von BIPV-Modulen ist die fortschrittliche architektonische Gestaltung der Gebäude und Schaffen einer Infrastruktur mit ökologischen Einsatz der BIPV-Module. BIPV-Module sind ein Ersatz für Gebäudeteile wie Dächer, Fassaden, Fenster und weitere. Die wichtigsten Faktoren für die Module sind die Temperatur, die Abschattung und die Ausrichtung. [6] Die Vorteile von BIPV-Modulen liegen in der ansprechenden zugleich unauffälligen Gestaltung der Module, der flexiblen Anpassung an die Gebäudestruktur und der Kosteneinsparung in Bezug auf Material- und Arbeitskosten. Die aktuelle Entwicklung der Stromversorgungskosten stellt eine Chance für den Einsatz von BIPV-Anlagen dar. Die hohe Komplexität besteht darin, die Schnittstelle zwischen PV-Modul und Gebäudeteil also die Integration fehlerfrei herzustellen. Dieser Übergang muss anhand verschiedener Gebäudeentwürfe oder Systemdesigns angepasst werden. Außerdem sind Rahmenbedingungen, Richtlinien oder Normen ausschlaggebend für

die Einsatz- und Verbesserungsmöglichkeiten von BIPV-Modulen. [12]

Als Anwendungsbeispiel dient ein halbtransparentes PV-Modul. Es gibt neben diesem auch voll transparente oder nicht transparente BIPV-Module. In einem transparenten Modul sind alle Materialien (Verkapselung, Zellen, Glas) durchsichtig und lichtdurchlässig. Bei einem halbtransparenten Modul dringt nur ein Teil des Lichts durch das Modul hindurch. Denn nur die Solarzellen sind bei diesem undurchsichtig. Die durchsichtige Eigenschaft transparenter und halbtransparenter Module ist für die Realisierung als gebäudeintegrierte Fenster oder Glasfassaden nützlich. Ähnlich wie ein Standardmodul besteht das halbtransparente BIPV-Modul aus mehreren Schichten. Diese sind Glas, Verkapselungsmaterial (z.B. EVA-Folie), Solarzellen, Verkapselungsmaterial, Glas und in diesem Fall Luft inklusive Abstandshalter mit zusätzlicher Glasschicht (siehe Abbildung 6). Der Luftraum und das zusätzliche Glas zur Abtrennung dienen als Wärmewiderstand. Für den Anwendungsfall an Gebäudefassaden ist diese Art der Wärmeisolation exemplarisch dargestellt. Für zum Beispiel nicht transparente Fassadenmodule könnte auch ein anderes Medium eingesetzt werden, um den Wärmewiderstand zu erhöhen.[13]

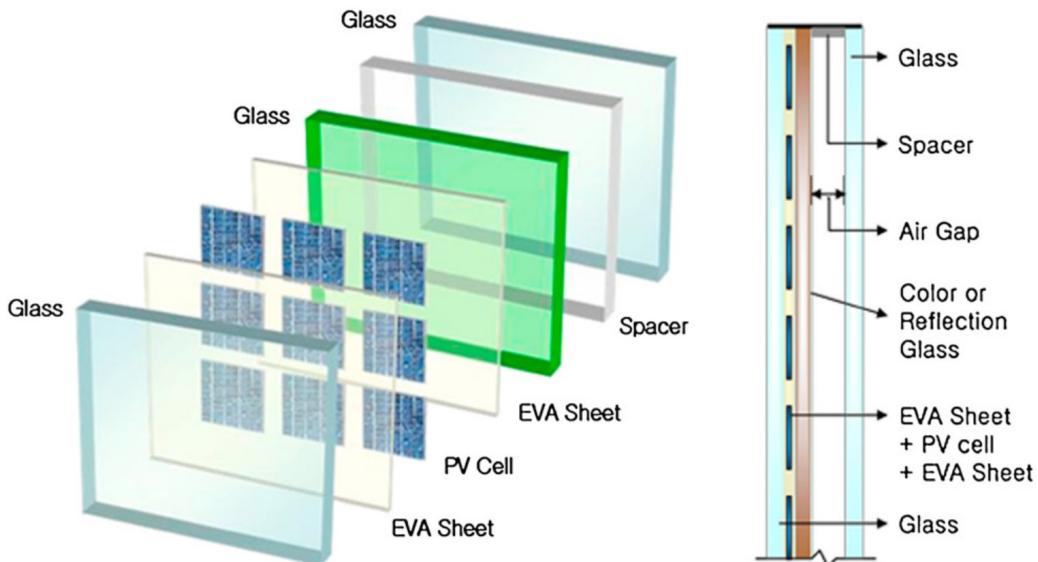


Abbildung 6: Schichtweiser Aufbau eines halbtransparenten BIPV-Modul  
[13]

### 2.1.1 Stringfertigung

#### Strings

Die allgemeine Verbindung der Zellen in Reihe nennt man Zellstrings. Zellverbindungen können auf verschiedene Weise hergestellt werden. Es gibt Verbindungsformen durch Bändchen/Drähten, strukturierte Verbindungen, leitfähige Rückseitenfolien, Schindeln von Zellen, Lötverbindungen und Leitklebstoffverbindungen. Dabei soll besonders auf Leitklebstoff- und Lötverbindungen in Kombination mit Bändchen eingegangen werden. Das allgemeine Ziel solcher Verbindungen sind der Fluss von elektrischer Energie als Strom. Dabei gibt es Teilziele die dazu beitragen, den Stromfluss sicherzustellen wie z.B. die langfristige Kontaktierung. [8]

Für die herkömmlichen Strings werden als Verbindungselement für die elektrische Leitung Kupferflachdrähte verwenden. Diese bestehen aus Weichkupfer und werden zugleich Verbinde-, Bänder oder Bändchen genannt. Ein rechteckiges Bändchen kann in der Herstellung aus einem Runddraht gewalzt oder aus einem Blech geschnitten werden. Solche speziellen Anwendungen erfordern einen hohen Reinheitsgrad des Kupfermaterials. Davon hängt unter

anderem der Serienwiderstand der Verschaltung ab. Das verwendete Kupfer weist eine Reinheit von 99,99% (Masse) auf und diese besitzen eine Leitfähigkeit von etwa 57-59  $\frac{MS}{m}$ . Die Bänder werden in parallelen Ausrichtungen an der Zelle aufgebracht. Zum Beispiel sind bei einer Anzahl von 3-Busbars die Bänder 1,5mm breit und 150-200 $\mu m$  hoch. In einem 5-Busbar Format sind die Verbinder etwas kleiner als 1mm breit. Es ergibt sich hier eine Verringerung der Breite bei höherer Anzahl pro Zelle. Moderne Zellen haben 12-18 Verbinder und drähte pro Zelle. Der Trend tendiert zu noch höheren Anzahlen pro Zelle. [7] Der Grund für die Verringerung der Breite sind Abschattungsverluste. Für die Auslegung der Höhe ist die Dicke der Verkapselungsschicht und Stabilität auf der Zelle von Bedeutung. Insgesamt sind die elektrischen Verluste im Band mit ca. 3-4% erwartungsgemäß. [8]

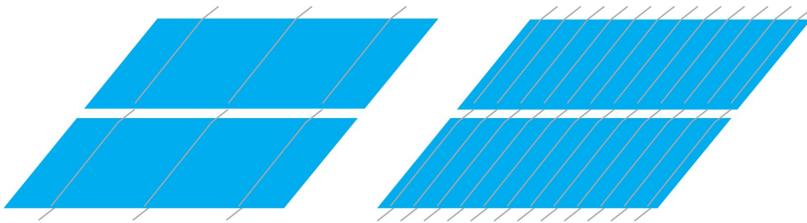


Abbildung 7: Darstellung von Strings mit verschiedener Verbinder Anzahl  
[8]

### Verschaltung (Löten und Kleben)

Das für den String-Prozess konventionelle Verfahren ist Löten. Mittlerweile entwickeln sich auch viele neue Technologien. Darunter gibt es verschiedene Verfahren für das Kleben und bleifreie Löten. Jedoch dominiert aktuell das Löten mit Bleizusatz den globalen Markt. [7] Bei einem Lötprozess werden Werkstoffe thermisch und stoffschlüssig gefügt oder auch beschichtet. Dieser Vorgang kann durch Schmelzen eines Lotes oder durch Diffusion an Grenzflächen erfolgen. Dabei ist zu beachten, dass nur das Lot aufgeschmolzen wird und der Grundwerkstoff im normalen Zustand erhalten bleibt. [14] In der PV-Industrie wird der Prozess in Bezug auf Fügepartner aus Metall angewendet. Zwischen den Kontaktpads einer Zelle und einem Verbinder (Silber, Kupfer) kann die Verbindung mittels Löten erfolgen. Die zu fügenden Teile sollten dabei einen höheren Schmelzpunkt haben als der von dem zu verwendeten Lot (Zinn oder Zinnbasislegierung). Während der Abkühlung des Lotes sind die Fügeteile benetzt und eine feste Verbindung wird hergestellt. Häufig sind Flussmittel bedeutsam für die Lötanwendung bei Solarzellen. Durch diese werden oxidierte Schichten von Grenzoberflächen entfernt. Dadurch können die Teile besser vernetzen. Für den Oxidationsprozess sind vor allem Lagerungszeit und Lagerungsbedingungen entscheidend. Bei dem Lötprozess wird nicht korrosives (no clean) Flussmittel eingesetzt. Der Grund dafür ist, dass das Flussmittel während der darauf folgenden Modulproduktion nicht mehr abgeführt werden kann. Ein häufig eingesetztes Lösungsmittel ist Isopropylalkohol. Das Flussmittel kann auf verschiedene Weise eingebracht werden. Einige Stringer führen das Band durch ein Bad mit flüssigem Flussmittel und trocknen es anschließend. Lötpasten bestehen aus Lötpartikeln und solchen Flussmitteln. Die Lötpaste kann allgemein durch Dosieren oder mittels Siebdruck auf die Solarzelle aufgetragen werden. Das Auftragen des Flussmittels und daraufhin des Lotes kann getrennt stattfinden. Der eigentliche Lötprozess wird über Wärmeeintrag und verschiedene Technologien realisiert. Unterschieden wird dabei in mit oder ohne Kontaktwärmeübertrag. Außerdem gibt es unterschiedliche Phasen des Prozesses. Diese beziehen sich auf die Temperatur: Aufheizen, Halten und Abkühlen. In der ersten Phase wird der Schmelzpunkt des Flussmittels erreicht und die Metalloxidschichten geätzt. Die Temperatur steigt bis zum Schmelzbereich des Lotes. Durch die Verflüssigung kommt es zu lokalen Verschiebungen. Dazu breitet sich das Lot durch Kapillarwirkung in feine Spalten aus. Auf dieser Temperatur wird eine gewisse Dauer ausgehalten, damit sich die Metalle nach der Benetzung möglichst stark verbinden

und eine stabile Lötstelle ermöglicht wird. Diese Haltezeit sollte nicht zu lange andauern, da sonst an der Kontaktstelle Silber verarmen könnte. Das würde zu einer geringeren Härtung der Lötstelle führen. Die Abkühlung ist für den Abbau thermomechanischer Spannungen verantwortlich. Eine rasante Abkühlung könnte bis hin zu ZellrisSEN führen. Die Risse würden die Leistung verringern, den Stromfluss behindern oder unterbrechen. Das Temperaturprofil ist insgesamt mit den drei Phasen ein wichtiger Parameter für die Qualitätssicherung.

Bei den Lötverfahren ist zusätzlich in bleihaltig und bleifreies Löten zu unterscheiden. Am häufigsten wird Lot auf SnPb37-Basis verwendet. Bei diesem Werkstoff liegt die Schmelz-(Solidus-) Temperatur bei 183°C. Das Blei senkt den Schmelzpunkt von reinem Zinn und die auftretende Oberflächenspannung (Abkühlphase) sowie die Benetzungseigenschaften werden verbessert. Eine bleifreie Alternative zu finden ist relativ komplex. Reines Zinn ist teilweise instabil und wandelt sich in sprödes "graues Zinn". Lote auf Zinnbasis mit Silberzusatz vermeiden eine solche Eigenschaft. Diese sind allerdings teuer und haben höhere Schmelz- und damit Prozesstemperaturen. [8] Mit diesem Schmelzpunkt liegt für kurze Durchlaufzeiten (<30s) die Prozesstemperatur bei über 200°C. [9] Empfohlen sind zum Beispiel eine Haltezeit von etwa 20s bei mindestens 235°C.[15]

Als Konkurrenz zu der Lötverbindung kommen elektrisch leitfähige Klebstoffe (electrically conductive adhesives - ECAs bzw. Leitklebstoffe) ins Spiel. Diese weisen in Bezug auf die industrielle Verarbeitung Vorteile gegenüber dem Löten auf. Die wesentlichen Unterschiede in der Anwendung liegen in geringeren Temperaturen, höheren Elastizitäten der Verbindung und darin, dass der Einsatz von Flussmitteln nicht erforderlich ist. Die Prozesstemperatur für die meisten ECAs liegt bei Temperaturen <180°C. [9] Allerdings weisen Leitklebstoffe Nachteile für die bisherige Massenproduktion auf. Die Probleme beinhalten die höheren Materialkosten und die Komplexität in der Modulproduktion. Die Leitklebstoffe werden im nächsten Kapitel 2.2 genauer behandelt. [8]

### **Versagensarten der Verbindungsstelle**

Die Belastungsarten bei Lötverbindungen sind während des Produktionsprozesses und des Einsatzbetriebs thermomechanische Scherspannungen. Durch Biegung (Lasten, Wind) werden mechanische Scherspannungen hervorgerufen. Ein sofortiger Bruch oder ähnliches Versagen (Kriechen, Ermüdung) kann durch Stöße, anhaltende und zyklische Belastung verursacht werden. Dabei wird ein kohäsiver Lotbruch erzeugt. Das kann über die Handhabung der Strings, Stringtransport oder während der Modulproduktion durch ungewollte Behandlung geschehen. Versagensursachen können für die Verbindung lokal abhängig sein. Für Lötstellen wären innere Brüche, Brüche an der Schnittstelle (Lot, Pad) oder Brüche innerhalb der Metallisierung der Zelle mögliche lokale Stellen. Die Brüche entwickeln sich aus Hohlräumen an den Lotkorngrenzen, welche zunächst zu Mikrorissen werden und daraus weiter wachsen können.[8]

### **Klebstoff Stringer**

Für die industrielle Herstellung von Strings für ein PV-Modul werden Stringer verwendet. Vollautomatische Zellstringer werden mit einem Durchsatz von 2000-4000 Zellen pro Stunde betrieben. [8] Ein Stringer ist in verschiedene Teilfunktionen untergliedert. Es erfolgt der Klebstoffauftrag, die Verbindezuführung, die Aushärtung des Klebstoffs und die Übergabe der Zellen bzw. des hergestellten Strings mit Hilfe von Greifern und Fördermitteln. Der Klebstoffauftrag erfolgt über das Siebdruckverfahren. Die Temperaturzuführung wird mit Heizplatten umgesetzt. Die Greifer arbeiten mit einem Vakuum- bzw. Unterdruckprinzip. [9] Zunächst werden die Solarzellen einzeln aus einem Zellhalter entnommen. Dabei schwenken die Greifer und positionieren die Zellen präzise auf Fördereinheiten (z.B. Bänder) um sie zu transportieren. Sobald die erste Zelle entnommen wurde und bereit liegt, laufen parallel optische Überwachungsprozesse. Mit einem Bildverarbeitungssystem werden die Zellen auf

Unversehrtheit, ihre Oberfläche und ihre Positionierung durch die Greifer geprüft. Gegebenenfalls werden Zellen aussortiert, wenn sie den Anforderungen nicht entsprechen. Bei einer fehlerhaften Positionierung wird durch den Greifer die Ablage der Zelle nachjustiert. Darauf folgt der Klebstoffauftrag. Das kann auf verschiedene Weise erfolgen (Kapitel 2.2). Die eingesetzte Technik wird als Siebdruck bezeichnet. Dieser Auftrag muss beidseitig auf der Zelle erfolgen. Dafür kommen spezielle Greifer mit Wendungsfunktion zum Einsatz. Ist die Zelle sorgfältig bedruckt, wird mit weiteren optischen Überprüfungen die Qualität sichergestellt. Dann kann die frisch mit Klebstoff bedruckte Zelle zum nächsten Prozessschritt transportiert werden. In Vorbereitung darauf werden parallel Verbinder auf die erforderliche Länge zugeschnitten. Dabei sind in der Maschine Längendaten hinterlegt und entsprechen ungefähr der Summe aus dem Zweifachen der Zelllänge und dem Zellabstand. Nur an der vordersten und hintersten Zelle (Beginn und Ende des Strings) ist jeweils eine Seite mit Verbinder kürzer. Diese entsprechen der Summe aus Zelllänge und dem eingestellten Verbinderüberstand. Die Verbinder werden daraufhin auf die Vorposition der Zelle aufgebracht und die Zellen dadurch abwechselnd auf Vorder- und Rückseite kontaktiert. Es entsteht ein Front-Rückseitenkontakt zwischen den Zellen. Die Verbinder werden pro Zelle für die gesamte Anzahl an Busbars gleichzeitig aufgelegt. Um die Verbinder in Position zu halten, wird dabei ein Niederhalter von oben und senkrecht zu den Verbinder aufgelegt. Der Niederhalter übt dabei eine Gewichtskraft und gefederten Druck auf die einzelnen Verbinder aus. Die Verbinder auf der Unterseite erfahren die Anpressung über die Zellfläche und durch das Gewicht. Direkt nach der Verbinderzuführung läuft der Erwärmungsprozess ab. Das bedeutet, dass die ersten Zellen eines größeren Strings bereits anfangen auszuhärten, während die hinteren Zellen fortlaufend verschaltet werden. Bei diesem Übergang ist ein sauberer und fließender Prozessablauf für die Zuverlässigkeit der Kontaktierung notwendig. Die Erwärmung läuft wie bei dem Löten beschrieben in mehreren Phasen ab. Die aufeinanderfolgenden Phasen beschreiben sich in Aufheizen, Halten und Abkühlen. Die Heizzone ist dabei homogen vorgewärmt. Es können verschiedene Erwärmungstechnologien eingesetzt werden. Typisch ist darunter die Induktion und Infrarotstrahlung. Andere mögliche Verfahren sind Heißluft oder UV-Strahlung. Entsprechende Kriterien für den Technologievergleich sind Geschwindigkeit, Genauigkeit, Prozessstabilität, Betriebszeit und Gesamtbetriebskosten. Vor allem an diesem Prozessschritt ist die Auslegung der Erwärmungstechnologie besonders zu berücksichtigen. Für die Kontrolle und präzise Steuerung des Temperaturprofils der verschiedenen Phasen wird Pyrometrie eingesetzt. Es können auch andere geeignete Messmittel vorhanden sein. Nach dem Durchlauf aller Heiz- und Kühlphasen wird der String zur Entnahmeposition befördert. In vollautomatischen Stringern wird der fertigte String automatisch elektrisch und/oder optisch geprüft. Bei akzeptiertem Zustand des Strings würde an den Stringer das Band für die Modulproduktion anschließen. [8] Die wichtigsten Parameter für den Prozess und danach sind ECA Eigenschaften wie Topfzeit, Aushärtegeschwindigkeit, elektrische Leistung und die Haftung nach der Aushärtung. Daher sind nicht nur der Fertigungsprozess, sondern auch die Kenntnisse über den Klebstoff wesentlicher Bestandteil für die Produktion.[9]

### 2.1.2 Modulfertigung

Die Modulproduktion findet als fortschreitende Prozesskette von verschiedenen Montageeinheiten statt. Je nachdem welcher Modulaufbau erfolgt, kann diese Prozesskette variieren. Zum Beispiel können sich die gewählten Materialien für Front- oder Rückabdeckungen unterscheiden wie Glas oder Folie. Entsprechend sind die Produktionsschritte auszulegen, da diese die Schichtung der Modulmatrix und Montageeinflüsse vorgeben (Glas eignet sich als Unterlage, Folie hingegen nicht). Geht man von einem Glas-Folien-Modul (Frontseite-Rückseite-Modul) aus, dann wäre der erste Schritt die Glaswäsche. In diesem Prozess werden die Glasscheiben für die Frontseite mit deionisierten Wasser und Bürsten in einer Glaswaschanlage gereinigt.

Anschließend wird das Glas einem Trocknungsprozess unterlegt und dabei häufig mit einem Luftstrom getrocknet. Eine Qualitätskontrolle des Glases kann über ein Bildverarbeitungssystem erfolgen. Nach der Reinigung wird das Glas horizontal, mit der Außenseite nach unten, auf ein Förderband gelegt. Es dient gleichzeitig als Auflage für die weitere Montage. Als nächstes wird die Vorderseite der zugeschnittenen Verkapselungsfolie auf die Glasscheibe aufgelegt. Dabei müssen die Lager- und die Alterungsbedingungen der Verkapselungsmittel intensiv berücksichtigt werden. Auf diese Verkapselungsschicht kommen die Strings aus der Stringherstellung. Diese werden mit der Vorderseite nach unten aufgelegt, miteinander verschaltet und bilden die Zellmatrix. Auf die Zellmatrix kommt die rückseitige Verkapselungsschicht. Abschließend bildet eine Rückseitenfolie die letzte Schicht. Wenn das Schichtsystem abgeschlossen ist, kann der Laminationsprozess eingeleitet werden. Bei allen Prozessen ist auf eine möglichst staubfreie Umgebung zu achten.[8]

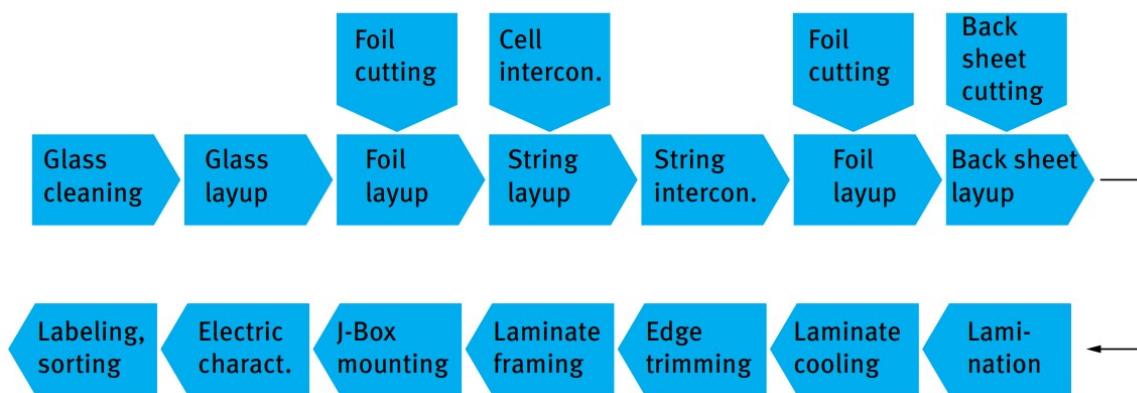


Abbildung 8: Produktionskette und Arbeitsschritte der Herstellung eines typischen PV-Moduls [8]

Der Laminationsprozess ist vom Ablauf der komplexeste und aufwendigste Schritt der Modulfertigung. Das vorbereitete Laminat wird auf die Vorposition des Laminator eingelegt. Die Ausrichtung der Schichten bleibt gleich und es sollte dabei nichts verrutschen. Viele Laminatoren besitzen Rollen, Stifte oder ähnliches, um während der Zuführung sowie bei Beginn der Lamination den Kontakt zwischen Glasscheibe und Bodenplatte zu vermeiden. Diese Abstandshalter senken sich wieder ab, wenn der Druck in der Kammer gesenkt wird. Die meisten Produktionslinien verwenden Flachbett-Laminatoren. Eine Membran unterteilt die Verarbeitungskammer in zwei Abschnitte. Durch die Aufteilung wird eine unabhängige und separate Drucksteuerung im unteren und oberen Bereich ermöglicht. Die Bodenplatte des Laminators beheizt homogen von unten den Raum. Meistens wird auf etwa 150°C konstant aufgeheizt und gehalten. Währenddessen verschmelzen die Schichten in der Modulmatrix. Das Aufschmelzen sollte nach dem Evakuieren und Erhitzen einsetzen. Daraufhin wird über eine Membran oder Presse Druck erzeugt. Über dieses Anpressen wird die flüssig geschmolzene Verkapselung um die Zellmatrix verteilt. Ein Verkapselungsmaterial das häufig verwendet wird ist EVA (Ethylenvinylacetat). Bei diesem starten thermisch aktivierte Initiatoren die Vernetzungsreaktion. Es bildet sich ein elastomeres Material aus. Das Temperaturprofil ist für die Qualität der Lamination ausschlaggebend. Eine zu rasante Erwärmung von der Unterseite verursacht eine Krümmung oder Wölbung und verdrängt die Lagen bzw. die Zellmatrix. Das Krümmen entsteht durch unterschiedliche Wärmeausdehnung der unteren Fläche und der oberen Fläche des Glases. Weiterhin muss beachtet werden, dass das Aufschmelzen des Einkapselungsmaterial erst nach Evakuierung beginnen sollte. Ansonsten verbleiben Gasblasen zwischen dem Material. Ein Risiko der Verschiebung der Schichten besteht während des Aufheizens

und des Aufschmelzens. Die einzelnen Folien benötigen eine Stabilität gegenüber Schrumpfen oder Verziehen. Andernfalls verschieben sich die Komponenten relativ zueinander. Für die Beheizung der Grundplatte eines Laminators kommen verschiedene Technologien in Frage. Das können Systeme aus elektrischer Erwärmung, Ölerwärmung, Hybridsysteme oder induktive Systeme sein. Das richtet sich nach der Temperaturhomogenität, Heizgeschwindigkeit, Wartungs- und Betriebskosten und weiteren Einflussfaktoren. Laminatoren können sich zusätzlich auf Grundlage des Durchsatzes unterscheiden. Es gibt Ansätze den Arbeitsbereich zu erhöhen, um mehrere Module gleichzeitig zu laminieren. Das würde einen zunehmenden Platzbedarf erfordern. Als Lösungsansätze gibt es mehrstufige Laminatoren mit übereinander liegenden Ebenen, geteilte Laminatoren für die einzelnen Vorheiz- und Heizschritte oder beidseitige Beheizung von oben und unten (hauptsächlich nur bei Glas-Glas Modulen anwendbar).

Nach der Lamination werden die überstehenden Ränder von den aufgeschmolzenen Folien entfernt. Es sollte ein wenig Verkapselungsmaterial an allen Kanten hervorstehten. Damit ist die innere Verkapselung sichergestellt. Mit einem Trennwerkzeug können diese hervorstehenden verfestigten Folien entfernt werden. An den bearbeiteten Rändern wird der Modulrahmen angebracht. Die Modulrahmen bestehen aus Metall-Rahmenprofilen. Der Rahmen dichtet die Kanten des Moduls vor Verschmutzung aus der Umwelt ab. An der Modulrückseite werden die Anschlussdosen fixiert. Dazu wird ein Bindemittel benötigt. Zum Beispiel wird Silikon verwendet. An den Anschlussdosen werden die Pole der verschalteten Zellen bzw. Strings angebracht. Das Anbringen kann über Klemmen, Löten oder manchmal Schweißen erfolgen. Außerdem werden die Anschlussdosen oft mit Dichtmaterial ausgefüllt. Mit diesem letzten Schritt ist die Modulfertigung abgeschlossen. Daraufhin kann die Charakterisierung eingeleitet werden. Der Fertigungskreislauf würde entsprechend von vorn beginnen, wenn die Charakterisierung Ergebnisse liefert, die nicht akzeptabel sind. Im Idealfall wäre die Charakterisierung mit den gewünschten Ergebnissen abgeschlossen und das Modul wird mit einer Kennzeichnung bedruckt, beklebt oder beschriftet. [8]

### 2.1.3 Modulcharakterisierung

Die Modulcharakterisierung erfolgt nach dem Standard der Normen DIN EN 61730 und IEC 61215. Darin werden Prüfgrundlagen, -verfahren und allgemeine Voraussetzungen der Module beschrieben. In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Prüfungen für das Ziel der Arbeit zusammengefasst. Die Reihenfolge der verschiedenen Prüfungen werden in Prüf-Sequenzen durchgeführt. Die Vorgehensweise dafür wird in der Durchführung 3.4 beschrieben.

#### Sichtprüfung

Die Sichtprüfung wird angewendet, um grob optische Mängel und Abweichungen am PV-Modul festzustellen und zu dokumentieren. Die Prüfung muss sorgfältig mit einer Beleuchtung von mindestens 1000Lux unter IEC 61215-1 Bedingungen durchgeführt werden. Bei der Untersuchung wird auf verschiedene Prüfkriterien eingegangen. Diese sind alle visuelle Kriterien, die die Sicherheit des PV-Moduls beeinflussen könnten. Bei der Endkontrolle eines PV-Moduls, werden besonders scharfe Kanten, Mindestabstände und Kriechstrecken (IEC 61730-1) überprüft. Zusätzlich wird auf die Kennzeichnung des Moduls und deren Haltbarkeit geachtet. Für ein Ausschließen der Toleranz gelten folgende Beispiele:

- innere Risse, Sprünge oder Brüche, gerissene Außenflächen
- gebogene bzw. falsch ausgerichtete äußere Oberflächen (Front-/ Rückseite, Rahmen, Anschlussdosen), wobei die Sicherheit des PV-Moduls beeinträchtigt werden würde

- Blasen oder Delaminationen, die einen kürzeren Abstand zueinander haben, als das zweifache der erforderlichen Mindestabstände, sind als leitfähig und elektrisch verbunden zu bewerten. Der Abstand solcher Blasen zueinander darf nicht kürzer sein, als der erforderliche Mindestabstand.
- Verlust der mechanischen Zuverlässigkeit, sodass die Sicherheit der Installation und der sichere Betrieb des PV-Moduls beeinträchtigt wird
- Falls die mechanische Unversehrtheit von der Laminierung bzw. Haftung abhängt, darf die Summe aller Flächen jeder Blase nicht 1% der Gesamtfläche des Moduls überschreiten.
- Erscheinungen von geschmolzenen oder verbrannten Komponenten
- Markierungen, die nicht den Anforderungen der Endkontrolle entsprechen
- scharfe Kanten, die nicht den Anforderungen der Endkontrolle entsprechen

Treten solche schwerwiegenden visuellen Mängel auf, sind sie entsprechend zu dokumentieren und zu fotografieren. Das trifft besonders bei sich zu verschlimmernden Auffälligkeiten zu. Dadurch werden die Positionen oder Größen der Fehler festgehalten. Solche Erscheinungen könnten bei Nichtberücksichtigung nachfolgende Prüfungen beeinflussen. Wenn keine von diesen Hauptfehlern auftreten, ist das PV-Modul akzeptabel.

[16]

### Bestimmung der I-U-Kennlinie (STC)

Die Abkürzung STC (standard test conditions) steht für Standardtestbedingungen. In dieser Prüfung werden die elektrischen Eigenschaften von PV-Modulen durch die Messung von Strom-Spannungs-Kurven (IU/IV-Kurven) bestimmt.[8] Es werden die Kennwerte Nennkurzschlussstrom ( $I_{sc}$ ) und Leerlaufspannung ( $V_{oc}$ ) ermittelt. Ein Test-PV-Modul wird unter konstanter Modultemperatur von 25°C ( $\pm 2^\circ\text{C}$ ) gemessen. Eine Strom-Spannungs-Kennlinie wird mit einer Bestrahlungsstärke von  $1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$  ( $\pm 100 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ ) aufgenommen. Dabei kann natürliches Sonnenlicht oder ein Simulator mit den entsprechenden Anforderungen verwendet werden. [17] Der Simulator wird hinsichtlich der Qualität in verschiedenen Kategorien mit Buchstaben (A,B,C) bewertet. Ein AAA-Simulator hat eine Bewertung in Bezug auf das erzeugte Spektrum, der Gleichmäßigkeit und der Stabilität. Solche Simulatoren sind nach IEC 60904 definiert. Sie besitzen eine spektrale Fehlanpassung von <25%, eine räumliche Unregelmäßigkeit <2% und eine Instabilität der Bestrahlungsstärke <2%. Hochpräzise A+A+A+-Simulatoren arbeiten noch genauer. Eine Herausforderung stellt die konstante Temperatur am Modul durch die Bestrahlung des Simulators dar. Es kann teilweise sehr lange dauern bis ein thermisches Gleichgewicht bei der Zieltemperatur erreicht wird. Für schnelle Messungen werden daher Flasher verwendet. Diese sind für Kurzdauern gedacht und stellen eine gepulste Sonnensimulation dar. Eine Blitzdauer entspricht etwa 10-25ms. Dabei wird das Modul kaum thermisch beeinflusst. Während der Bestrahlung bzw. zur Blitzdauer durchläuft das Modul jeweils die Arbeitspunkte der Leerlaufspannung und des Kurzschlusses. Zu der Zeit wird die IV-Kurve aufgenommen (Abbildung 9). Die wichtigsten Parameter, die man der IV-Kurve entnehmen kann, sind der Kurzschlussstrom, die Leerlaufspannung, der Strom, die Spannung und die Leistung am maximalen Leistungspunkt (Maximum Power Point-MPP) des Moduls ( $I_{mpp}$ ,  $V_{mpp}$ ,  $P_{mpp}$ ). Der Füllfaktor (FF) und der Modulwirkungsgrad ( $\eta_{mod}$ ) können daraus berechnet werden (Gleichung 1). Besonders für bifaziale Module werden Vorder- und Rückseiten-Messungen benötigt. Damit wird der vorderseitige sowie rückseitige Wirkungsgrad ( $\eta_{front}$ ,  $\eta_{rear}$ ) ermittelt.

$$FF = \frac{V_{mpp} \cdot I_{mpp}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} = \frac{P_{mpp}}{V_{oc} \cdot I_{sc}}; \eta_{mod} = \frac{P_{mpp}}{E_{STC} \cdot A_{mod}} \quad (1)$$

Die in der Gleichung vorkommende Bestrahlungsstärke bei STC Messung ( $E_{STC}$ ), beträgt  $1000 \frac{W}{m^2}$ . Die Fläche des Moduls ( $A_{mod}$ ) kann je nach Modul variieren.

Das Modul kann mit einem Ersatzschaltbild aus den einzelnen Zellen betrachtet werden. Dabei wären die Zellen hintereinanderweg in Reihe geschaltet. Aus diesem Ersatzschaltbild kann ein Modul-Serienwiderstand ( $R_S$ ) gebildet werden. Der Serienwiderstand beschreibt nicht den lokalisierten Widerstand im Modul, sondern die Wirkung einer ohmschen Widerstandsverteilung einzelner Effekte in einem Betriebspunkt im Modul.

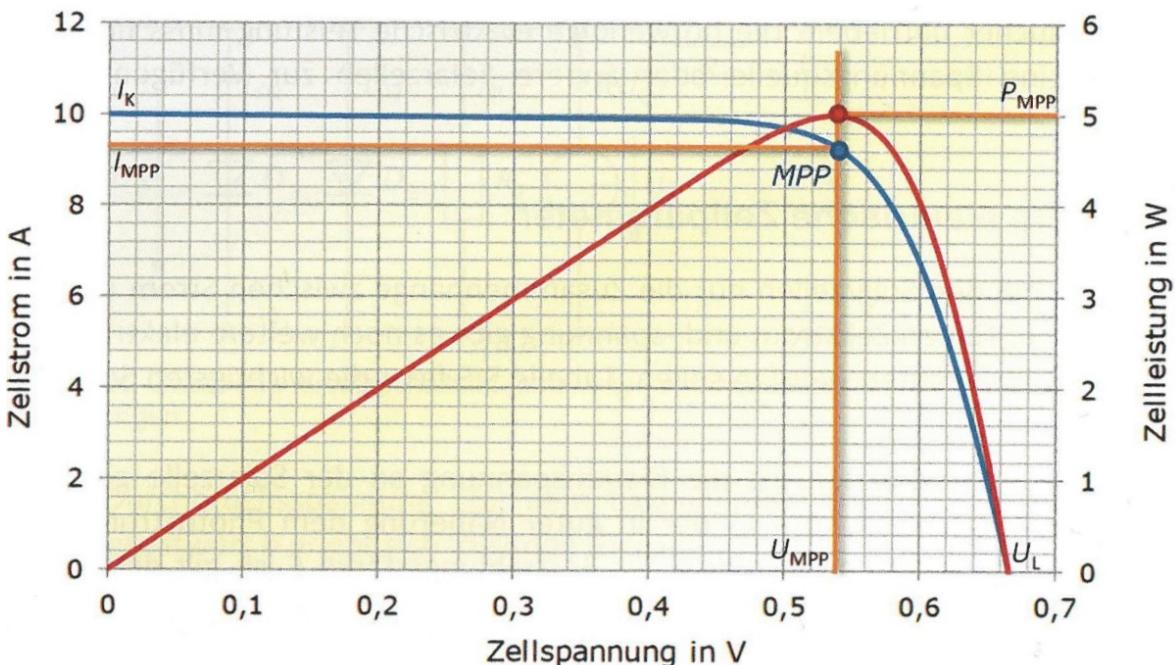


Abbildung 9: Beispiel einer IU- und PU-Kennlinie mit Maximum Power Point (MPP)  
[10]

Beispiele der Einzelwiderstände sind Schichtwiderstand des Zell-Emitters, Zellmetallisierung, Zell- und Stringverbindung sowie Modulverbindungskabel, Volumenwiderstände der Wafer und Zellübergangswiderstände. Diese Widerstände werden entsprechend addiert, um den Modul Serienwiderstand zu erhalten. Bei typischen Fehlerbildern, wie Bruch oder Korrosion, erhöht sich der Serienwiderstand. Gleichzeitig verringern sich die Leistung des Moduls und der Füllfaktor. Mit diesen Kennwerten kann die Diagnose solcher Fehler erfolgen und die Ursache abgeschätzt werden. [8] Stimmen bei der Messung die Werte ( $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ) mit den Angaben des Herstellers überein oder liegen innerhalb der geforderten Toleranz, kann die Prüfung erfolgreich gewertet werden. [16]

### Elektrolumineszenz-Test

Der photovoltaische Effekt lässt sich zu einem gewissen Maß umkehren. Entsprechend werden durch Ladung bzw. Energiezufuhr Photonen angeregt. Dadurch wirkt ein kleiner Teil der Energie strahlend durch die Elektrolumineszenz (EL). Die Elektrolumineszenz hängt von verschiedenen Faktoren ab. Eine entscheidende Rolle spielen die Spannung über der Solarzelle, die Temperaturspannung und der Kalibrierungsfaktor. Die emittierte Strahlung befindet sich im Infrarot-Spektralbereich. Der Höhepunkt der Strahlung befindet sich bei einer Wellenlänge von 1150nm der lokalen Elektrolumineszenz.

Mit einer EL-Aufnahme können die Defekte in einer Solarzelle detektiert werden. Diese Defekte beziehen sich auf Kristallstruktur, Verunreinigungen und Risse in der Zelle, welche die lokal strahlende Elektrolumineszenz reduzieren und verdunkeln. Für die Lokalisierung von mechanischen Schäden sowie teilweise von elektrischen Beschädigungen ist die Elektrolumineszenz eine hilfreiche Methode. Sind Zellen auf einem EL-Bild völlig abgedunkelt zwischen hellen aktiven Zellen, werden diese dunklen Zellen überbrückt. Ein dunkler Bereich innerhalb einer aktiven Solarzelle, deutet auf eine Unterbrechung hin. In der Regel ist die Zellverbindung zwischen Vorder- und Rückseite (Verbinder und Zelle) unterbrochen. Es kann aber auch vorkommen, dass die Zellkontakte nicht vollständig unterbrochen wird. Der Stromfluss wird dabei nicht komplett verhindert. Die Ursache der Beschädigung kann aus dem Fehlerbild und aus dem sich daraus ergebenden Muster geschlussfolgert werden. Zum Beispiel sind bei Fehlern durch Korrosion fließende Übergänge von hell zu dunkel in Bereichen auf der EL-Aufnahme zu sehen. Hingegen wird bei einem Bruch auf einer Zelle ein direkter Hell-Dunkel-Kontrast hervorgerufen. Die Korrosion wird oft chemisch bedingt durch Alterung des Moduls auf dem Freifeld oder im Labor hervorgerufen. Bei Korrosion kann der Übergangswiderstand zwischen dem Verbinder und der Solarzelle erhöht oder der Querschnitt des Verbinder vermindert werden. Bei Rissen bzw. Brüchen befinden sich die dunklen Stellen meistens außen zwischen dem äußeren Verbinder und dem Zellrand. Bereiche zwischen zwei einzelnen oder mehreren Verbinder sind erst komplett dunkel, wenn jedes dieser Bändchen unterbrochen ist. Ansonsten würde bei einem nicht betroffenen Verbinder Strom fließen. Tritt an einem Verbinder ein Riss auf, wird bei größerem Abstand von dem Verbinder aus die Zellfläche dunkler. Bei monokristallinen Siliziumzellen ist die Fehlerbilderkennung deutlich einfacher als bei multikristallinen Zellen. [8]

### Temperaturzyklen-Test (TC)

Bestandteil des Temperature Cycling (TC) bzw. Temperaturzyklen Tests ist das Abschätzen des thermischen Fehlverhaltens eines PV-Moduls verursacht durch zyklische Temperaturschwankung als wirkende Belastung. Ziel dabei ist die Standfähigkeit des PV-Moduls zu belegen. Für die Durchführung sind Klimakammern mit bestimmten Eigenschaften und Funktionen zu verwenden. Die Temperaturregelung erfolgt automatisch, wobei die Luft im Innenraum umgewälzt wird und eine Kondensation auf dem Modul verringert werden muss. Zusätzlich müssen Befestigungsmöglichkeiten vorgesehen werden. Damit soll ein Freistehen der Module und somit die Zirkulation der Umgebungsluft garantiert sein. Für die thermische Messung der Module wird eine Genauigkeit von  $\pm 2.0^{\circ}\text{C}$  verlangt. Bei wiederholter Messung sollte die absolute Abweichung höchstens  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  betragen. Während der Beanspruchung über die Klimakammer muss das Modul oder die Module mit einem angelegten Dauerstrom während der Prüfung durchströmt werden. Der Stromfluss ist standardmäßig vorgegeben und wird währenddessen überwacht.

Werden mehrere PV-Module gleicher Art geprüft, kann ein Modul als repräsentativ angesehen werden und es müssen nur an diesem Sensoren befestigt werden. Daraufhin wird das Modul bei Umgebungstemperatur in die Kammern installiert. Während des Temperaturprogramms ist der Stromfluss parallel zu variieren (Abbildung 10). Der Stromfluss wird prozentual wie angegeben zwischen dem Temperaturbereich von  $-40^{\circ}\text{C}$  bis  $85^{\circ}\text{C}$  eingestellt.

Die Geschwindigkeit der Temperaturänderung am Modul hängt von der Wärmekapazität der einzelnen Module ab. Die Geschwindigkeit sollte in dem Prozess nicht den Wert  $100^{\circ}\text{C}/\text{h}$  überschreiten. Die Extremwerte der Temperatur müssen 10min gehalten werden. Die Zeitdauer eines Zyklus sollte maximal 6h dauern. Eine Ausnahme wäre ein Modul mit sehr hoher Wärmekapazität. [17] Der Prozess muss für 50 oder für 200 Zyklen wiederholt werden, je nachdem welcher TC Test durchgeführt werden soll. [16] Nach dem Durchlauf des Tests werden die Module unter Bedingungen von  $23^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ) für eine Stunde unbeansprucht. Dabei soll die Luftfeuchtigkeit unter 75% bleiben. Daraufhin müssen erneut Sichtprüfung und die Prüfung des Kriechstroms (feucht) durchgeführt werden.

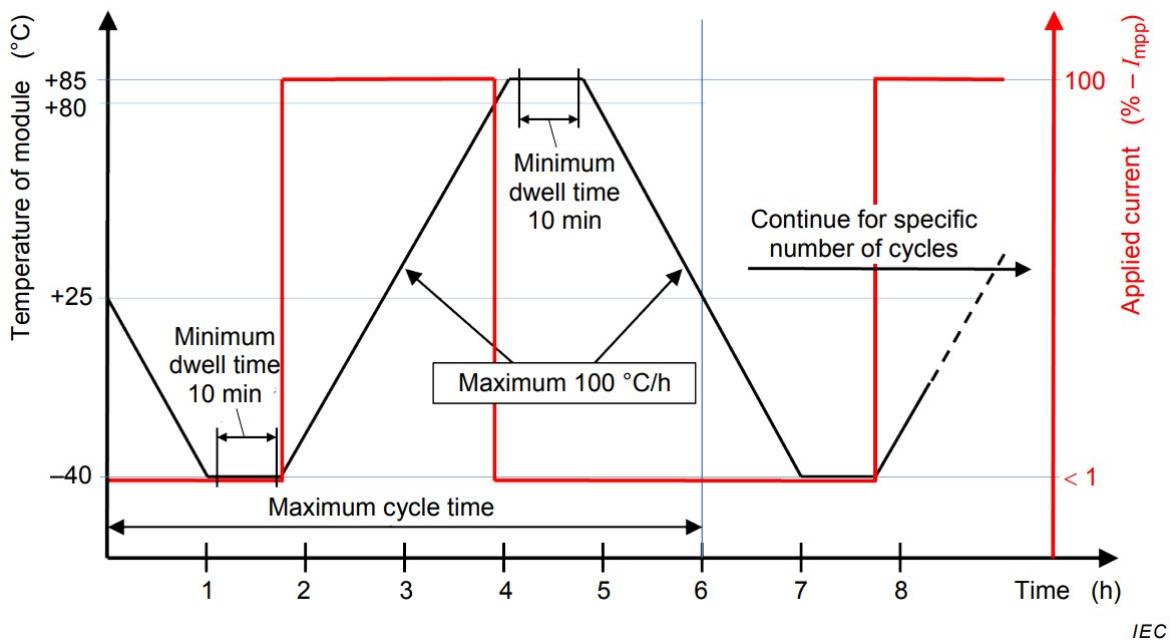


Abbildung 10: Temperatur-Zeit-Zyklus einer Standard TC-Prüfung  
[17]

### Gefriertest bei Feuchtigkeit (HF)

Mit dem Gefriertest bei Feuchtigkeit (Humidity Freeze - HF) wird die Widerstandsfähigkeit eines PV-Moduls gegenüber Temperaturextremen und hoher Luftfeuchtigkeit ermittelt. Dabei erfolgt die Aufbringung dieser Beanspruchung über eine bestimmte Zeit und ist nicht mit einem Thermoschock-Verfahren gleichzusetzen. Der Prozess, die benötigten Messmittel und Genauigkeiten sind wie bei dem zuvor beschriebenen TC Test gleich. Die Module werden bei Raumtemperatur mit Hilfsmitteln für die Installation in automatisch gesteuerte Klimakammern eingebbracht. Dort werden genauso die Temperatursensoren mit Aufzeichnungseinheit und die Stromversorgung an die Module geschlossen. Während der Prüfung wird die Modultemperatur aufgezeichnet und der übertragene Strom sowie die Spannung überwacht. Der Unterschied besteht darin, dass eine Luftfeuchtigkeit gezielt beaufschlagt wird. Der Temperatur- bzw. Feuchtigkeitszyklus ist in Abbildung 11 dargestellt. Während der Höchst- und Mindesttemperatur, ist eine Genauigkeit der Temperatur von  $\pm 2^\circ\text{C}$  vorausgesetzt. Der Temperaturbereich wird von  $-40^\circ\text{C}$  bis  $+85^\circ\text{C}$  eingestellt. Die Luftfeuchtigkeit muss für das Anhalten der Temperatur bei  $+85^\circ\text{C}$  währenddessen 85% ( $\pm 5\%$ ) betragen. Der restliche Verlauf der Feuchtigkeit wird nicht angesteuert. Das Temperaturmaximum wird für 20h gehalten. Das Minimum wird hingegen nur 30min gehalten. Der Zyklus für den Testverlauf wird zehnfach wiederholt. Nach dem letzten Zyklus ruhen die Module zwischen 2 bis 4h bei Raumtemperatur ( $23 \pm 5^\circ\text{C}$ ) und geringerer Luftfeuchtigkeit unterhalb 75%. Anschließend können die Sichtprüfung und die Prüfung des Kriechstroms (feucht) durchgeführt werden. [17]

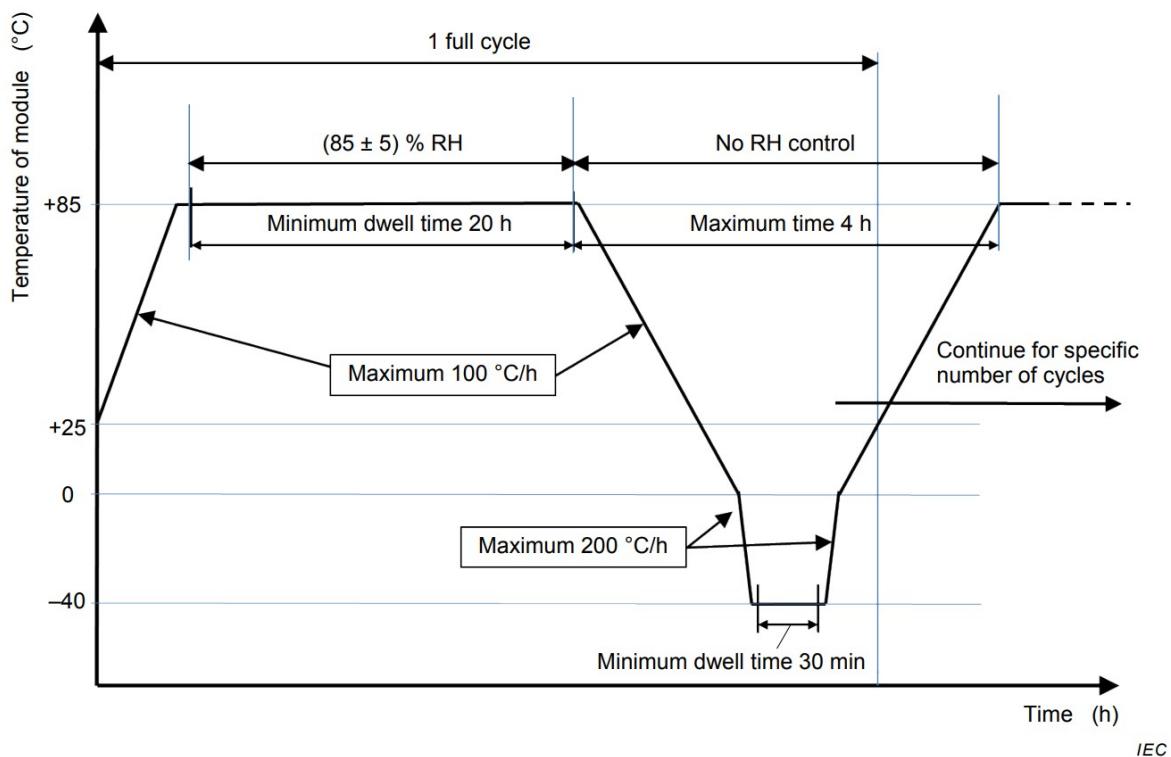


Abbildung 11: Temperatur- und Feuchtigkeitszyklus einer Standard HF-Prüfung  
[17]

### Feucht-Hitze-Test (DH)

Der Damp Heat (DH) Test wird als Feucht Hitze Test übersetzt. Wie der Name des Modultests erwarten lässt, sind die Luftfeuchtigkeit und die Temperatur der Hauptbestandteile. Die Widerstandsfähigkeit des PV-Moduls gegenüber dem Eindringen von Feuchtigkeit unter dieser Beanspruchung soll über einen langen Zeitraum bestimmt werden. Die Durchführung unterscheidet sich anhand der Dauer. Es werden zwei verschiedene Standarddauern verwendet. Diese ist meist 1000h, kann aber auch auf 200h verkürzt werden. [16] Der Test wird mit folgenden konstanten Parametern durchgeführt:

- Test Temperatur: 85°C ( $\pm 2^\circ\text{C}$ )
- Relative Luftfeuchtigkeit 85% ( $\pm 5\%$ )
- Testdauer: 1000h (+48h) oder 200h

Nach dem Durchlauf unter den beschriebenen Parametern werden diese noch abgesenkt. Die Module ruhen bei 23°C ( $\pm 5^\circ\text{C}$ ) für 2 bis 4h. Die Luftfeuchtigkeit soll dabei unter 75% betragen. Danach folgt die erneute Sichtprüfung und die Prüfung des Kriechstroms (feucht). [16]

### UV-Test

Der UV-Test ist eine Vorbeanspruchung eines PV-Moduls mit ultravioletter (UV) Strahlung für die darauffolgenden TC- und HF-Tests. Das Ziel besteht darin, die Materialien und Verbindungen mit Anfälligkeiten gegenüber UV-Strahlung (z.B. Zerstörung) zu analysieren. Für die Messung wird eine Prüfkammer mit Temperaturregelung und UV-Lichtquelle benötigt. Die Temperatureinstellung muss eine Genauigkeit von  $\pm 2,0^\circ\text{C}$  und eine Wiederholung von  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  besitzen. Die Temperatursensoren sind mittig an die Vorder- oder Rückseite des Moduls zu befestigen, ohne dass die UV-Strahlung durch die Sensoren gehemmt wird. Die Temperatur in der Kammer wird auf bis zu 60°C ( $\pm 5^\circ\text{C}$ ) erwärmt. Die UV-Lichtquelle muss

eine gleichmäßige Bestrahlungsstärke mit  $\pm 15\%$  in den interessierenden Spektralbereichen liefern. Die Vorderseite der Module wird mit einer Gesamt-UV-Strahlung von mindestens  $15 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$  in den Bereichen von 280nm bis 400nm bestrahlt. Die UV-Prüfung wird in zwei Intensitäten unterschieden. Man unterscheidet zwischen einer UV Standard Dosis und einer vierfach intensiveren Dosis ( $60 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$ ). Die von der Lichtquelle durch ein Fenster auftreffende Strahlung, wird von einem Messgerät erfasst. Diese Geräte müssen Wellenlängen zwischen 280nm bis 320nm und 320nm bis 400nm auf der Prüfebene des Moduls messen können. Dabei ist eine Messunsicherheit der Bestrahlungsstärke von  $\pm 15\%$  der Grenzwert. Es ist sicherzustellen, dass die Bestrahlungsstärke  $250 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$  auf der Prüfebene nicht übersteigt. Nach der erfolgreichen UV-Prüfung folgen die Sichtprüfung und die Prüfung des Kriechstroms (feucht).[17]

### Nasser-Kriechstrom-Test (WLC)

Mit dem Wet Leakage Current (WLC) Test wird ein PV-Modul auf die Isolierung getestet. Unter Simulation von nassen Umwelteinflüssen (Regen, Nebel, Tau, Schnee usw.) wird die Wirkung auf die aktiven Schaltkreise geprüft. Versagensarten und Sicherheitsrisiken durch z.B. Korrosion können dabei detektiert werden und sind zu vermeiden.

Das PV-Modul wird für die Prüfbedingung in ein Wasser/Netzmittellösung-Bad flach eingetaucht. Das Modul muss vollständig in die Wanne mit der Flüssigkeit passen. Nur die Eingänge an den Anschlussdosen befinden sich oberhalb des Flüssigkeitsspiegels. Mit einem Sprühgerät kann die Anschlussdose benetzt werden, falls diese dabei nicht untergetaucht werden kann. An die Flüssigkeit sind bestimmte Anforderungen gestellt. Der Widerstandswert darf maximal  $3500 \frac{\Omega}{\text{cm}}$  und die Temperatur der Flüssigkeit muss  $22 \pm 2^\circ\text{C}$  betragen. Für die Überprüfung des Schaltkreises, werden die Kontakte des Moduls kurzgeschlossen. Diese werden mit der positiven Klemme eines Prüfgeräts verbunden. Das Prüfgerät muss in der Lage sein eine Gleichspannungsquelle mit Strombegrenzung und einer Spannung von mindestens 500V aufzubauen. Die negative Klemme wird mit einem metallischen Leiter verbunden. Dieser Leiter wird in die Flüssigkeit getaucht. Daraufhin kann das Prüfgerät eingeschaltet werden. Wenn die Systemspannung des PV-Moduls mehr als 500V beträgt, ist dieser Wert als Spannungsquelle einzustellen. Der Vorgang dauert zwei Minuten. Der Isolationswiderstand wird mit einem Messinstrument bestimmt. Danach wird die Spannung auf 0V gesetzt. Die Klemmen des Prüfgeräts werden kurzgeschlossen. Damit baut sich die Spannung im Modul ab. Nach der Prüfung ist das PV-Modul gründlich zu reinigen, um die Wasser-/Netzmittellösung zu entfernen. [17]

## 2.2 Leitklebstoffe

### 2.2.1 Eigenschaften und Anwendung von Leitklebstoffen

Die Electrically Conductive Adhesives (ECAs) werden zu deutsch Leitklebstoffe genannt. Wie der Name sagt, sind diese Klebstoffe elektrisch leitfähig. Für diese Eigenschaft wird ein elektrisch leitender Füllstoff verwendet. ECAs bestehen daher aus einer Polymermatrix und Metallpartikeln. Gängige Polymere sind Epoxide, Acrylate und Silikone. Für den Füllstoff bzw. als Metallplättchen werden meistens Silber und silberbeschichtetes Kupfer oder Legierungen auf Zinnbasis verwendet. Die einzelnen Metallpartikel können die Form von Blättchen oder Kugeln darstellen.[8] Die vom Hersteller abhängige Auslegung der Füllstoffe und Polymermatrix führen zu verschiedenen mechanischen und elektrischen Eigenschaften der Leitklebstoffe. Außerdem kann sich die Zusammensetzung auf unterschiedliche Verarbeitungs- und Lagerungsbedingungen auswirken. [9]

Leitklebstoffe können in isotrop (ICAs) und anisotrop (ACAs) unterteilt werden. Bei den isotropen elektrisch leitfähigen Klebstoffen wird kein äußerer Druck benötigt und die meisten dieser Klebstoffe härten zwischen 120°C und 180°C aus. Besonders sind die sich ausbildenden Kontraktionskräfte der aushärteten Polymermatrix. Dahingegen wird bei anisotropen leitfähigen Klebstoffen ein erheblicher Druck benötigt, um die Leitfähigkeit herzustellen. Bei ACAs ist eine geringe Menge an Füllstoffen enthalten, deren Leitfähigkeit in Richtung der einwirkenden Druckkraft verbessert wird.

Die Verarbeitung der Klebstoffe auf eine Solarzelle kann durch Siebdruck, Dispensen oder Strahldruck erfolgen. Die Aushärtung der ECAs kann in zwei Schritte unterteilt werden. Der erste Schritt kann als Voraushärtung bezeichnet werden. Dieser beginnt nach der Platzierung des Klebstoffs und der Komponenten. Die endgültige Aushärtung erfolgt während des Laminierungsprozesses in der Modulproduktion. Die Realisierung dessen ist hauptsächlich in Linienproduktion umsetzbar. Ansonsten wird die vollständige Aushärtung bereits im ersten Schritt vollzogen.[8]

### 2.2.2 Klebstoffcharakterisierung

Eine Alternative für den Bleieinsatz in der Photovoltaik-Industrie stellen Leitklebstoffe dar. Sie sind eine neuartige Zellverbindungstechnologie und können unter geringen Temperaturen bleifrei verarbeitet werden. Die Leitklebstoffe unterscheiden sich in ihren Eigenschaften durch vielseitige Hersteller- und Produktvarianzen. Die Erstellung von wichtigen Leistungsmerkmalen erfolgt über ein Prüfschema für die mit Klebstoff gefertigten Module. Damit werden die Auswahl und Anwendbarkeit von Leitklebstoffen eingeordnet. [9]

#### Dynamische Differenz Kalorimetrie

Die Differential Scanning Calorimetry (DSC) Messung ist eine thermische Analyse Technik, die verwendet wird, um die Wärmeflussänderungen in einer Probe zu messen, während sie einer kontrollierten Temperaturänderung unterzogen wird. Kalorimetrie steht für die Messung von Energiebeträgen. Dazu zählen in dem Fall Wärmemengen (Wärme Q) und Umwandlungsenergien (endotherme/exotherme Prozesse H). Durch die Messung dieser Energieänderung können wichtige Informationen über die Eigenschaften einer Substanz gewonnen werden, wie zum Beispiel Schmelz- und Erstarrungstemperaturen, Kristallisierungsverhalten und Reaktionenthalpie. Das Funktionsprinzip zur Ermittlung der Wärmeströme beruht auf der Referenzierung zwischen einer Probe und einer Vergleichsprobe. Dabei durchlaufen beide Proben eine konstante Heizrate bzw. einem festgelegtem Temperatur-Zeit Verlauf. Die Temperaturen werden jeweils über die Zeit gemessen und eine Temperaturdifferenz wird zwischen den Proben gebildet (Abbildung 12). Die DSC Messung ist ein leistungsstarkes Werkzeug in

verschiedenen Bereichen wie Materialwissenschaften, Pharmazie, Lebensmittelindustrie und Polymerchemie. [18]

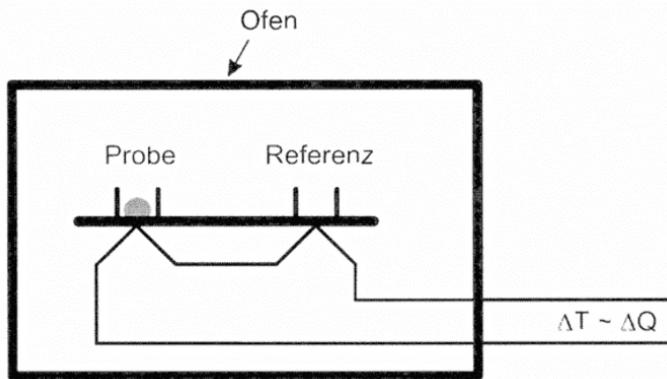


Abbildung 12: Versuchsschema einer Wärmestrom-Differenz-Kalorimetrie  
[18]

Die Wärmemengen, die während einer physikalischen oder chemischen Umwandlung eingebracht oder freigesetzt werden, verursachen unter konstantem Druck eine Änderung der inneren Energie. Diese wird auch als Enthalpieänderung  $\Delta H$  bezeichnet. Prozesse bei positiver Enthalpieänderung sind zum Beispiel Schmelzen, Verdampfen und Glasübergänge (Abbildung 13). Hingegen zählt zu den negativen Enthalpieprozessen Kristallisation, Härtungsverlauf und Zersetzen. Endotherme Effekte werden als Enthalpieerhöhung in positiver y-Achse dargestellt (Abbildung 13). Entsprechend sind exotherme Effekte als Enthalpieerniedrigung in negativer y-Achse zu verstehen. [19]

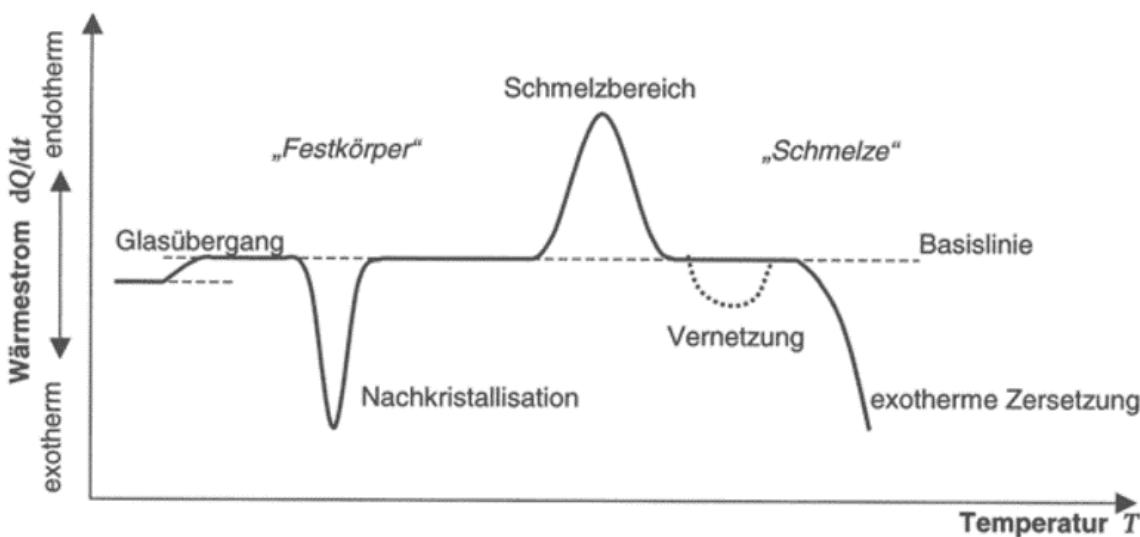


Abbildung 13: Reaktionsbereiche einer DSC-Kurve  
[18]

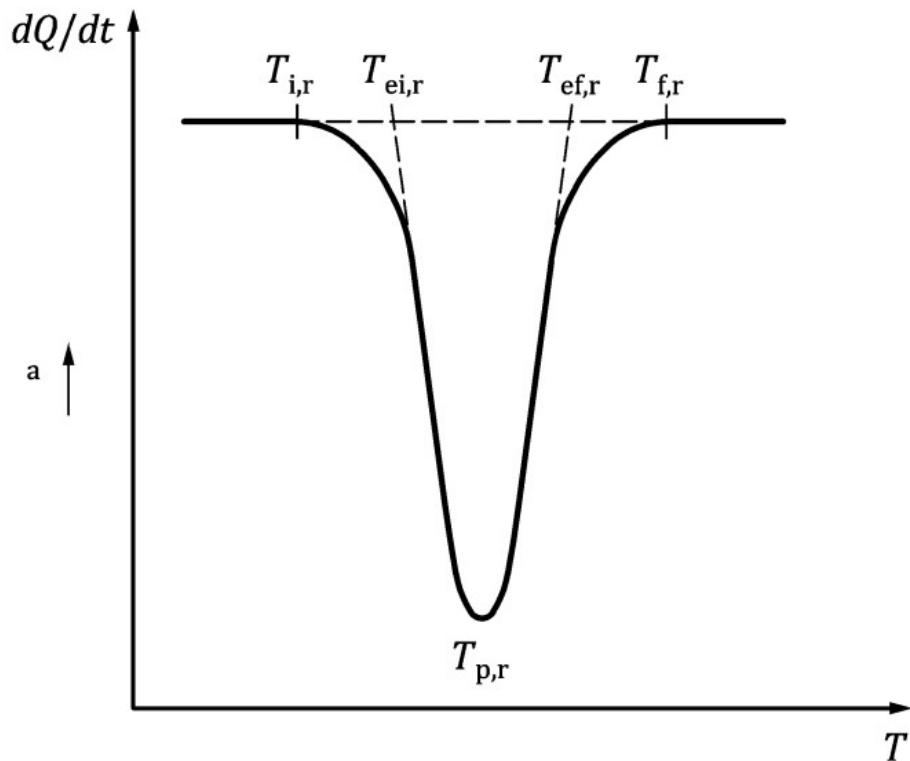
Die Messmethoden unterscheiden sich in Wärmestrom-Differenz-Kalorimetrie und Dynamische Differenz Kalorimetrie mit Leistungskompensation. Im folgenden wird nur auf das erste Grundprinzip eingegangen. Zwischen einer Probe und einer Referenz wird eine Temperaturdifferenz gemessen. Aus der Temperaturdifferenz wird die Differenz der Wärmeströme abgeleitet. Dieser Wärmestrom wird über die Temperatur oder der Zeit aufgetragen. [20] Bei der Wärmestrom-Differenz-Kalorimetrie befinden sich die Probe und die Referenz in der gleichen Messzelle. Die DSC-Messung läuft unter einer festgelegten Reihenfolge ab. Die aufeinander

folgenden Schritte für eine Messung sind Probenpräparation, Einwiegen, Verschließen des Tiegels, Spülgas und Parametereingabe.

Bei der Präparation sollte besonders auf das Probenmaterial und auf die Vorbereitung geachtet werden. Das Probenpräparat ist ein repräsentativer Anteil zur Bestimmung der Eigenschaften eines größeren Objekts. Es können zum Beispiel Komplikationen in der Messung durch Eigenspannungen der Probe entstehen. Daher sind allgemein die Proben möglichst flach und flächendeckend im Tiegelboden zu platzieren. Zudem sollte die Entnahmestelle, die Menge der selektiven Entnahme bedacht sein und eine fachgerechte Ausführung der Probenentnahme erfolgen. Für die Einwaagemenge sind Genauigkeiten von  $\pm 0,01\text{mg}$  einzuhalten. Es empfiehlt sich zur Bestimmung der Kristallisation und von Schmelztemperaturen der Polymere etwa  $5 - 10\text{mg}$  Präparationsgewicht zu verwenden. Für Glasübergänge oder die Bestimmung von Wärmekapazitäten werden höhere Massen von  $10 - 40\text{mg}$  empfohlen. Der Tiegel sollte eine gute Wärmeleitfähigkeit besitzen und formstabil sein. Damit wird der funktionierende Kontakt zwischen Sensor und Tiegel sichergestellt. Es werden in den meisten Fällen Einwegtiegel aus Aluminium verwendet. Für große Temperaturbereiche (über  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) werden Materialien wie Gold, Platin und Quarzglas eingesetzt. Die Tiegel besitzen für die Verhinderung eines Spannungs- oder Druckaufbaus Löcher in dem Deckel. Die Referenzprobe stellt ein leerer Tiegel dar. Als Spülgas wird Stickstoff verwendet. Das stellt die Reaktion mit der Umgebung ab und schafft eine abgeschlossene Gasatmosphäre in der Messzelle. [19]

Die Ergebnisse der DSC-Prüfung sind nur solange miteinander vergleichbar, wenn das gleiche Temperatur-Zeit-Programm verwendet wurde. Die Ergebnisse können weiterhin von den Parametern Starttemperatur, Endtemperatur, Isothermphasen, Heizrate, Ofenatmosphäre, Tiegelart/-größe und Probenmasse/-geometrie beeinflusst werden. [18] Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt grafisch aus der DSC-Kurve. Charakteristische Werte sind in Abbildung 14 zu sehen. Die Basislinie ist der gleichmäßige Verlauf der Messkurve ohne thermische Umwandlungsvorgänge der untersuchten Probe. Wenn die Basislinie interpoliert ist (gestrichelt in Abb.), ist es als wäre gedanklich keine Wärme aufgenommen oder frei gesetzt worden. Die Peaktemperatur ist ein Maximum oder Minimum einer Zustandsreaktion. Diese Temperatur gibt die Schmelz- und Kristallisationstemperatur an und ist entscheidend für die Materialidentifikation. An dieser Stelle findet die höchste Reaktionsgeschwindigkeit statt. Für die Bestimmung der Enthalpie wird grafisch die Fläche innerhalb der Kurve zwischen Peak und der Basislinie bestimmt. Der Anfang und das Ende der Reaktion/Umwandlung wird von der Onset- und Endtemperatur bestimmt. Die Onsettemperatur entspricht dem Wert an dem die DSC-Kurve von der extrapolierten Basislinie abweicht. Für die Anfangs- und Endtemperaturen werden extrapolierte Werte als Schnittpunkte der extrapolierten Basislinie und einer Tangente der DSC-Kurve angegeben. [18] [20]

Die DSC-Messung wird häufig zur Charakterisierung von Klebstoffen eingesetzt. Durch die DSC-Analyse können entscheidende Eigenschaften der Klebstoffe bestimmt werden. Diese Informationen sind entscheidend für die Auswahl des richtigen Klebstoffs für spezifische Anwendungen sowie für die Optimierung von Herstellungsprozessen. Die DSC-Messung kann auch verwendet werden, um die Alterungseigenschaften von Klebstoffen zu untersuchen und um Veränderungen in ihren thermischen Eigenschaften im Laufe der Zeit zu verfolgen. Insgesamt ist die DSC-Analyse ein wertvolles Werkzeug zur Qualitätssicherung und Entwicklung von Klebstoffen. [18]

**Legende:**

- $dQ/dt$  ist der Wärmestrom [W/g]
- $T$  ist die Temperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]
- $a$  ist die endotherme Richtung
- $T_{i,r}$  bzw.  $T_{f,r}$  ist der Temperatur Punkt des Reaktionsbeginn bzw. Reaktionsende
- $T_{ei,r}$  bzw.  $T_{ef,r}$  ist die extrapolierte Anfangs- bzw. Endtemperatur
- $T_{p,r}$  ist die Peaktemperatur

Abbildung 14: Grafische Darstellung und Kennwerte einer DSC-Kurve  
[21]

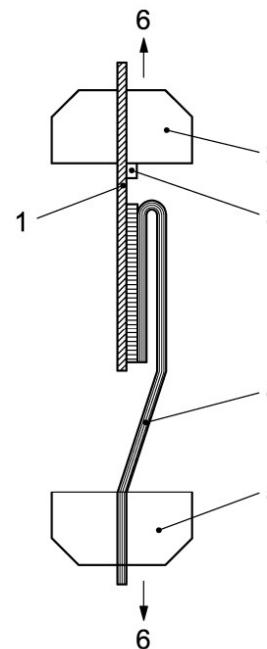
### Schältest

Für die Bestimmung des Schälwiderstands von Klebungen aus zwei Fügeteilen eignet sich der 180° Schälversuch. Unter festgelegten genormten Bedingungen aus der DIN EN ISO 8510-2 wird ein flexibles Teil von einem starren abgezogen bzw. geschält. Ein anderes Verfahren ist der 90° Schälversuch. Dieser wird für flexible Teile verwendet, welche unter einem 180° Schälwinkel reißen, brechen oder delaminieren. Der Schälversuch kann an verschalteten Solarzellen durchgeführt werden. Auf Grundlage der DIN EN ISO 8510-2 ist speziell für diese Anwendung der Normentwurf IEC TS 62788 eingeführt. [22]

Die Fügeteile müssen dick oder stark genug sein, damit der Widerstand gegenüber der zu erwartenden Zugkraft ausreichend ist. Das starre Fügeteil sollte eine Breite von  $25,0 \pm 0,5\text{mm}$  und eine Länge von mindestens 200mm besitzen. Das flexible Fügeteil sollte sich unter einem Winkel von 180° biegen lassen und eine Mindestlänge von 350mm betragen. Die flexiblen Fügeteile sollten genau so breit sein wie die starren. Für Materialien, die schnell ausfransen wäre es besser, wenn die flexiblen Teile breiter sind. Die Maße sind genau zu bestimmen und zu protokollieren. Die Verklebung ist mit einer großen Prozesssicherheit zu gestalten. Die auftretenden Schwankungen in der Klebung soll so gering wie möglich sein. Das Kleben sollte nach den Vorgaben des Klebstoffherstellers erfolgen.[22]

Um die Prüfung durchführen zu können, wird zu Beginn eine Klebung zwischen zwei Fügeteilen hergestellt. Die Prüfumgebung ist unter Normalklima (ISO 291) zu klimatisieren. Zuerst wird das ungeklebte Ende zurückgebogen. Das starre Teil ist fest einzuspannen. Das flexible Fügeteil wird separat eingespannt. Die Fügeteile werden an einem offenen Beginn in Längsrichtung der Verklebung mit gleichmäßiger Geschwindigkeit getrennt. Die Trennung schreitet der Klebeebene entlang zum anderen Ende bis die Verklebung vollständig aufgehoben ist. Die Kraft wirkt parallel zur Klebeschicht und wirkt an dem Angriffspunkt des flexiblen Fügeteils (Abbildung 15). Zum Einsatz kommen Universalprüfmaschinen und entsprechende Halterungen. Die Prüfmaschine kann den Versuch mit einer konstanten Trenngeschwindigkeit durchführen. Eine empfohlene Trenngeschwindigkeit liegt bei  $100 \pm 10 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ . Man benötigt eine Kraftmessvorrichtung mit einem Anzeige- und/oder Aufzeichnungsgerät. Die angezeigte Kraft sollte um maximal 2% von der tatsächlichen Kraft abweichen. Die Halterungen müssen die Wirkungsrichtung der Kräfte realisieren. Das starre Fügeteil bildet die fest eingespannte Basis. Das flexible Fügeteil ist umschließend einzuspannen. Die Einspannung um das flexible Fügeteil wird entsprechend parallel zur Klebung ausgerichtet.[22] Der Vergleich zwischen den Abbildungen 15 und 16 verdeutlicht den Zusammenhang der Normung und die Übertragung der Anwendung auf Solarzellen.[23]

Das Ergebnis der Prüfung ist eine Kraft-Trenngeschwindigkeits-Kurve (Abbildung 17). Diese wird graphisch und möglichst automatisch während des Schälversuchs aufgezeichnet. Die Strecke für den gesamten Bereich sollte 100mm betragen. Die ersten 25mm davon sollten verworfen werden. Wesentliche Werte aus den Ergebnissen sind die Durchschnittskraft, die größte und die geringste Kraft. Diese Werte werden zwischen allen Proben als arithmetisches Mittel ausgewertet. Außerdem ist das Bruchbild zu vermerken (z.B. Adhäsions-, Kohäsions- oder Fügeteilbruch). [22]

**Legende**

- |   |                                 |
|---|---------------------------------|
| 1 starres Fügeteil  | 4 flexibles Fügeteil            |
| 2 Halterung   | 5 Halterung (selbstausrichtend) |
| 3 klebstoffabweisender Streifen<br>(siehe Anmerkung in 5.2) | 6 Zugrichtung                   |

Abbildung 15: Versuchsschema der Schälprüfung nach DIN EN ISO 8510-2  
[22]

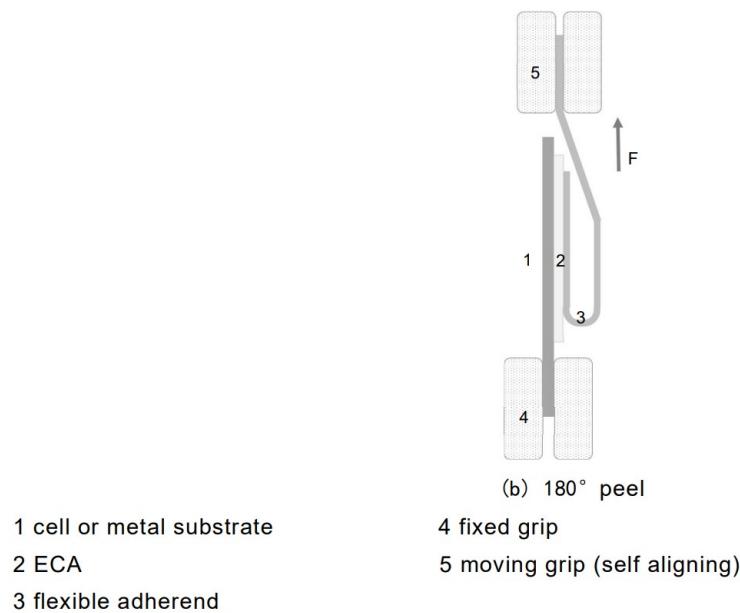
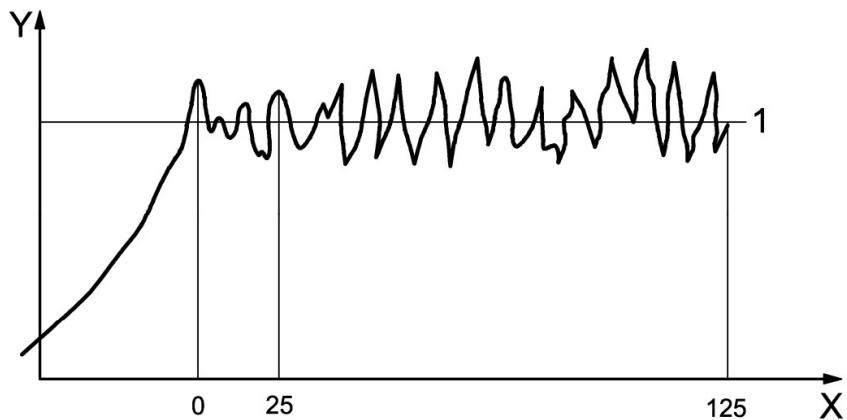


Abbildung 16: Schälprüfungschemas einer mit Leitklebstoff verschalteten Solarzelle (IEC TS 62788)  
[23]

**Legende**

- 1 geschätzter Durchschnittswert der Schälkraft
- X Schälstrecke, mm
- Y Kraft, N

Abbildung 17: Beispiel einer aufgezeichneten Schälkraft-Weg-Kurve  
[22]

Der Widerstandswert des Klebstoffs wird als Schälfestigkeit bezeichnet. Er ist der Widerstandswert aus der Kraft, mit der das flexible Teil abgezogen wird, über die Breite der geklebten Ebene. In Bezug auf die Photovoltaik-Technologie, wird der Schältest an den ECAs angewendet. Dabei kann die Anwendung durchgeführt werden, um die Haftfestigkeit des ECAs zwischen Bändchen, flexiblen Rückseitenfolien oder anderen flexiblen PV-Materialien und der Solarzelle zu prüfen. Die Vorgehensweise ist aus dem allgemeinen Anwendungsbereich zu übertragen. [23]

Die Schälfestigkeit von ECA auf einer Solarzelle kann folgendermaßen berechnet werden:

$$\sigma_{180^\circ} = \frac{F}{W} \quad (2)$$

Dabei ist

- $\sigma_{180^\circ}$  die Schälfestigkeit unter dem Winkel von 180 Grad [N/mm];
- $F$  die Schälkraft [N];
- $W$  die Breite des Klebstoffs (ECA) in dem Klebstoffbereich

[23]

### 3 Durchführung

Aus der Aufgabenstellung haben sich verschiedene Arbeitsschritte heraus entwickelt. In diesem Abschnitt soll ein Überblick über die verschiedenen Arbeitsschritte für die Umsetzung des Hauptziels (Kapitel 1.3) geschaffen werden. Die nötigen Schritte sind teilweise miteinander verknüpft und beeinflussen sich gegenseitig. Damit dies verständlicher zu betrachten ist, sind folgende Phasen definiert:

- Vergleichen von Leitklebstoff
- Leitklebstoffverbindung Charakterisierung
- Produktionstechnische Prozesse der Stringherstellung
- Fassadenmodul Fertigung
- PV-Fassadenmodulen Charakterisierung

Die Verknüpfungen der verschiedenen Arbeitsschritte werden in dem Versuchsplan schematisch dargestellt (Abbildung 18). Die Prozesse sind mit Inputs wie z.B. Materialien und Outputs z.B. die Ergebnisse aus verschiedenen Messmethoden beschrieben. Anhand der Flussrichtung der Pfeile ist die Notwendigkeit und die Reihenfolge der Prozessschritte dargestellt.

#### 3.1 Versuchsplan

Die gesamte Durchführung der Charakterisierung ist in zwei Hauptstufen zu unterteilen. Die erste Stufe ist die Charakterisierung von Leitklebstoff. Die zweite Stufe ist die Charakterisierung der Module mit den darin vorgesehenen Modultests [9]. Für die Analyse der Klebstoffe werden unterschiedliche Tests ausgewählt. Mit diesen können zum Beispiel Ergebnisse über die Aushärtezeit bestimmt werden. Hinzu kommen weitere Charakterisierungen über die Verbindung und Haftbarkeit, die durch den Klebstoff hergestellt wird. Dafür wurden die Messmethoden Dynamische Differenz Kalorimetrie und Schältests festgelegt. Anhand dieser Charakterisierung kann eine Übertragung der Ergebnisse auf die Stringproduktion (Verklebung der Zellen) gebildet werden, sodass der Produktionsprozess mit dem Klebstoff angepasst werden kann. Die Charakterisierung liefert die notwendigen Daten für die Optimierung der Stringfertigung. In dieser Beziehung stellt die Aushärtezeit einen Parameter für den Vernetzungsprozess in der Stringherstellung dar. Der Klebstoff kann bei der DSC- Prüfung unabhängig von der Produktion auf den Vernetzungscharakter geprüft werden. Die daraus gewonnene DSC-Kurve liefert Daten für die Temperatur-Zeit-Verläufe. Aus den Daten werden Rückschlüsse über die Einstellung der Maschinenparameter gezogen. Dadurch können die Maschinenparameter angepasst werden. Zum Teil ist die Produktion vorab notwendig, um den Leitklebstoff charakterisieren zu können. Bei den Schältests werden die gefertigten Strings benötigt. Diese werden in dem gefertigten Zustand auf die mechanische Verbindung charakterisiert. Die mechanische Festigkeit liefert erst dann Rückschlüsse über die Fertigungsparameter. Hier sollten die Parameter so angepasst werden, dass die Festigkeit steigt. In Wechselwirkung mit der Optimierung der Stringfertigung entwickelt sich ein iteratives Testverfahren. Das Beschriebene lässt sich aus dem Schema (Abbildung 18) ablesen.

Zuerst erfolgt die Überprüfung der Aushärtungs- bzw. Vernetzungseigenschaft des Klebstoffs. Dafür werden zwei verschiedene Klebstoffeigenschaften (ECA1 und ECA2) verwendet. Die Klebstoffe werden der DSC-Messmethode (Kapitel 3.4.1) unterzogen. Aus diesen Informationen kann der Stringprozess geplant und durchgeführt werden.

Die Grundlage soll dabei sein, zu verstehen, was genau in der Produktion mit dem Klebstoff geschieht. Unterschieden wird in die Prozesse: Klebstoffauftrag, Verbindezuführung und Klebstoffaushärtung. Während diesen Phasen kann die Eigenschaft des Leitklebstoffs

verändert werden. Die bedeutendste Phase ist die Aushärtung und Vernetzung. Die Annahme sollte sein, dass der Klebstoffauftrag und die Verbinder-Positionierung ohne Einschränkungen funktioniert. Daher sollte der Klebstoff und die Verbinderpositionierung stets unter Berücksichtigung stehen. Durch diese Untersuchung werden die wichtigsten Parameter für die Vernetzung und deren Anpassungsmöglichkeiten erkannt. Bei der Vernetzung sind die Hauptdaten der Temperatur- und Zeit-Verlauf. Hierbei werden Temperaturen hinsichtlich der Haltedauer und der Temperaturpeaks angepasst. Die Strings werden über die Schälfestigkeit in der Schälprüfung ausgewertet. Ist der Zielwert erreicht, können Strings mit einer hohen Schälfestigkeit gefertigt werden. Solange dies nicht der Fall ist, werden die Prozessparameter überprüft und verbessert, bis sich der Zielwert (Kapitel 3.4.1) eingestellt hat. Das erfordert die sich wiederholende Stringherstellung.

Wenn die Fertigung der Strings abgeschlossen ist, wird die zweite Charakterisierungsphase eingeleitet. Dafür werden die produzierten Strings benötigt. Die Fertigung der Fassadenmodule erfolgt mit den optimierten Strings. Die Fertigung der Module erfolgt ähnlich der Standardfertigung von PV-Modulen. Sie wird lediglich hinsichtlich des Materials an die Auslegung von Fassaden angepasst. Dafür wird die Aluminium-Rückabdeckung und das Verkapselungsmaterial für den Prozess geprüft. Es werden Prototypen für die verschiedene Auslegung von Proben gefertigt, um die Realisierung der Prozesse (z.B. Lamination) sicherzustellen. Sobald die Prototypen ohne äußerliche grobe Fehler den Prozess überstanden haben, kann die Probenproduktion gestartet werden. Mit diesen und weiteren Materialien werden Fassadenmodule produziert. Diese stellen die Proben C1 bis C5 dar. Sie werden entsprechend der Probenübersicht (Kapitel 3.2) aus verschiedenen Materialanwendungen produziert. Von den hergestellten Modulen werden EL-Untersuchungen und unter STC die I-U-Kennlinie aufgenommen. Daraufhin werden die Module (gemäß IEC 61215 und DIN EN 61730) getestet. Hinter jeder Sequenz stecken verschiedene Abläufe der Beanspruchung. Innerhalb der Messungen werden zwei Leitklebstoffe miteinander verglichen. Speziell für den zweiten Klebstoff liegen weniger Informationen über die Aushärtung vor (Kapitel 3.2). Dabei soll zu den klebstoffgefertigten Modulen jeder Testreihe ein konventionell gefertigtes bzw. gelötetes Modul als Referenz dienen. Sequenzielle Bewitterungstests sind bspw. Feucht-Hitze-Tests(DH) und Thermocycling-Tests(TC). Die Proben werden erneut mittels EL und unter STC untersucht. Zum Schluss können die Ergebnisse der EL-Bilder und die Arbeitspunkte der Module in der I-U-Kennlinie zusammengefasst und die Proben untereinander verglichen werden. An dieser Stelle ist auf die Unterschiede der Proben und mögliche Einflüsse zu achten.

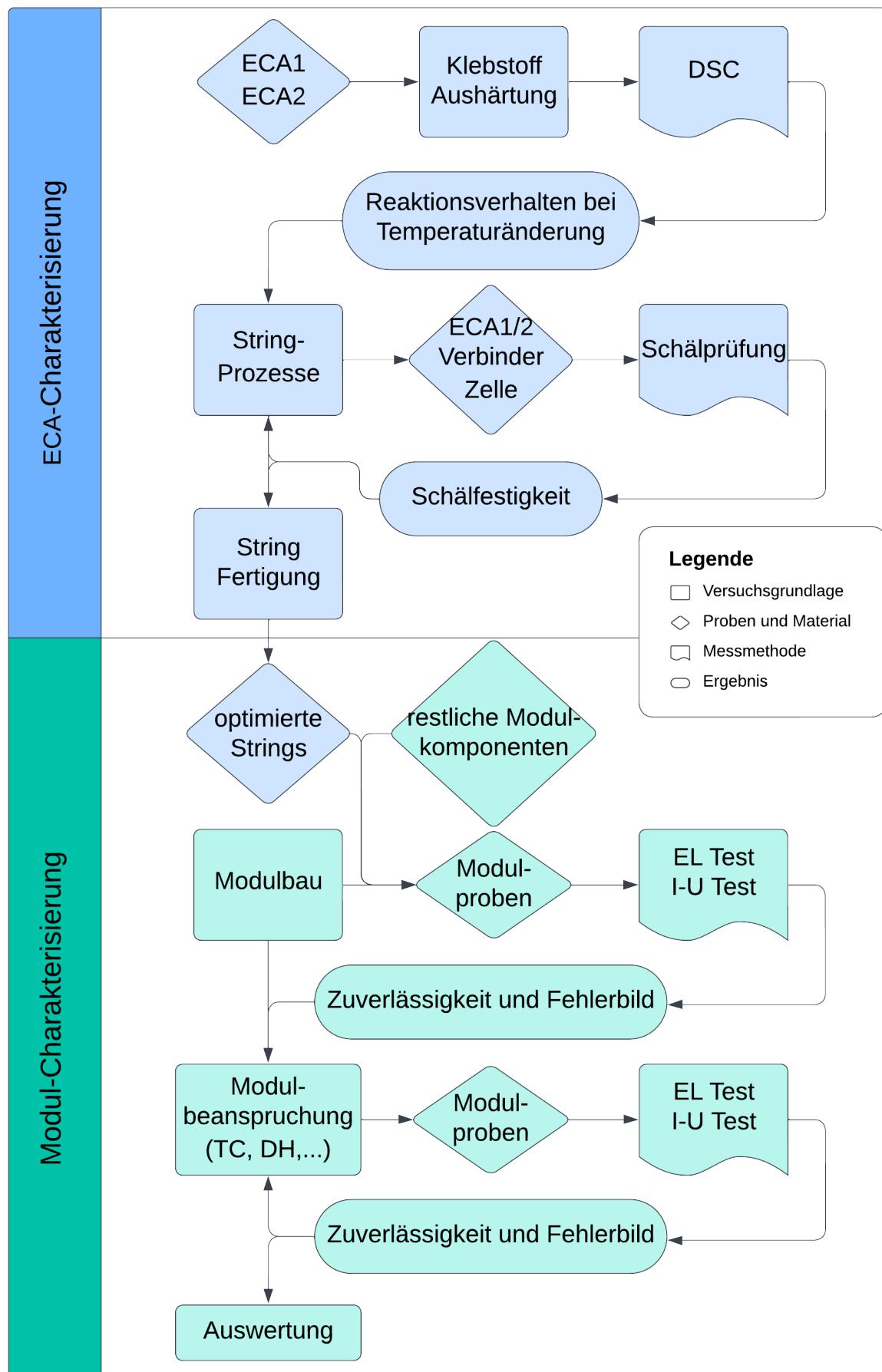


Abbildung 18: Schematische Darstellung des Versuchsplans

## 3.2 Probenübersicht

In diesem Kapitel werden im ersten Abschnitt alle verwendeten Materialien zusammengefasst. Die Verwendung der Materialien ist unterschiedlich ausgefallen. Außerdem wurden Untersuchungen direkt am Material oder an Materialkombinationen durchgeführt. Über die Informationen zur Probenherstellung ist das zweite Kapitel aufschlussreich. Darin wird die Verwendung der verschiedenen Materialien beschrieben.

### 3.2.1 Materialien

#### Klebstoffe

Für den Vergleich der unterschiedlichen Eigenschaften von Leitklebstoffen werden zwei verschiedene Klebstoffe verwendet. In diesem Fall wird ein Klebstoff auf Epoxid- und ein Klebstoff auf Acrylatbasis verwendet. Der Epoxidharz-Klebstoff wird im weiteren Verlauf mit ECA1 abgekürzt. Der acrylatbasierte Klebstoff wird als ECA2 bezeichnet. Beide Leitklebstoffe besitzen die Eigenschaft unter Einfluss von Wärme auszuhärten und sind durch den Füllstoff Silber elektrisch leitfähig. Das Temperatur-Zeit Verhalten ist nach den Herstellerangaben zwischen beiden Klebstoffen schon deutlich unterschiedlich. Diese und die wichtigsten Parameter sind in den Tabellen 1 und 2 zusammengefasst.[24] [25]

Tabelle 1: ECA Eigenschaften im flüssigen Zustand

Eigenschaft (im flüssigen Zustand)	Einheit	ECA1	ECA2
Chemische Basis	-	Epoxid	Acrylat
Füllstoff	-	Silber	Silber
Komponenten	-	2	1
Mischungsverhältnis (Masse)	-	100:11	100:0
Lagerstabilität	d	Komponente A/B: 365 (bei A: 6-8°C, B: 23°C)	180 (bei -18°C)
Topfzeit	h	48	-

[24] [25]

Tabelle 2: ECA Eigenschaften im gehärteten Zustand

Eigenschaften der Härtung/ im gehärteten Zustand	Einheit	ECA 1	ECA 2
E-Modul	N/mm <sup>2</sup>	3400	-
Zugscherfestigkeit	N/mm <sup>2</sup>	13	9,1
Härtezeit (100°C)	s	2400	-
Härtezeit (120°C)	s	600	-
Härtezeit (150°C)	s	300	10-15
Härtezeit (160°C)	s	240	-
Härtezeit (170°C)	s	120	-
Härtezeit (180°C)	s	80	-

[24] [25]

### Lot

Für die Referenz-Proben wird die Löttechnik eingesetzt. Das verwendete Lot besteht aus einem Verhältnis von 60% Zinn und 40% Blei. Das Lot ist als Beschichtung auf den Verbindern aufgetragen. Die Verbindung mit der Zelle wird durch den Wärmeeintrag realisiert und das Lot des Verbinders mit der Oberfläche der Zelle vernetzt. Um die Vernetzung zu unterstützen, muss Flussmittel für die Reinigung der Zelle eingesetzt werden. In diesem Fall wird Isopropanol verwendet. Es reinigt die beschichtete Oberfläche der Verbinder und reduziert die Oxidation auf dem Lot. Die Lot-Verbinder weisen eine Breite von 0,9mm und eine Höhe von 0,2mm auf.

### Verbinder (ECA Anwendung)

Für die Verbinder wird ein Flachdraht mit einer Breite von 0,5mm verwendet. Der Draht besteht hauptsächlich aus Kupfer. Die Oberfläche ist mit Silber beschichtet. Dadurch erhält man einen Anteil von etwa 3% Silber für diesen verwendeten Draht. Der Flachdraht weist außerdem eine Dicke von 0,2mm und pro Spule eine Länge von 9700m auf. Der Flachdraht wird durch Umformung hergestellt. Das wäre in diesem Fall das Ziehen und Walzen von blanken oder galvanisch beschichteten Runddrähten zu Flachdrähten. Die Festigkeit des Drahtes liegt bei  $235,4 \frac{N}{mm^2}$ . Der elektrische Widerstand des Flachdrahtes liegt bei  $178,4 \frac{m\Omega}{m}$ . In Abbildung ?? sind die Flachdrähte in Arbeitsposition zu erkennen. Diese Art von Verbinder werden nur für die Anwendung von Leitklebstoff-Proben verwendet.

### Zellen

Die Solarzellen sind sogenannte bifaziale Solarzellen. Kurz gesagt besitzen diese eine beidseitige Beschichtung, um die Leistung der Zelle zu steigern. Die Solarzelle ist im Standard-Zellformat, welches der Größe M6 entspricht (Abbildung 19). Nur für die Lot-Proben wird ein abweichendes Format gewählt. Dieses Format ist für die Lot-Stringherstellung der Maschinenstandard. Die Größe der zu lögenden Zellen ist M3 (Abbildung 20). Die Standardisierungen geben die Flächen der Zellen vor. Ein weiterer Unterschied zwischen den zu klebenden und zu lögenden Zellen ist die Anzahl der Busbars. Diese geben die Anzahl der zu fügenden Verbinder vor. Für eine geklebte Zelle sind 9 Busbars vorhanden. Bei den gelöteten Zellen sind es 5 Busbars. Diese Unterschiede könnten sich auf die Ergebnisse auswirken. In diesem Fall gleicht sich die Verbinderbreite und die Anzahl der Busbars aus. Die Anzahl der Busbars ist bei den ECA-Zellen größer als bei den gelöteten Zellen. Hingegen ist die Verbinderbreite der gelöteten Zellen größer als die der ECA-Zellen. Dadurch liegt insgesamt bei Lot- oder ECA-Verbindung die gleiche Verschaltung auf der Zelle vor.



Abbildung 19: ECA Solarzelle



Abbildung 20: Lot Solarzelle

### Module

Die Module sind speziell für den Anwendungsbereich in der Gebäudeintegration geeignet. In diesem speziellen Fall handelt es sich um Fassadenmodule. Die Grundschicht stellt die Aluminium-Fassade dar. Dies bildet die Rückseite für das PV-Modul. Das Fassadenblech weist eine Fläche von  $900 \cdot 500\text{mm}^2$  auf. Die Laminationsfläche davon ist zentral auf dem Blech. Jeweils links und rechts davon befinden sich zwei Blechkanten. An diesen Stellen ist das Blech so umgeformt, dass nach vorn stehende Rechtecke vorhanden sind. Die Kanten sind 20mm breit und ragen etwa 20mm von der ebenen Fläche nach vorn. Die zwei Kanten haben einen mittigen Abstand untereinander von 70mm. Die Fläche für die Lamination stellt eine Länge von 900mm und eine Breite von 200mm dar. Die Materialien für die Laminationsschichten sind in Abbildung 21 dargestellt.

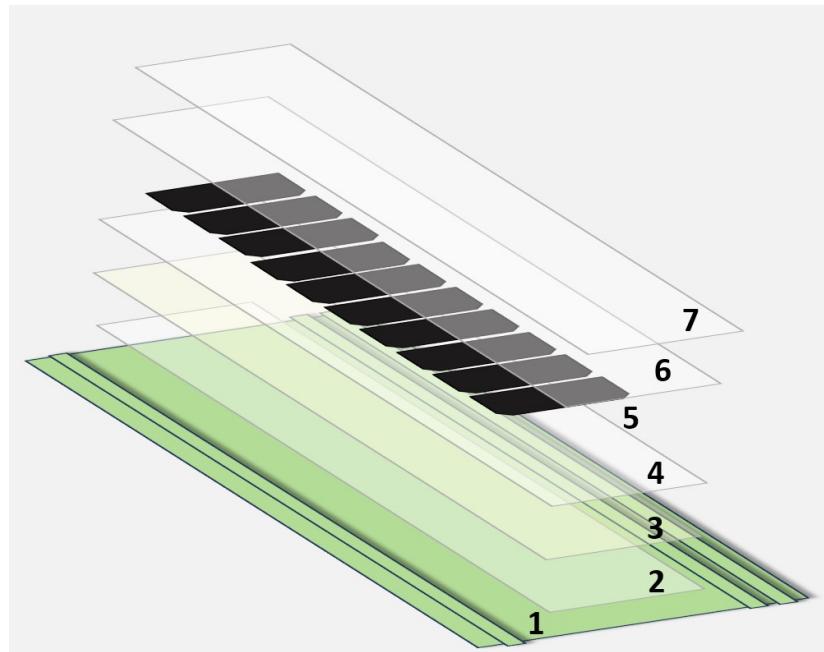


Abbildung 21: Schematische Darstellung des schichtweisen Aufbaus der Fassadenmodule

Für die verschiedenen Schichten kommt gemäß dem Probenplan (Kapitel 3.2.2) EVA (Ethylen-Vinylacetat) oder POE (Polyolefin Elastomer) (2,4) auf die Aluminium-Rückseite (1). Zwischen den Schichten befindet sich eine Zwischenlage aus MPE oder Glasfasernetz (3). In der Mitte liegt die fünfte Schicht. Diese stellt den Zell-String dar. Die sechste und siebte Schicht bilden die Deckschicht und sind erneut aus POE oder EVA. Die abschließende äußere Schicht

bildet eine Glasplatte. Die Aufteilung der Schichten wird gemäß der Probenaufteilung variiert. Dies soll eine Varianz der verschiedenen Schutzschichten bewirken und damit verbunden einen unterschiedlich schützenden Effekt darstellen. Daraus können Rückschlüsse über den unterschiedlichen Einsatz von Verkapselungsmaterial gebildet werden.

### 3.2.2 Probenherstellung

Die Herstellung der Proben erfolgt nach einem Probenplan. Die fertigen Proben stellen die Fassadenmodule dar, welche im letzten Schritt bewertet werden können. Der Probenplan ist in Tabelle 3 dargestellt. Bevor die finalen Proben gefertigt werden, werden "Vortests" angewendet. Diese Vorgehensweise reproduziert den Prozess in der Praxis. Die Vortest-Proben werden auf unvorhersehbare Produktionsfehler überprüft.

Tabelle 3: Probentabelle

Probennummer:	C1	C2	C3	C4	C5
Modulaufbau (Schichtnummer)	<b>1</b> Alu	Alu	Alu	Alu	Alu
	<b>2</b> POE	POE	EVA	POE	POE
	<b>3</b> MPE	MPE	MPE	Glasfaser	MPE
	<b>4</b> POE	POE	EVA	POE	POE
	<b>5</b> 10HZM3	10HZM6	10HZM6	10HZM6	10HZM6
	<b>6</b> POE	POE	EVA	POE	POE
	<b>7</b> Glas	Glas	Glas	Glas	Glas
Verbindungsart	LOT	ECA1	ECA1	ECA1	ECA2
Stückzahl	8	8	4	4	4

Die Proben werden in Laminations-Chargen (CX) unterteilt. Die fortlaufende Nummerierung identifiziert die Proben. Das hauptsächliche Unterscheidungsmerkmal stellt die Verbindungsart dar. Es werden zwei Proben mit unterschiedlichem Klebstoff geklebt sowie eine gelötete Probenart hergestellt. Gemäß dem Schichtaufbau in Abbildung 21 unterscheiden sich die Proben C1 bis C5 voneinander in mindestens einem Schicht-Material. Die Materialien sind in der Verkapselungsschicht unterschiedlich gewählt, um in der Charakterisierung verschiedene Effekte beobachten zu können. Das grundlegende Material ist das Polyolefin Elastomer. Erwartungsgemäß ist dieses Material für eine fehlerfreie Modulherstellung am geeignetsten. Mit dieser Verkapselungsschicht werden die verschiedenen Verbindungsarten von Löten und Kleben untersucht. Nur im ECA1 werden die Zwischenlagen und Verkapselungsschichten variiert. Für manche Proben werden größere Stückzahlen erforderlich. Das hängt mit der Modulcharakterisierung und der Anzahl der Sequenzen zusammen (Kapitel 3.4.2).

### 3.3 Prozesse

In diesem Abschnitt werden die zwei wichtigsten Herstellungsprozesse für die Fassadenmodule beschrieben. Der erste Prozess stellt das Stringen mit einem ECA Stringer dar. Im Folgenden wird zu den einzelnen Prozessen die Einstellungsmöglichkeiten und die Veränderung des Prozesses beschrieben. Der zweite Herstellungsprozess ist die Lamination der Fassadenmodule. Diese wird in einem industriellen Laminator durchgeführt. Der Prozess wird im zweiten Teil beschrieben.

#### 3.3.1 Stringen

Der Stringer (teamtechnik STRINGER TT Lab i8 ECA) wird in den einzelnen Prozessen in Prozessmodule (PM) eingeteilt. Diese sind nummeriert, um die entsprechenden Parameter für die Prozesse einzurichten.

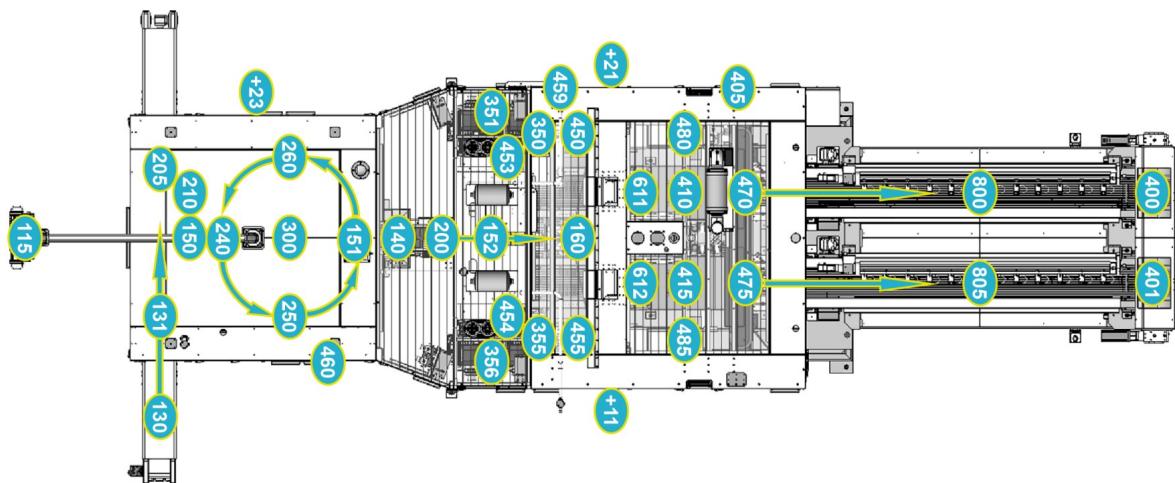


Abbildung 22: Prozessaufteilung und Anordnung der Prozessmodule  
[26]

Insgesamt gibt es 000-800 Prozessmodule. Der ersten Prozessmodule(PM000 bis PM300) sind die verantwortlichen Module für die Positionierung der Zellen und den Klebstoffauftrag. Der erste Kreislauf der Prozessmodule ist in Bezug auf die Steuerung vollständig unabhängig. Hingegen gibt es an einigen Stellen bestimmte Schnittstellen. Zwischen der Verbinderzuführung und dem Vernetzungsprozess existiert eine solche Schnittstelle. Verantwortlich dafür sind die Niederhalter. Sie werden zusammen mit den Verbindern zugeführt und bleiben während der gesamten Aushärtung auf der Zelle vorhanden. Am Ende der Aushärtung werden die Niederhalter zurückgeführt. Aufgrund der Nummerierung ist der Transport der Niederhalter eher dem Prozess der Aushärtung zuzuordnen. Somit sind PM350-356 für die Verbinderzuführung und PM400-612 für die Vernetzung zuständig. Nach dem ersten Kreislauf spalten sich die Transportbänder links und rechtsseitig auf. Die dazugehörigen Prozessmodule wären gespiegelt. Es könnten zwei parallele Verbinderzuführungen und Vernetzungen von Strings stattfinden. Damit würde die Produktivität verdoppelt werden. In dem Fall wird nur die linksseitige Produktionsstrecke (z.B. PM350,PM410) betrachtet.[26]

Der Produktionsprozess wird allgemein durch die Anzahl der Zellen pro Strings, dem Zellabstand, der Zelllänge, der Verbinder-Recklänge, der Länge von Anfangs- und Endverbinder, der Geschwindigkeit [%] und der minimalen Taktzeit beschrieben. Es gibt für diese und die untergeordneten Prozessmodule verschiedene Parameterlisten. Diese werden auch als Rezepte

bezeichnet. Das Anlegen einer solchen Parameterliste zählt zu der Vorbereitung eines Produktionsprozesses. Nach dem Hochfahren der Maschine folgt das Einrichten der Parameter. Danach kann die Steuerung eingeschaltet und in Grundstellung verfahren werden. Nach dem ersten Start der Maschine kann die Referenzierung in Grundstellung etwas länger dauern. Die Prozessmodule referenzieren sich einzeln. Wenn überall die Grundstellung erreicht ist, kann der Aufwärmprozess gestartet werden. Währenddessen läuft die Maschine im leeren Zustand (ohne Strings zu produzieren) an. Dadurch werden die Heizmodule aufgewärmt (Kapitel 3.3.1 Klebstoffaufschärtung). Ist der Aufwärmprozess abgeschlossen kann die Produktion von Strings beginnen. Am Ende jeder Produktion, muss die Maschine gereinigt werden.



Abbildung 23: Teamtechnik STRINGER TT Lab i8 ECA  
[27]

### Klebstoffauftrag

In dieser Phase sind die Zellen auf den Rundtisch beladen. Der Rundtisch hat vier Oberflächenbereiche. Entsprechend sind die Tischflächen senkrecht zueinander orientiert (Abbildung 24 links). Jede Fläche befindet sich zu einem Zeitpunkt (je nach Prozessschritt) in einer anderen Funktion für den Klebstoffauftrag. Nach entsprechend vier Takten hat jede Fläche jede Position einmal durchlaufen. Die Zellen sind zweifach auf den Flächen vorhanden, sodass erst nach acht Takten eine Solarzelle durch den Klebstoffprozess überführt ist. Der Grund dafür ist das beidseitige Bedrucken der Solarzellen. Für den Positionswechsel ist die Rotation der Tischflächen durch die Tischrunde im Zentrum zuständig. In der ersten Position werden die Zellen beladen. In der zweiten Position erfolgt der Siebdruck bzw. das Aufbringen von Leitklebstoff. Zunächst wird ein Sieb mit aufgetragenem ECA in den Rahmen eingeführt. In Abbildung 24 rechts ist der Rahmen und die Druckeinheit (Druck- und Flutrakel) mit eingelegtes Sieb dargestellt. In dem Druckvorgang wird mit einem Rakel eine Klebstoffschicht durch ein gespanntes Sieb gepresst. Entsprechend wird durch das Sieb die Anzahl und die Geometrie der aufgetragenen Menge des Klebstoffs vorherbestimmt. Dies sollte mit der gewünschten Fertigung der Solarzelle übereinstimmen. In diesem Fall wird ECA für neun Verbinder mit einer Breite von 400µm oder 500µm aufgetragen (je nachdem welches Sieb eingelegt wurde). Das Rakel bedruckt gleichzeitig die Vorderseite und die Rückseite der Zelle. An der dritten Position wird mit einer Kamera optisch auf Fehler geprüft. An der vierten Position erfolgt dann am Wendehandling die Wendung der Solarzelle auf die andere Tischhälfte. Für das Wenden sind Hohlräume in Form einer Nut an dem Wendehandling und auf der rechten Seite der Tischoberfläche vorgesehen. An der fünften wird auf der freien Seite eine weitere Zelle

aufgeladen. Daraufhin werden beide Zellen zu der sechsten bzw. wiederholt zweiten Position rotiert. Die neu beladene Zelle erfährt hier den ersten Druck, während die Zelle auf der rechten Seite fertig bedruckt wird. Auf der nächsten Station wird die fertig bedruckte Zelle von einem Greifer aufgenommen. Im achten Schritt wird die fertige Zelle abgelegt. Durch den durchgängig laufenden Prozess werden immer pro Takt die acht beschriebenen Teilfunktionen ausgeführt. Letztendlich wird in jedem Takt durch Siebdruck eine fertige mit Klebstoff versehene Solarzelle hergestellt.



Abbildung 24: Seitenansicht des Rundschalttischs (links) und Druckeinheit mit Sieb und aufgetragenen ECA in geflutetem Zustand (rechts)

### Klebstoffaushärtung

Der Prozess während der Klebstoffaushärtung wird auch als Stringerzeugung bezeichnet, da hier die Kontaktierung zwischen Verbinder, Klebstoff und Zelle abgeschlossen wird. Mit der Übergabe der Solarzelle auf das Stringertransportband beginnt der Prozess. Die Klebstoffaushärtung wird erst nach dem vierten Takt und auf einer bestimmten Position der Transportstrecke eingeleitet. Die notwendige Temperatur für den Vernetzungsprozess des Klebstoffs wird über Heizmodule realisiert. Insgesamt gibt es sieben Heizmodule auf der Unterseite der Transportstrecke. Die Heizmodule sind unterteilt in Vorheizzone, Heizzone und Abkühlungszone. [26] Die ersten vier Module weisen eine kleinere Grundfläche auf. Entsprechend verteilen sich die Anzahlen der Takte für den Durchlauf der Zellen unterschiedlich. Die Aufteilung ist in Abbildung 25 dargestellt. Die ersten vier Module weisen pro Modul zwei Taktzeiten auf. Insgesamt durchlaufen die Solarzellen auf den Heizmodulen eine Anzahl von 18 Takten. Für die Oberseite kann eine Infrarotlampe eingesetzt werden.

Diese wird für die Aushärtung von Klebstoff nur teilweise benötigt. Die Position der Infrarotlampe befindet sich über dem dritten Heizmodul (Abbildung 26). Während der gesamten 18 Takte laufen die Niederhalter auf den Solarzellen mit. Zum letzten Takt werden drei Niederhalter gleichzeitig entnommen und auf die separate Rücktransportstrecke abgesetzt.

Die Temperaturen der Heizmodule werden über die HMI (Human Machine Interface) Bedienoberfläche in die Maschine übermittelt. Die Parameter werden in einer Liste abgespeichert. Die erforderlichen Parameter werden als Rezept an die Maschine übermittelt. [26] Je nachdem, welche Parameter abgeändert werden, ist eine Anpassungsphase (z.B. der Temperatur eines Heizmoduls) notwendig. Der Stringer ändert im sogenannten Aufwärmmodus

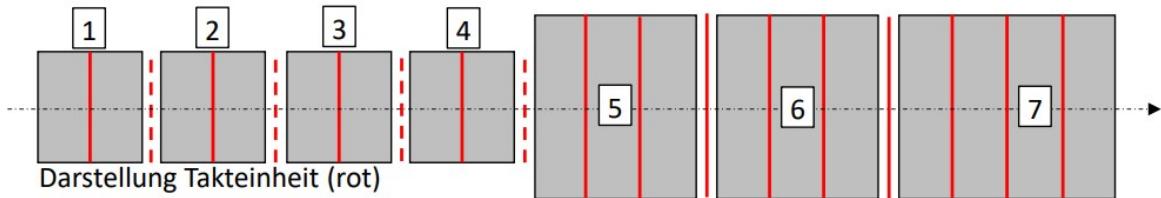


Abbildung 25: Schematische Darstellung der Taktanzahl pro Heizmodul



Abbildung 26: Seitenansicht der Heizmodule (2-5) ohne Niederhalter (links) und Seitenansicht der Heizmodule (6-7) mit der Niederhalterentnahme (rechts); mit der Orientierung von rechts nach links

die Maschinenparameter auf die eingestellten Sollwerte ab. Dabei wird kein Material verbraucht. Die Temperatureinstellung der Unterheizung befindet sich in der HMI unter dem Prozessmodul PM410 und die der Infrarotlampe unter PM611. Für jedes Modul sind die Temperatur-Sollwerte in °C einzugeben. Die Temperaturen werden mit Temperatursensoren geprüft. Die gemessenen Werte werden als Ist-Werte in der Bedienoberfläche angezeigt. Die Differenz zwischen den gemessenen Ist-Wert und dem eingestellten Soll-Wert wird durch Toleranzen begrenzt. Der Stringer würde bei einer Abweichung (größer der Toleranz) eines einzelnen Heizmoduls den Start des Produktionsprozesses unterbinden. Aus den Parametern der Heizmodule lässt sich über die Prozesszeit eine Temperatur-Zeit-Kurve abbilden. Eine theoretische Soll-Temperaturkurve für ECA1 und ECA2 ist in Abbildung 27 dargestellt. Die Kurven charakterisieren die Grundlage für die weitere Durchführung. An diesen Werten wurde sich im weiteren Verlauf orientiert und optimiert. Die Werte basieren auf Startdaten in der Maschineneinstellung sowie auf Herstellerangaben. Die Ausführung dieser ist nicht möglich, aufgrund der Unterschreitung der minimalen Taktzeit. Der schnellstmögliche Takt der Maschine entspricht 1,68s. Dadurch ist die Realisierung einer Taktzeit von 1s nicht möglich. Die Hinführung zu den finalen Prozessparametern ist in Kapitel 4.1 zusammengefasst.

Am Ende der Stringerzeugung werden die Strings manuell entnommen. Die Strings laufen auf dem Stringtransportband, je nach Größe des Strings, bis zur Abnahmestelle. Dort befindet sich in Transportrichtung ein Stringwender (Abbildung 28 links). An dem Stringwender befinden sich einzelne Sauggreifer (Abbildung 28 rechts). Insgesamt sind 12 dieser Greifer verbaut. Damit kann ein String aus bis zu 12 Solarzellen entnommen werden. In einem Fertigungsprotokoll werden alle Daten zu den gefertigten Strings gesammelt. Darunter zählen vor allem die Informationen zu dem gefertigten Auftrag, Anzahl der Strings, Anzahl der Zellen, Art der Verbinder, Klebstoff, Sieb und Rakel.

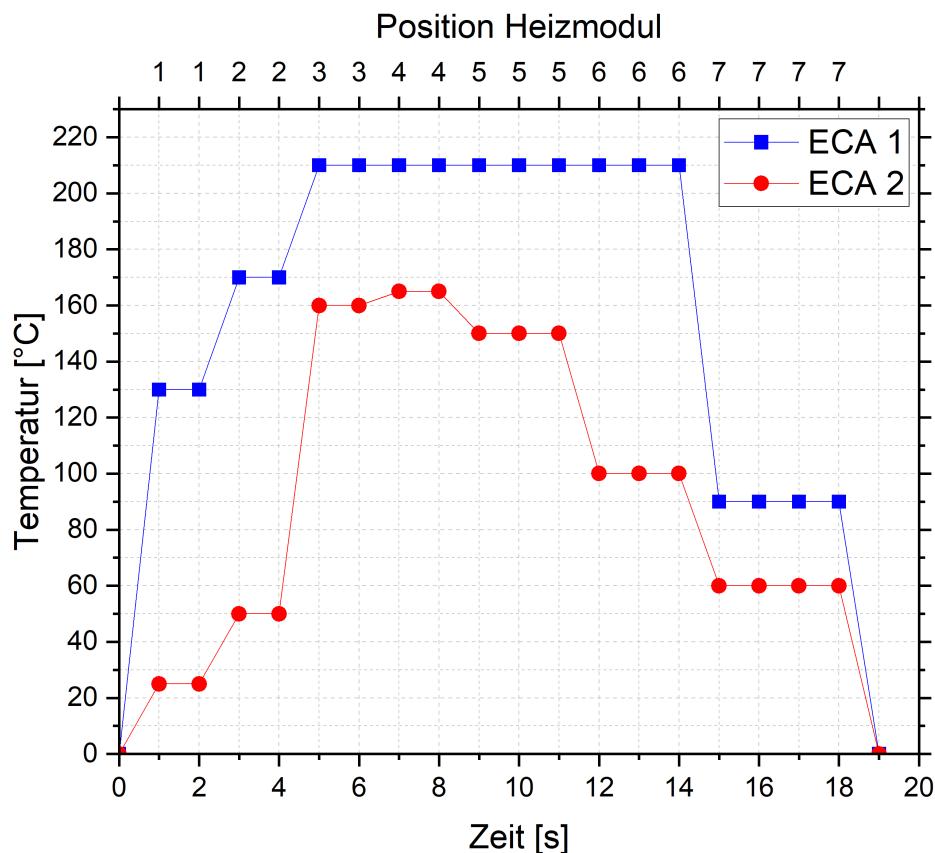


Abbildung 27: Temperatur-Zeit-Diagramm der theoretischen Solltemperatur für die Heizmodule bezogen auf ECA1 und ECA2

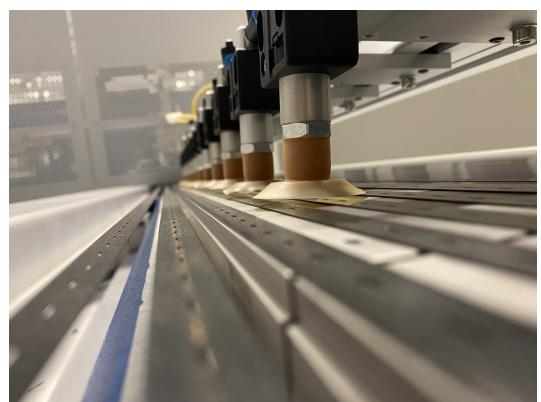
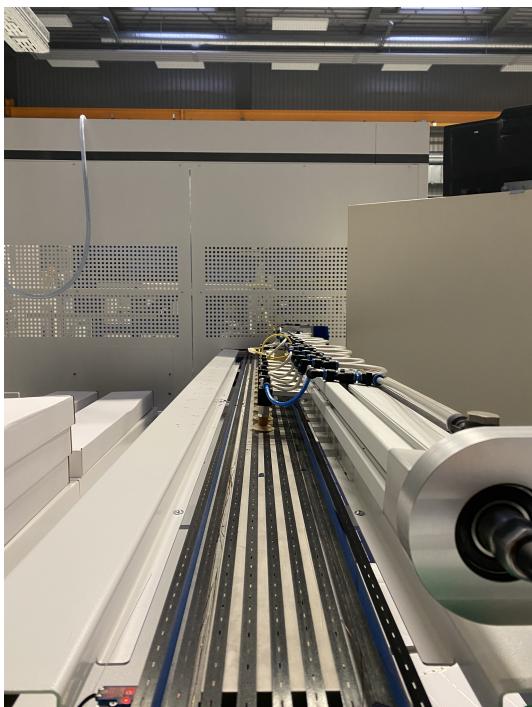


Abbildung 28: Ende des Stringtransportbandes bzw. Stringentnahme mit Stringwender (links), Detailansicht der Sauggreifer (rechts)

### 3.3.2 Lamination

Die Module werden nach der vorgesehenen Materialstruktur (Kapitel 3.2.1 und 3.2.2) vorbereitet. Dafür werden die entsprechenden Mengen an Folien geschnitten, Gläser gewaschen, Strings quer verlötet und Aluminiumfassaden vorgebohrt. In der Abbildung 29 ist die Bearbeitung der Module dargestellt. Während der Anordnung der Schichten sind einige Zwischenstufen erforderlich. Zunächst werden die Aluminiumbleche von den Schutzfolien befreit und auf den Laminationstisch platziert (1). Daraufhin werden die vorgesehenen Verkapselungsschichten aufgebracht und mittig ausgerichtet (2). Im nächsten Schritt wird die Zwischenlage und die darüber liegende Verkapselungsschicht aufgelegt (3). Bevor nun der verlötzte String aufgebracht werden kann, müssen kleine Einschnitte in die Folien vorbereitet werden (4). Dafür wird mit einem Cutter ein präziser Schnitt in die Position der vorgebohrten Löcher eingebracht. Hierbei sollte eine Unterlage verwendet werden, damit die Laminationsunterlage nicht zerkratzt. In diesem Fall wurde eine Metallplatte verwendet (Abbildung 29 4). Auf den Querverbindern der Strings werden Schrumpfschläuche aufgefädelt und mit Einbringen von Hitze fixiert (5). Die Querverbindner werden anschließend durch die geschnittenen Öffnungen gesteckt und auf der Rückseite gebogen (6). Um ein Herausquellen des geschmolzenen Verkapselungsmaterials zu verhindern, wird die Öffnung auf der Rückseite mit hitzebeständigem Klebeband verschlossen. Wenn die Querverbindner oben und unten fixiert sind und der String parallel und mittig ausgerichtet wurde, können die letzten zwei Schichten Verkapselungsmaterial aufgelegt werden (7). Als letzte Schicht wird das Glas aufgebracht (8). Bei all diesen Vorgängen ist besonders auf Sauberkeit zu achten, um das Einbringen von Schmutz zu verhindern. Danach kann mit der Lamination begonnen werden. Es werden pro Lamination zwei Module angefertigt und daraufhin laminiert. Die Module werden mit Schutzmembranen und Teflonfolie abgedeckt (Abbildung 30 rechts).

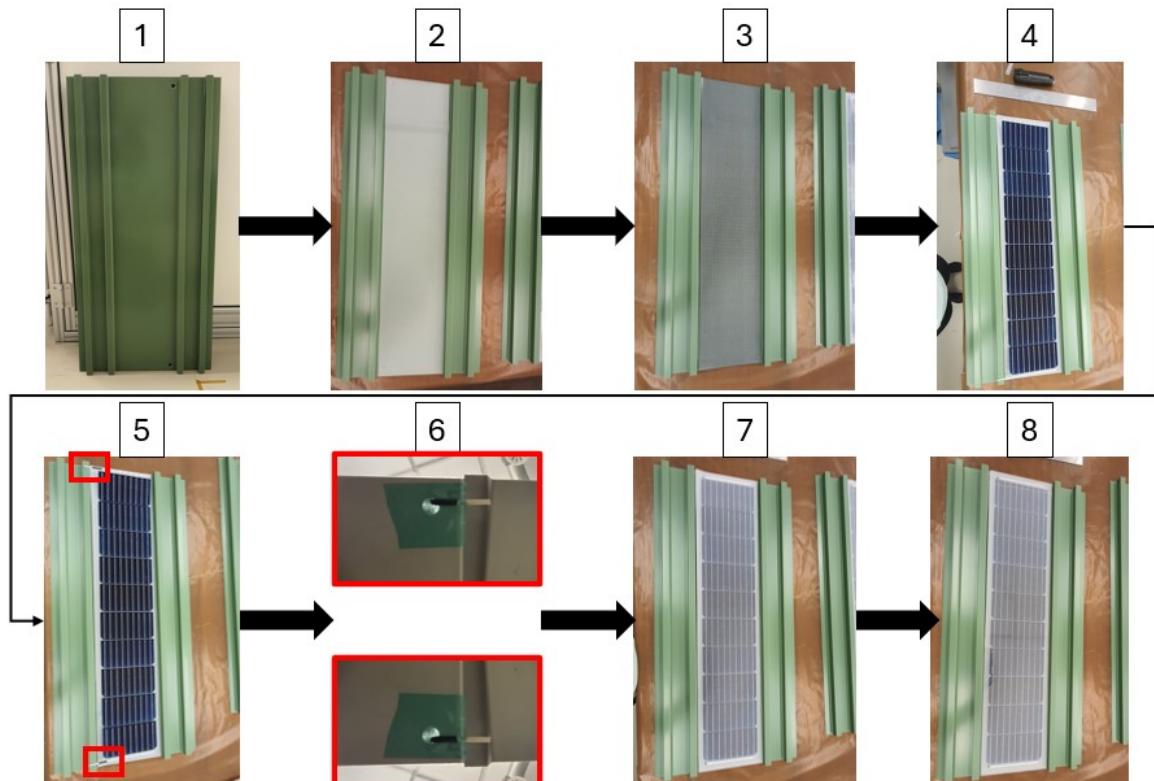


Abbildung 29: Arbeitsschritte für die Vorbereitung der Lamination



Abbildung 30: Meier Solutions GmbH - Vakuum-Laminator Icolam 28/26 mit Fassadenmodulen (links) und vorbereitete Fassadenmodule für die Lamination (rechts)

Die Lamination der Module erfolgt mit einem Vakuum-Laminator vom Typ Icolam 28/18 der Firma Meier Solutions GmbH. Der Laminationsprozess wird nach dem Rezept des Programms in die Phasen Evakuieren, Pressen, Vernetzen, Belüften und Deckel öffnen unterteilt. Das Modul wird zum Start in den Laminator befördert. Von Beginn an bis zu der Ausgabe der laminierten Module stellt sich eine konstante Temperatur von 155°C im Laminator ein. Dann beginnt der Evakuierungsprozess. Während des Evakuierens wird die Luft aus dem System entfernt und der Druck in der Kammer auf null abgesenkt (Abbildung 31). Das Modul muss nach der Lamination noch eine bestimmte Zeit an der Umgebungstemperatur auskühlen. Im Anschluss daran, können die Nacharbeiten beginnen. Die überstehenden Ränder werden an der Modulkante abgeschnitten. Hier quillt das im Laminationsprozess verflüssigte Verklebungsmaterial heraus. Das Abschneiden erfolgt mit einem Cuttermesser. Die Module benötigen keine Modulrahmen. Dieser Schritt der Modulfertigung kann vernachlässigt werden. Zum Schluss werden die Anschlussdosen mit Silikon montiert (Abbildung 32).

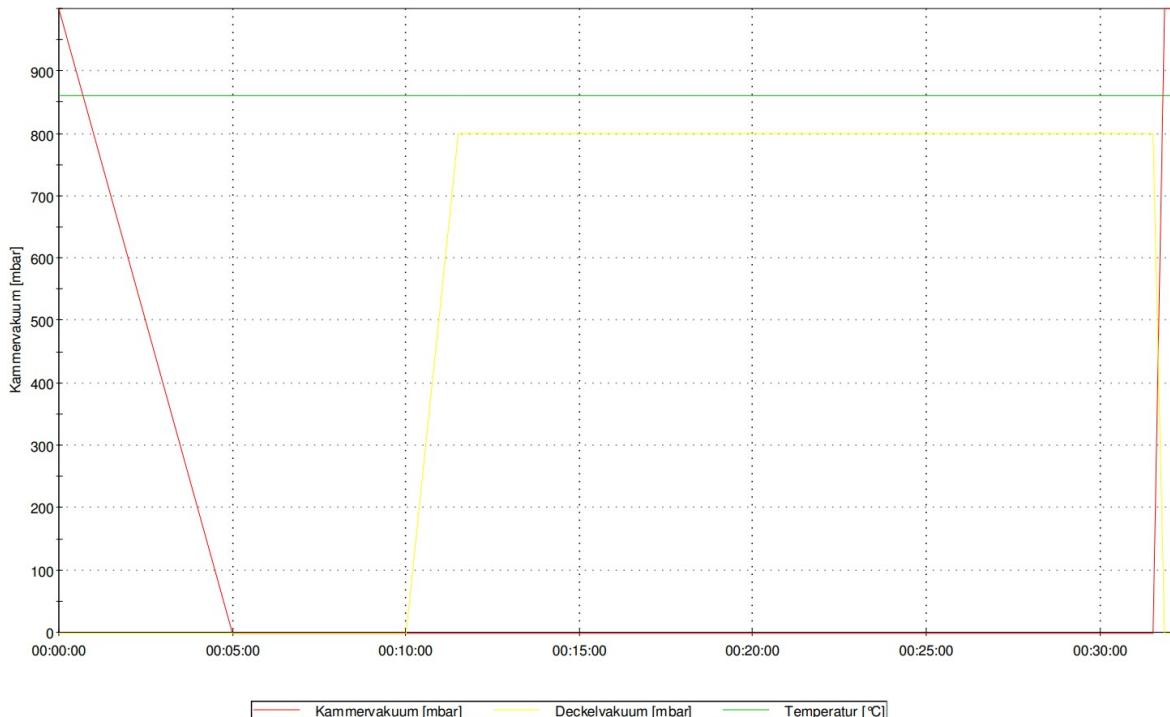


Abbildung 31: Laminationsprozess Vakuumdruck-Zeit-Diagramm



Abbildung 32: Innenansicht der Anschlussdose und Montage mit Silikon

## 3.4 Charakterisierung

Die Charakterisierung wird nach dem Prozess in Klebstoffcharakterisierung und Modulcharakterisierung unterschieden. Zu der Klebstoffcharakterisierung zählt die DSC-Messung und die Schältests. Im folgenden werden die Durchführungen dieser Verfahren erläutert. Daraufhin werden die Modulcharakterisierungen beschrieben. Darunter zählen die in den Normen DIN EN 61730 und IEC 61215 standardisierten Verfahren.

### 3.4.1 Klebstoffcharakterisierung

#### Dynamische Differenz Kalorimetrie (DSC)

Unterschieden wird die Durchführung in Standard DSC- und isotherme DSC-Messung. Das Ziel für die Standard DSC-Messung ist die verschiedenen Reaktionsbereiche der Klebstoffe zu analysieren. Der interessante Bereich stellt die Vernetzung und die zugehörige Temperatur dar. In der isothermen Messung soll anhand von ECA2 untersucht werden, ob ein zeitlicher Rückschluss über die Vernetzung zu gewinnen ist. Je nach Messmethode wird das Messprogramm variiert. Das Messprogramm muss entsprechend der Anwendung und Probe in Start-, Endtemperatur und Heizrate angepasst werden. Für die Einstellung der Starttemperatur sind 50K unterhalb des zu erwartenden Effekts empfehlenswert. Die Starttemperatur sollte gleichzeitig solange andauern, bis sich eine Temperaturangleichung der Probe einstellt. Die Heizrate wird für Schmelz- oder Kristallisationsprozesse auf etwa  $10 \frac{K}{min}$  eingestellt. Für die Bestimmung von Glasübergängen verwendet man  $20 \frac{K}{min}$ . Die Endtemperatur sollte über die geschätzte Temperatur des zu erwartenden Effekts hinaus erwärmt werden. Hierbei ist wie bei der Starttemperatur von etwa  $\pm 50K$  auszugehen. Dabei sollte beachtet werden, dass bei Schmelzvorgängen die Schmelztemperatur maximal 30K überschritten werden sollten. Im Normalfall wird die Abkühlrate genauso eingestellt wie die Aufheizrate. [19] Bei einer isothermen DSC-Messung wird die Temperatur der Probe konstant gehalten, anstatt sie (bei dynamischen Messungen) kontinuierlich zu verändern. [20]

Zuerst wird die dynamische Messung durchgeführt. Darauffolgend wird die isotherme Messung für den ECA2 mit Orientierung an den Ergebnissen der dynamischen Messung durchgeführt. Als Messgerät wird das "DSC 204 F1 Phoenix, NETZSCH" verwendet (Abbildung 34 links). Das Messprogramm wird über einen PC eingegeben. Die Messungen des dynamischen

Standard DSC-Versuchs werden mit der Heizrate von  $10 \frac{\text{K}}{\text{min}}$  durchgeführt. Die aufgezeichneten Heizkurven der einzelnen Messungen sind in Abbildung 33 abgebildet. Die Y-Achse stellt den Verlauf der Temperatur über die Zeit dar. Die Zeit ist auf der X-Achse in Minuten abgebildet. Am Beginn der Messung sind zwischen 25°C und 40°C minimale Schwankungen zu sehen.

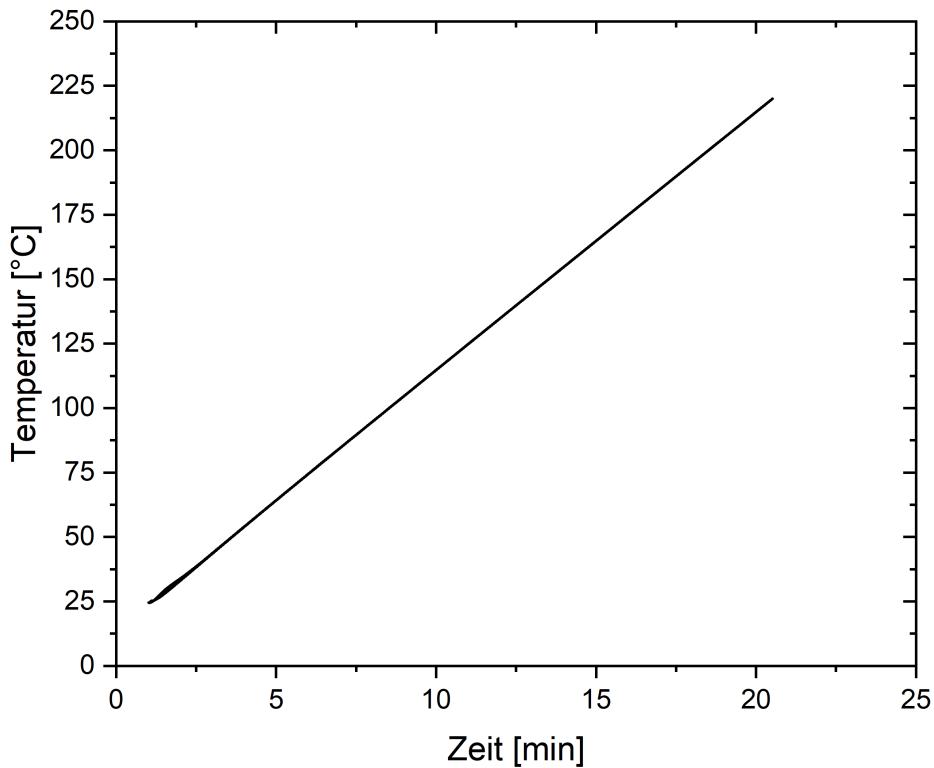


Abbildung 33: Aufgezeichneter Temperatur-Zeitverlauf des Aufheizvorgangs in der Ofenkammer während der DSC-Messung

Dies könnte durch den Einfluss der Umgebungstemperatur oder dem Anlaufen des Heizprozesses durch "Einpendeln" der Messung verursacht sein. Zu Beginn wird dabei ein Verzögern bis zum Start des Aufheizens verursacht. Es dauert etwa 2,5 min bis die Messung bei dem Startwert von 25°C beginnt. Den restlichen Verlauf der Messung bleiben alle Heizraten konstant und der Zielwert von 220°C wird nach etwa 21 min erreicht. Bei der isothermen Messung wird eine Heizrate von  $40 \frac{\text{K}}{\text{min}}$  verwendet, um schnellstmöglich den konstanten Temperaturbereich zu erreichen. Nach dem Programmstart wird die Probennahme und die Temperaturkurve automatisch vom DSC Gerät gesteuert. Die Proben werden vorab vorbereitet. Diese werden in einem Aluminiumtiegel mit Löchern (wie in den Grundlagen 2.2.2 beschrieben) eingeschlossen. Die Aufteilung der Proben ist in Tabelle 4 dargestellt.

Bei der Probennahme werden Spatel bzw. kleine Holzspieße als Hilfswerkzeug verwendet. Die verschiedenen Klebstoffe werden in den Verpackungen aufgetaut. Daraufhin kann mit der Entnahme begonnen werden. Mit dem Spatel wird an einer geeigneten Stelle ein Abstrich der Probe genommen und auf dem Aluminiumtiegel abgestrichen. Die Tiegel werden als Leergewicht und als Tiegel mit der enthaltenen Probe gewogen. Beide Massen werden im Messprogramm hinterlegt. Die Referenz der Massen ist in der Tabelle 4 dargestellt. Die Tiegel sind Einwegtiegel und können danach nicht mehr verwendet werden. Der Referenztiegel und die Probentiegel werden mittels einer Verschließpresse (NETZSCH) verschlossen.

Tabelle 4: DSC Standard-Messung Probentabelle

Proben Nummer	Proben Name	Probenart	Anmerkung	Datumsüber/unter -schreitung (=Datum Haltbarkeit – Datum Messung)	Masse [mg]
1	Referenz	Referenzprobe	(leerer Tiegel)	0	0
2	ECA2 alt	ECA2	Ablaufdatum: 23.05.2023	-280 d	8.08
3	ECA2 neu	ECA2	Ablaufdatum: 19.12.2023	-70 d	5.88
4	ECA2 Mix	ECA2	gemischte Chargen, mehrfach aufgetaut	Unbekannt (Erwartung: <Probe2)	14.22
5	ECA1 alt	ECA1	Ablaufdatum: 12.12.2023 gemischt am: 15.11.2023	-77 d	7.53
6	ECA1 neu	ECA1	Ablaufdatum: 18.09.2024 gemischt am: 27.02.2023	204 d	5.44

Tabelle 5: DSC isotherme Messung Probentabelle

Proben Nummer	Temperatur (Soll)	Probenart	Anmerkung	Datumsüber/unter -schreitung (=Datum Haltbarkeit – Datum Messung)	Masse [mg]
0	Siehe unten	Referenzprobe  ECA2	(leerer Tiegel)	0	0
1	73		Ablaufdatum: 19.12.2023		5,12
2	71				14,77
3	67				9,48
4	63			-150	6,36
5	59				3,56
6	77				6,53
7	150				9,85

Zunächst können die vorbereiteten Proben in der richtigen Reihenfolge auf das Probenmagazin (Abbildung 34 rechts) abgelegt werden. Danach wird nach dem Programmstart die Referenzprobe und die erste zu messende Probe mit einem Greifer in die Ofenkammer eingelegt. Die Grenztemperaturen für die dynamische Messung liegen unterhalb bei 25°C und oberhalb bei 220°C. Hingegen liegt die Starttemperatur der isothermen Messung jeweils bei 25°C und die Endtemperatur variiert gemäß der Probentabelle 5. Sobald die Messung für die erste Probe abgeschlossen wurde, wird der gemessene Tiegel entnommen und die nächste Probe zugeführt. Dieser Vorgang wird solange wiederholt, bis alle hinterlegten Proben abgeschlossen sind. Währenddessen zeichnet das Messprogramm die DSC-Kurve in Echtzeit auf. Die Messung kann währenddessen auf Fehler überprüft werden.



Abbildung 34: NETZSCH Messgerät DSC 204 F1 Phoenix (links) und Probenmagazin (rechts)

### Schältest

Für die Messung der Schälkraft wird ein Kraftsensor KD40s mit einem Messbereich von  $\pm 50\text{N}$  verwendet. Der Kraftsensor ist an ein DMS Messverstärker GSV-2 angeschlossen. Das Messsignal kann in einer Software aufgezeichnet (Abbildung 17) oder manuell als Kraft in einer digitalen Anzeige am Messverstärker abgelesen werden. Zuerst wird der Messverstärker eingeschaltet und eine zu prüfende Zelle auf die Prüfunterlage fixiert. Der überstehende Verbinder wird auf die  $180^\circ$  Neigung gebogen. Danach kann die Klemme mit dem Sensor (Abbildung 35) ausgerichtet und der Verbinder eingespannt werden. Kurz bevor die Zugkraft zwischen Verbinder und der Klemme entsteht, sollte am Messverstärker die Kraft auf null gesetzt werden. Außerdem sollte kein Verbinder bei dem Einspannvorgang verdrillt werden. Dann kann das Messprogramm bzw. die manuelle Kraftmessung gestartet werden. Bei der manuellen Kraftmessung ist die Kraft per Anzeige an vier vordefinierten Punkten auf der Zelle abzulesen und zu dokumentieren. Die Punkte befinden sich in 1; 3; 5; 7cm Abständen von der Zellkante. Der Verbinder wird während des Abzugs parallel zur Oberfläche in einem konstanten  $180^\circ$  Winkel gehalten. Danach wird die Zelle gedreht und der Vorgang wiederholt sich. Die wichtigsten Informationen der Prüfung sind dabei die Schälkräfte, die Verbinderbreite, die Homogenität des ausgehärteten Klebstoffs, die Zellabstandsüberprüfung, die Messung der Verbinderüberstände und die Probenkennung bzw. String-ID. Die Schälfestigkeit wird nach Gleichung 2.2.2 ermittelt. Beträgt die Schälfestigkeit mehr als  $\sigma_{180^\circ} = 0,5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$  gilt die Schälprüfung als bestanden. Die Proben, welche mit ECA1 gefertigt wurden, erhalten die Bezeichnung ECA1-VX. Für das X wird eine fortlaufende Nummer gewählt. Dies wird genauso für ECA2 Proben mit ECA2-TX angewendet. Die gelöste Probe wird nur mit Lot bezeichnet. Eine Übersicht hierzu ist in Tabelle 6 dargestellt. Für die Proben ECA1-V5 und ECA2-T3/T5/T6/T7/T8 wurden keine Schältests durchgeführt. Diese Proben wurden für andere Anwendungen produziert.

Tabelle 6: Proben für die Schältestversuche

Probennr.	Probenbezeichnung	Fügeverbindung / Material	Herstellung
1	ECA1-V1...V6	ECA 1	Stringer (TTi8)
2	ECA2-T1...T9	ECA 2	Stringer (TTi8)
3	Lot	Lot	Stringer (Komax)

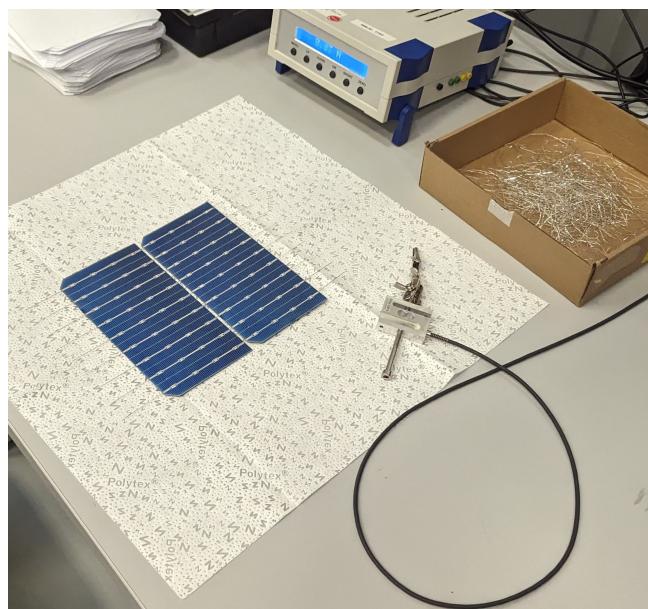


Abbildung 35: Versuchsaufbau eines Schältests

### 3.4.2 Modulcharakterisierung

In der Durchführung der Modulcharakterisierung werden die Planung und strukturierte Anwendung der verschiedenen Modultests erläutert. Die Vorgehensweise für die einzelnen Tests ist aus den Standards DIN EN 61730 und IEC 61215 zu übertragen (Kapitel 2.1.3).

Im Versuchsplan 18 ist die Wiederholbarkeit der Tests dargestellt. Zuerst werden die gefertigten Modulproben mit Sichtprüfung, EL und I-U-Kennlinien geprüft. Das bildet den Modulzustand zum Zeitpunkt nach der Fertigung ab. Normalerweise müsste hier auch die Durchführung des Nassen-Kriechstromtests erfolgen. Das wird in diesem Fall vernachlässigt. Dieser ist aufgrund der Bauweise der Module schwer durchführbar. Danach erfolgen die diversen Modulbeanspruchungen. Nach diesen wiederholen sich die Sichtprüfung, EL, und I-U-Kennlinien. Die Modulbeanspruchungen werden so lange wiederholt bis die gewünschte Sequenz abgeschlossen ist. Eine Sequenz beinhaltet die Abfolge von verschiedenen Modultests. Die Sequenzen sind wie die Tests nach den Normen DIN EN 61730 und IEC 61215 festgelegt. Eine Übersicht zu der Strukturierung der Sequenzen und welche Modultests diese beinhalten ist in Abbildung 37 dargestellt. Die für diese Arbeit relevanten Sequenzen sind Sequenz B, Sequenz D und Sequenz E. Darin sind DH-, UV-, HF-, ML- und TC-Prüfungen vorgesehen. Die Anwendung der unterschiedlichen Sequenzen mit den darin enthaltenen Modultests auf die Modulproben wird in der Tabelle 7 zugeordnet. Die Proben C1 und C2 durchlaufen alle geplanten Sequenzen (B, D, E). Die Proben von C3 bis C5 sind für Sequenz B und Sequenz D vorgesehen. Die Modultest sind notwendig, um Materialversagen zu bestimmen. Besonders liegen Materialausdehnungen (z.B. des Aluminiums oder der Verbinder) durch Temperatur- oder Feuchtigkeitseinflüsse unter dem Einsatz unterschiedlicher Modulmaterialien im Schwerpunkt der Betrachtung. Die Priorität liegt bei den Proben C1 und C2 aufgrund des direkten Vergleichs zwischen einem gelöteten Modul und einem geklebten Modul. Aufgrund der hohen Zyklenzahl und daraus entstehenden Durchführungsdauer wird nur bei diesen Proben der TC-Test (Sequenz E) durchgeführt. Zudem werden für C1 und C2 Rückstellproben verwendet. Die Rückstellproben sichern unerwartete Fehler oder unerwünschte Ergebnisse ab. Die verschiedenen Prüfungen werden üblicherweise an speziellen Versuchsständen durchgeführt. Für die Modultests kommen hauptsächlich Klimakammern zum Einsatz. In den Klimakammern sind spezielle Halterungen für Module und Sensoren vorzufinden (Abbildung 36). Für die Initialtests wie EL-Tests kommen die Module auf einen Prüfstand.

Tabelle 7: Aufteilung von Stückzahlen der Proben auf die Anwendung von Modultests

Probennummer	Modultests			
	Sequenz B	Sequenz D	Sequenz E	Rückstellproben
C1	2	2	2	2
C2	2	2	2	2
C3	2	2	0	0
C4	2	2	0	0
C5	2	2	0	0



Abbildung 36: Klimakammer mit Anordnung von PV-Modulen aus einem Versuchsbeispiel

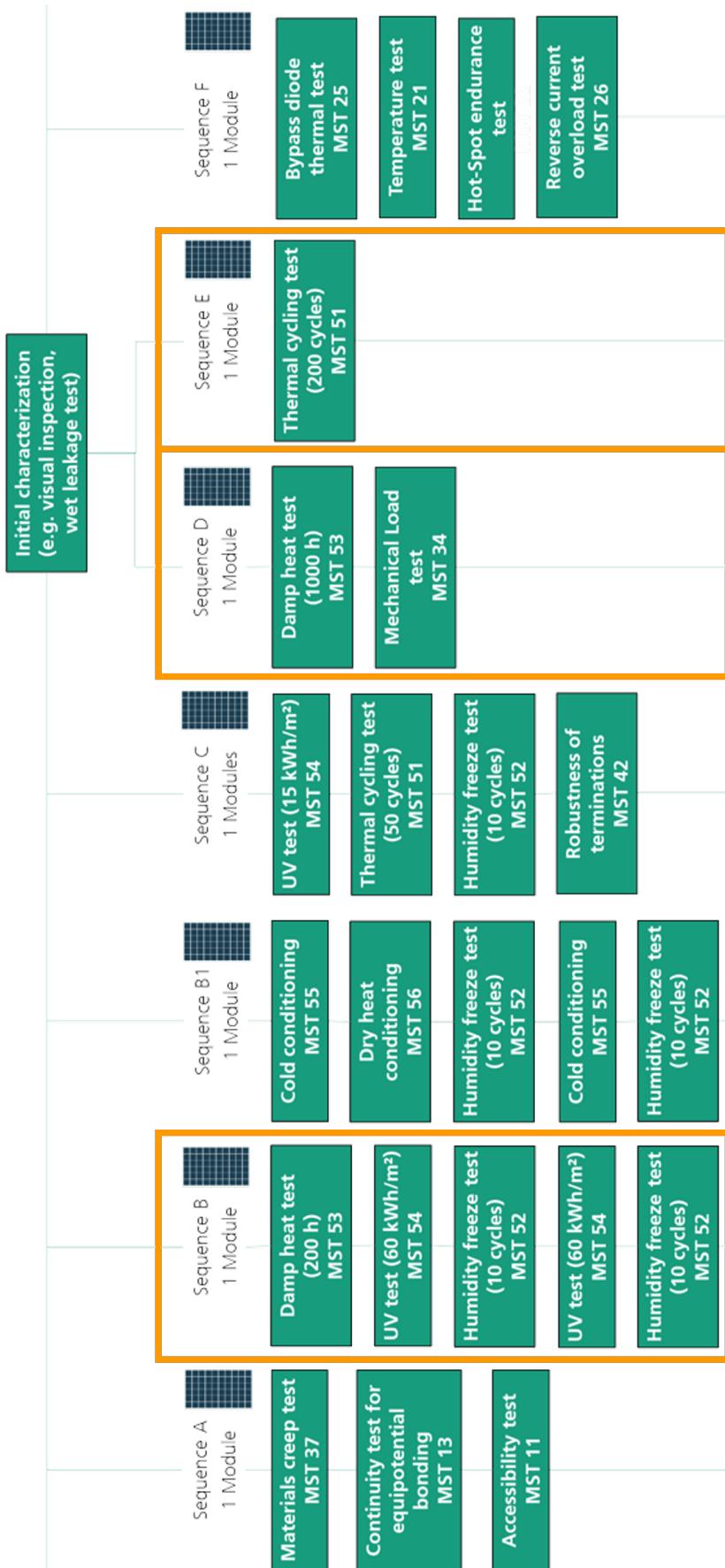


Abbildung 37: Übersicht zu den Prüfsequenzen, Auszug aus DIN EN 61730  
[16]

## 4 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die gesammelten Daten sowie Messergebnisse zusammengefasst und analysiert. Im ersten Kapitel wird auf die Produktionen im Bereich der Stringfertigung und der Modulherstellung mittels Lamination eingegangen. Daraufhin folgen die Erkenntnisse zu den Charakterisierungen.

### 4.1 Stringen

Die Proben der Stringfertigung werden in Lot, ECA1 und ECA2 unterteilt. Die Fertigung der gelöteten Proben soll nicht näher betrachtet werden und wird nach einem üblichen Verfahren gefertigt. Für die verschiedenen Klebstoffe wurden unterschiedliche Temperatur-Zeit-Verläufe ermittelt. Diese resultieren aus den DSC-Ergebnissen und aus der iterativen Ablauf der Schälprüfung nach dem bekannten Versuchsplan (Abbildung 18). In dem nachfolgenden Diagrammen ist die Einstellung der Temperatur der Klebstoffaushärtung im Stringer über die Zeit dargestellt. Die Zuordnung der Temperaturen zu den einzelnen Heizmodulen sind wie in der Durchführung beschrieben (Kapitel 3.3.1) nachzuvollziehen. Die Y-Achse stellt den Verlauf der Temperatur dar. Die X-Achse bildet den Verlauf der Zeit ab. Aufgrund der Taktzeit der Produktion, sind die Abstände der Datenpunkte immer konstant. Für die IR-Lampe sind die Temperaturen zwischen 150°C und 165°C eingestellt. Diese entfallen in den einzelnen Diagrammen und sind zum Zeitraum des Heizmodul vier einzuordnen. Im Folgenden sind die Fertigungsergebnisse der ECA1 Proben dargestellt (Abbildung 38).

Der ECA1 wurde über vier verschiedene Verläufe im Diagramm ausgehärtet. Die chronologische Abfolge der Proben entspricht der Reihenfolge der Nummerierung (V1,V2,...). Die unterschiedlichen Kurven weisen ähnliche Steigungen und Temperaturintervalle auf. Das Maximum der Temperatur beträgt bei V6\* 210°C. Dies ist zugleich die maximale Auslastung der Heizmodule. Eine stärkeres Aufheizen ist an dieser Stelle nicht mehr möglich. Jedes Temperaturprofil startet bei der ungefähren Raumtemperatur von 20°C. Für den ECA1 wird eine sehr rasante Aufheizphase eingestellt. Direkt im ersten Heizmodul sind in allen Rezepten 120°C als Referenz ausgewählt. Daraufhin werden verschiedene Heizvorgänge in den unterschiedlichen Maschinenparametern eingestellt. Der längste Vernetzungsvorgang ist der Verlauf V6 mit einer Prozesszeit von 76s. Die restlichen Kurvenverläufe dauern nur insgesamt 57s. Im Vergleich zu dem Soll-Temperatur-Zeitverlauf (Abbildung 27) sind die VX bzw. ECA1 Proben geringeren Temperaturspitzen und einer deutlich längeren Prozesszeit als dem geplanten Prozess von 19s ausgesetzt.

Anhand der voreingestellten Taktzeit von 3s wurde dieser Wert beibehalten. Eine Verkürzung der Taktzeit führte zu nicht ausgehärteten Klebstoff. Diese Ergebnisse sind für die weitere Betrachtung nicht von Bedeutung und wurden verworfen. Die erste Heizstufe wird etwas unterhalb der geplanten Solltemperatur gewählt. Anstatt den erforderlichen 130°C wird auf 120°C erwärmt. Besonders bei dem ersten Heizmodul ist darauf zu achten, dass Abwärme in das vordere System gelangen kann. Das bedeutet während der Verbinderzuführung kann ein bestimmter Teil an Wärme in den String eingebracht werden. Deswegen wurde hier die Temperatur leicht herabgesetzt. Das hängt an dieser Stelle besonders mit den Onset und Peaktemperaturen aus den DSC-Ergebnissen zusammen (Kapitel 4.3.1). Ab dem fünften oder sechsten Heizmodul wird eine Abkühlung auf 160°C bzw. 80 – 90°C eingestellt. Der Hintergrund für eine langsame Abkühlung ist der in den Grundlagen genannte Abbau thermomechanischer Spannungen. Die Verbinder erfahren mit der Veränderung der Wärme eine Ausdehnung. Sollte der Klebstoff bereits vollständig ausgehärtet sein bringt die Bewegung der Verbinder eine Beanspruchung auf die Klebestelle. Dies könnte zu Problemen der Adhäsions- und Kohäsionskraft führen.

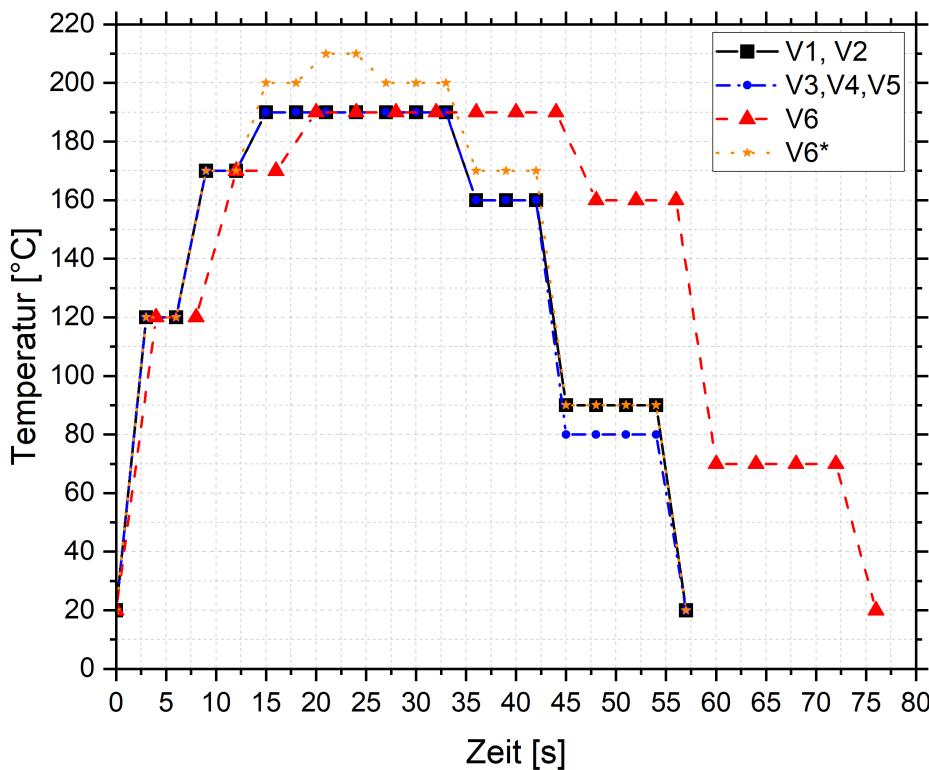


Abbildung 38: Temperatur-Zeitverlauf der ECA1/ VX-Proben

Die Temperaturprofile wurden wiederholt durchgeführt, um ein aussagekräftiges Ergebnis zu erhalten. In diesem Fall ist eine Abweichung der Heizmodule selten bis gar nicht vorgekommen. Besonders ist aufgefallen, dass Heizmodul 7 häufig von der Solltemperatur abweicht. Die ersten zwei Temperaturverläufe (V1,V2 und V3,V4,V5) unterscheiden sich nur in diesem Heizmodul 7. Hier wurde die Temperatur aufgrund dieser Schwankungen der Ist-Temperatur variiert. Aus den Erkenntnissen der Schälprüfungen wurde eindeutig, dass die Temperatur-Zeit-Verläufe bereits ausreichen, um die notwendige Festigkeit zu erzielen. Für die Fertigung ist das relevante Temperatur-Zeit-Profil V6 bzw. V6\* entstanden. Zunächst wurde die Prozesszeit von 3s auf 4s erhöht. Für die industrielle Anwendung würde dies wenig Sinn ergeben. Sodass der Temperaturverlauf V6\* entstand. Hier sind die Heizmodule 3 bis 6 um 10 – 20K erhöht. Mit diesen Temperatur-Zeit-Verläufen wurden die geforderten Ergebnisse der Schälprüfung erreicht. Dazu wird genauer im Abschnitt 4.3.1 eingegangen. Die Proben V6 und V6\* wurden für die Fertigung der Module verwendet. Die Anzahl der Strings wurde insgesamt auf 20 Stück ausgelegt. Später wurden aufgrund der Modulproduktion Module nachgebaut, so dass über dem Rezept von V6\* fünf Strings nachgefertigt wurden.

Zum direkten Vergleich werden die Temperatur-Zeitverläufe der Proben mit ECA2 in Abbildung 39 dargestellt. Für diesen Klebstoff wurden insgesamt fünf verschiedene Temperaturverläufe verwendet. Wie bereits zuvor entspricht die chronologische Abfolge der Proben der Reihenfolge der Nummerierung (T1,T2,...). Ähnlich wie bei den ECA1 Proben sind die ECA2 Temperaturverläufe mit ähnlichen Anstiegen und Temperaturintervallen gekennzeichnet. Hauptsächlich dehnen oder stauchen sich die verschiedenen Kurven aufgrund der Taktzeit in den verschiedenen Rezepten. Die Kurvenverläufe T1 und T3 sind mit einer gesamten Prozesszeit von etwa 32,3s die kürzesten Prozesszeiten. Mit diesen zwei Versuchen wurde die am kürzesten mögliche Taktzeit eingestellt. Die längste Zeit für die Klebstoffaushärtung beträgt

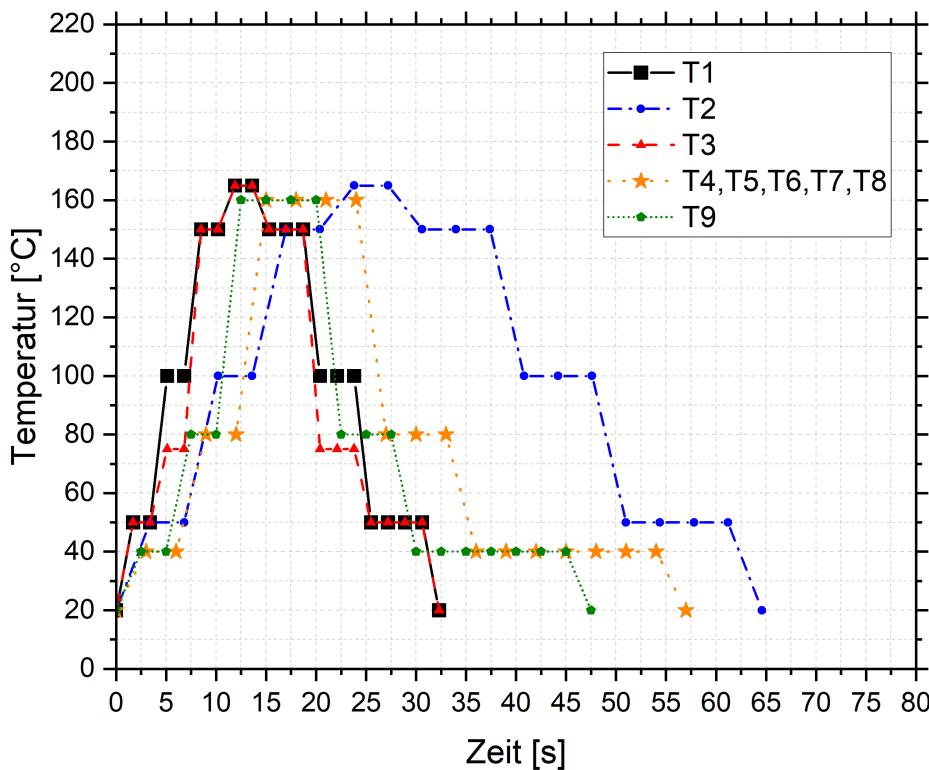


Abbildung 39: Temperatur-Zeitverlauf der ECA2/ TX-Proben

der Verlauf von T2. Die gesamte Zeitdauer sind hier 64,6s. Der Prozess beginnt bei ungefährer Raumtemperatur. Die Temperaturen sind für den Start aus den DSC-Ergebnissen und im niedrigeren Temperaturbereich zwischen 40°C und 60°C gewählt. Der Auslöser ist erneut wie bei den ECA1 Proben der frühzeitige ungewollte Beginn der Vernetzung des Klebstoffs. Die Abkühlphase ist in allen Kurven langsam gewählt. Hier wird erneut der Einfluss thermomechanischer Spannungen berücksichtigt.

Im Vergleich zu den Sollwerten aus dem geplanten Temperatur-Zeitverlauf (Abbildung 27) werden die ersten zwei Heizmodule rasanter angesteuert. Besonders das zweite Heizmodul konnte nicht auf 50°C eingestellt werden. Die Differenz der Heizmodule kann nicht zu hoch sein, ohne dass sich diese gegenseitig beeinflussen. Somit wurde bei dem Aufheizen nach den Sollwerten festgestellt, dass das dritte Modul mit der Solltemperatur von 150°C das zweite Modul maßgeblich beeinflusst. Dieses wurde nicht auf den geforderten 50°C gehalten, sondern es wurde deutlich darüber erwärmt. Das wurde über der Überwachung der Ist-Temperatur festgestellt. Dabei ist die Anpassung der Toleranzen bedeutend. Wird die Temperaturtoleranz über- oder unterschritten, wird die Produktion nicht gestartet bzw. eine Fehlermeldung der HMI angegeben. Die Lösung für die Steuerung der gewünschten Temperatur innerhalb dieser Toleranz ist die Anpassung der Temperatur der Heizmodule. Wird die Temperatur des zweiten Heizers erhöht, zieht das in dem Fall eine Erhöhung der Temperatur des ersten Heizers mit sich. Die Temperaturspitze ist mit 150°C bis 165°C ungefähr des geplanten Solltemperaturpeaks entsprechend. Die Abkühlung ist etwas geringer gewählt als angenommen wurde. Hauptsächlich werden die letzten zwei Heizmodule mit 20°C weniger als geplant eingestellt. Die Prozesszeiten überschreiten die geplante Prozessdauer von 19s. Dies hängt wie bei den ECA1 Rezepten mit der minimal einstellbaren Taktzeit des Stringers zusammen. Für den ECA2 ist aufgefallen, dass der Klebstoff unter schnellen Zeiten aushärtet kann, allerdings

die Festigkeiten nach längeren Zeiten höher sind (Kapitel 4.3.1).

Die ersten drei Temperaturkurven sind vor den DSC-Ergebnissen erstellt. Das vierte Profil basiert auf den Ergebnissen aus der DSC-Messung und das letzte Profil resultiert aus den Schältests. Der erste Verlauf (T1) entspricht dem Resultat aus den Vorgaben der Herstellerdaten und der Sollwerte (27). Der zweite Temperatur-Zeitverlauf (T2) ist über die Taktzeit deutlich verlängert. Hier wird der Einfluss der Zeit auf die Vernetzungsreaktionen des Klebstoffs beobachtet und das Ergebnis der Festigkeit in der Schälprüfung (Kapitel 4.3.1) aufgenommen. In der dritten Temperaturkurve (T3) ist die Temperatur im Vergleich zu T1 deutlich gesenkt. An der Stelle wird der Einfluss der Temperatur auf die Vernetzung überprüft. Das Ergebnis wurde in der Festigkeit mittels Schältest aufgenommen. Der vierte Verlauf wurde wiederholt verwendet. Hier wurden die Erkenntnisse aus DSC-Messung und Schälprüfung zusammengetragen und die Taktzeit für die Klebstoffaushärtung verlängert sowie die Temperatur einzelner Heizmodule optimiert. Damit die Produktion schneller abläuft wurde ein Mittelmaß der Taktzeit angepasst. Die Taktzeit wurde im Verlauf von 3s auf 2,5s verkürzt. Die Anzahl der produzierten Strings unter dem Verlauf von T9 beträgt 20 Stück. Eine Darstellung eines produzierten Strings ist in Abbildung 40 und Abbildung 41 aufgezeichnet.

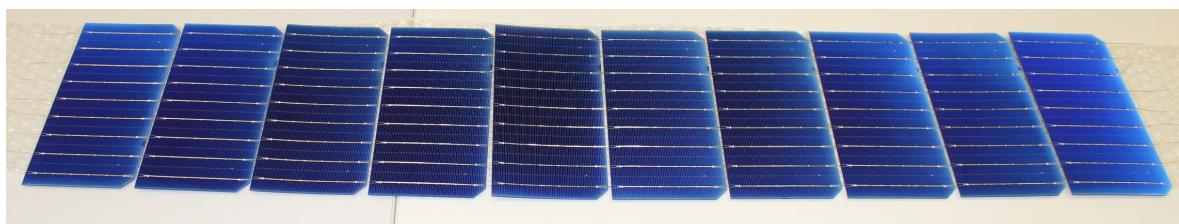


Abbildung 40: Vorderseite eines Strings mit 10 Halbzellen (Probe T5)



Abbildung 41: Rückseite eines Strings mit 10 Halbzellen (Probe T5)

Aus dem Vergleich beider Diagramme wird deutlich welche Vor- oder Nachteile die Klebstoffe untereinander aufzuweisen haben bezüglich der Aushärtung. Ein direkter Vergleich der finalen Temperaturkurven wird in der Abbildung 42 dargestellt. ECA1 benötigt deutlich höhere Spitzentemperaturen von bis zu 210°C. Für ECA2 werden die Heizmodule bis maximal 165°C aufgeheizt. Die Prozesszeit der Klebstoffaushärtung von ECA2 mit der Strings produziert wurden (T9) beträgt 47,5s. Dahingegen wird für den ECA1 (V6\*) insgesamt fast 10 Sekunden länger benötigt. Das bezieht sich allein auf die Phase der Klebstoffaushärtung. Der Prozess der Aushärtung würde die Taktzeit für die gesamte Stringherstellung vorgeben. Dadurch beläuft sich die Verlängerung des Prozesses von ECA1 gegenüber ECA2 über den gesamten Stringherstellungsprozess. Pro Taktzeit sind das 0,5s, die ECA1 länger beansprucht. Zusammenfassend scheint der ECA2 unter geringeren Energieaufwand für das Aufbringen von Wärme im Stringer und in kürzerer Zeit auszuhärten. Zusätzlich bietet das niedrigere Temperaturprofil Vorteile in Bezug auf Fertigung und Belastung der Solarzellen. In dieser Betrachtung fließen keine Aussagen über die Schälfestigkeit der Klebstoffverbindung ein. Diese wird dann im Kapitel 4.3.1 verglichen.

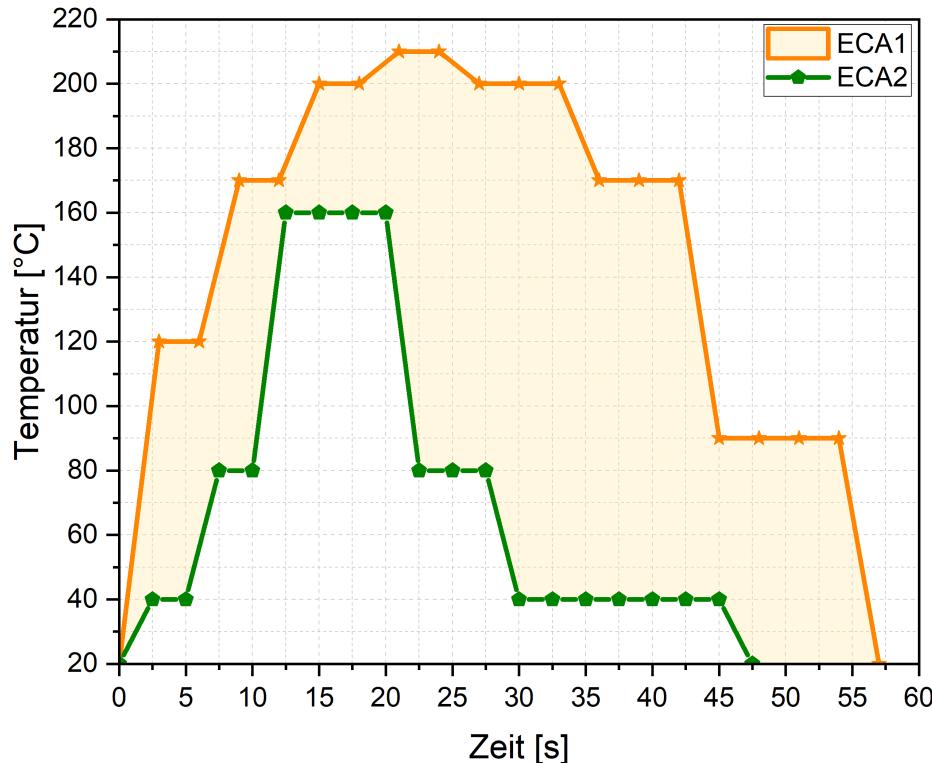


Abbildung 42: Vergleich der Temperatur-Zeitverläufe der Stringfertigung von ECA1 und ECA2 mit dargestellter Temperaturdifferenz

## 4.2 Lamination

Die Laminationsprozesse sind mit einer Reihe an Vortests gestartet. Diese sind dafür gedacht eine Prozessstabilität in Bezug auf die Materialien zu erhalten. Besonders das Verhalten zwischen der Aluminiumoberfläche und der Anbindung der Verkapselungsschichten spielt hierbei eine wichtige Rolle. Das Aluminiumblech besitzt eine spezielle Schutzschicht. Diese zusätzliche Schicht beeinflusst die Anbindung des geschmolzenen Verkapselungsmaterial. In der Lamination mit vier verschiedenen Vortests ist aufgefallen, dass zwei davon mit einer einfachen Deckschicht EVA oder POE nicht ohne Fehlerbilder produziert wurden. Besonders Blasen und ähnliche Lufteinschlüsse haben sich hier ergeben. Daher wird, wie in der Durchführung beschrieben, mit einer doppelten Deckschicht (Abbildung 21 Schicht 6 und 7) fortgefahrene. Die restlichen Materialien wiesen keine Fehler auf. Nur die Strings sind mit teilweise Zellbrüchen oder Rissen aufgefallen. Diese waren für die Vortests nicht bedeutend. Es wurde deutlich, dass bei der Montage und dem Transport von den Strings mit besonderer Vorsicht vorgegangen werden muss.

Nach Abschluss der Vortests konnten erfolgreich die geplanten 28 Fassadenmodule hergestellt werden (Abbildung 43). Von diesen 28 Modulproben mussten vier ersetzt werden. Die Module wiesen Beschädigungen in der EL-Messung auf (Kapitel 4.3.2). Die Fehler in den Strings würden den weiteren Verlauf aus den Versuchsplan maßgeblich beeinflussen. Deswegen wird hier die Maßnahme ergriffen verbesserte Module herzustellen. Ein solches Nachrüsten von Proben erfordert erheblichen Produktionsaufwand. Anhand der ID-Nummer wurden die fehlerhaften Module identifiziert und aussortiert. Nach dem gleichen Materialplan dieser aussortierten Proben, wurden die Ersatzmodule hergestellt. Die Rückverfolgung der eingesetzten Mate-

rialien wurde über die Fertigungsprotokolle sichergestellt. Über die Identifikationsnummer lässt sich die Probennummer (CX) bestimmen. Das ist in der Abbildung 8 zusammengefasst. Anhand der Probennummer lassen sich die Materialien über die Probentabelle 7 bestimmen. Allerdings ist nur für maximal vier Ersatzmodule genug Material vorhanden. Das begrenzt die Auswahl auf diese Anzahl. Die Fassadenmodule die ersetzt wurden, werden als Rückstellproben im Lager aufbewahrt. Es muss entschieden werden, ob diese für Messungen tauglich sind, für andere Zwecke gebraucht werden oder letztendlich sachgerecht entsorgt werden müssen. In jeder Lamination wurden zwei Fassadenmodule gefertigt. Somit waren für die 28 geplanten sowie die Vortests und Ersatzmodule 18 Laminationsprozesse notwendig. Dadurch ergibt sich eine Gesamtprozesszeit für die Lamination von rund 580min bzw. 34,8h.

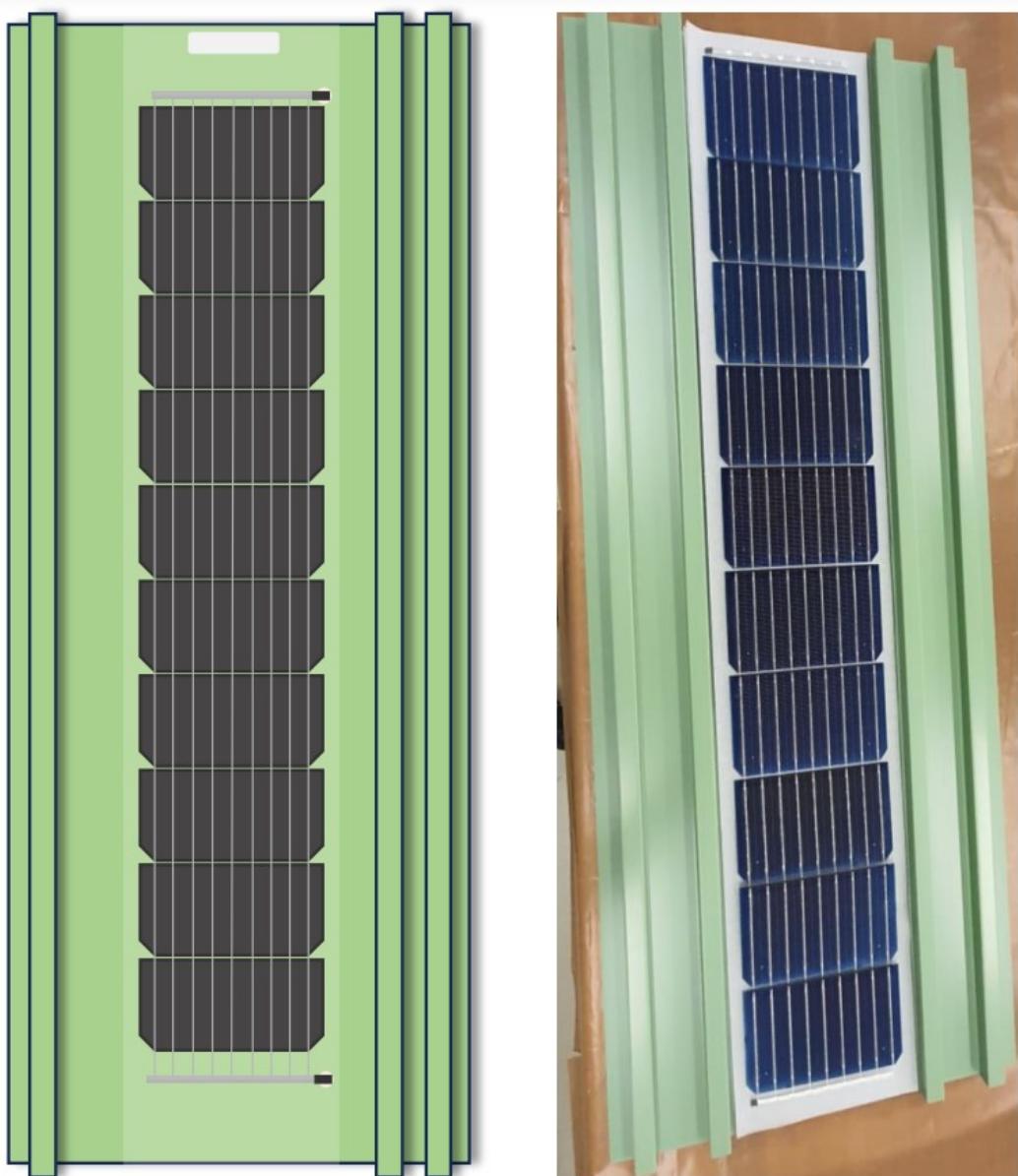


Abbildung 43: Vergleich zwischen schematischer (links) und realer (rechts) Darstellung der Fassadenmodule

Tabelle 8: Übersicht der Modulzuordnung nach der Fertigung

Gruppe	Aufbau	Modulnummern
C1	LOT-Ref	CSP_S-id20240149 - 0156
C2	ECA1-Ref	CSP_S-id20240157 - 0164
C3	ECA1-EVA	CSP_S-id20240169 - 0172
C4	ECA1-GF	CSP_S-id20240165 - 0168
C5	ECA2-Ref	CSP_S-id20240258 - 261

## 4.3 Charakterisierung

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse aus der Klebstoffcharakterisierung und der Modulcharakterisierung zusammengetragen und analysiert. Die Klebstoffcharakterisierung wird in DSC-Messung und Schälprüfung unterteilt. Die Charakterisierung der Fassadenmodule wird bis zu den aktuellen Ergebnisfortschritt dokumentiert. Dies beinhaltet die ersten EL-Messungen und die Aufnahme der I-U-Kennlinien.

### 4.3.1 Klebstoffcharakterisierung

#### DSC-Messung

Zunächst werden nur die Ergebnisse der dynamischen DSC-Messung betrachtet. Die Ergebnisse der Reaktionsverhalten der Proben sind in Abbildung 44 abgebildet. Die Y-Achse stellt den gemessenen Wärmestrom zwischen den Referenzen dar. Dieser Verläuft über der Zunahme der Temperatur. Die einzelnen Messungen sind mit verschiedenen Kurvenfarben dargestellt. Aufgrund, dass alle Proben Klebstoffe sind, ist ausschließlich eine Bewegung in negativer Y-Richtung zu beobachten. Während ein exothermer Verlauf vorliegt findet die Vernetzung des Klebstoffs statt. Es muss sichergestellt sein, dass die vollständige Vernetzung erreicht wird. Ist das nicht der Fall würde sich die negativ ausgeprägte Kurve nicht der Basislinie annähern und konstant verlaufen. Es fällt auf, dass die drei Verläufe im Bereich von etwa 60°C bis 100°C die Messungen zu den ECA2 Proben sind. Im Intervall von etwa 120°C bis 160°C folgen die Messungen der ECA1 Proben. Jede Kurve zeigt nach dem exothermen Verlauf einen konstanten Verlauf der vorher eingestellten Basislinie. Es kann schlussgefolgert werden, dass der ECA2 ein niedrigeren Temperaturbereich für die Vernetzung hat, als der ECA1. Dies würde sich mit den Datenblättern der Hersteller decken. Allerdings sind die Temperaturen für den Reaktionsbeginn beider Klebstoffe deutlich früher als die Temperaturen welche im Datenblatt (Tabelle 2) angegeben sind. Das begründet ein vorzeitiges Vernetzen des Klebstoffs durch frühzeitiges Aufheizen über Heizmodule im Stringer. Diese Temperaturen werden entsprechend der  $T_{Onset}$  Ergebnisse (Abbildung 45) berücksichtigt. Das Maximum des exothermen Prozesses ist bei den einzelnen Temperaturen  $T_{Peak}$  erreicht. Hier ist die Reaktionsgeschwindigkeit am größten[18]. Die unterschiedlichen Ergebnisse der Peaktemperaturen sind in Abbildung 45 zusammengefasst. Die Enthalpie der einzelnen Proben ergibt sich aus der Fläche der Reaktionskurve zur extrapolierten Basislinie[20]. Die Ermittlung der Fläche über die extrapolierten Temperaturpunkte ist im Anhang 5 dargestellt. Die Ergebnisse der Enthalpie sind der Abbildung 46 zu entnehmen. Hier wird erneut deutlich dass eine höhere innere Energie von dem ECA1 freigesetzt wird, um eine Vernetzungsreaktion abzuschließen zu können. Der ECA2 weist kleinere Enthalpieänderungen auf.

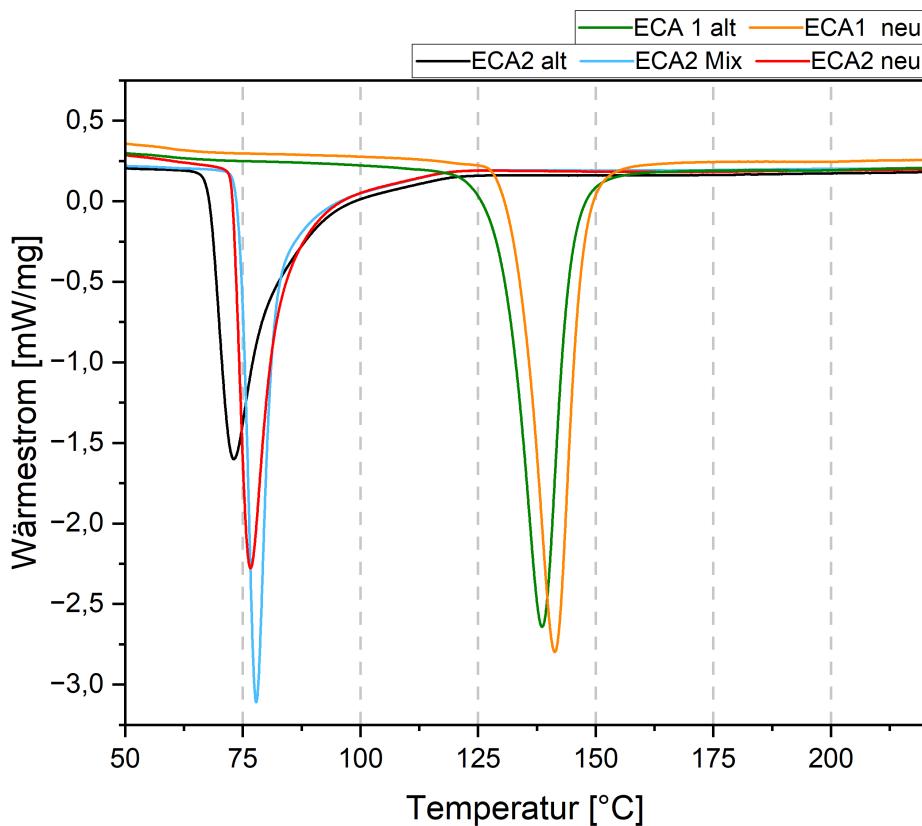


Abbildung 44: DSC-Kurven der verschiedenen Proben von ECA1 und ECA2

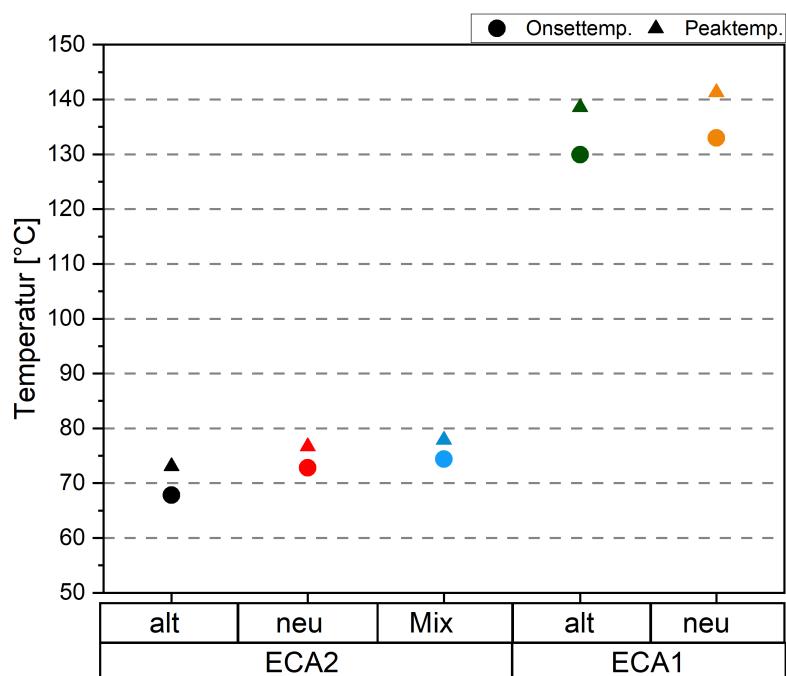


Abbildung 45: Vergleich der Peak- und Onsettemperaturen der unterschiedlichen Proben aus der DSC-Messung

Es lässt sich feststellen, dass eine geringe Abhängigkeit des Herstellungs- bzw. Lagerungszeit zwischen den unterschiedlichen Proben gleicher ECA-Typen besteht. Bezogen auf die  $T_{Onset}$  Werte, haben die älteren Klebstoffe kleinere Temperaturen als die neueren. Der ECA 2alt beginnt bei  $67,8^{\circ}\text{C}$  zu reagieren. Dahingegen reagieren ECA2 neu und ECA2 Mix erst bei  $73^{\circ}\text{C}$  bzw.  $74,4^{\circ}\text{C}$ . An dieser Stelle sollte berücksichtigt werden, dass das Herstellungsdatum von Henkel neu aktueller ist als Henkel alt, aber das Ablaufdatum bereits von beiden überschritten ist. Überraschend ist dass die gemischte Probe ECA2 Mix später reagiert als ECA2 neu. Das kann mit dem Beimischen eines frischen Klebstoffs ähnlich ECA2 neu zusammenhängen. Der ECA 1 alt reagiert bereit bei  $130^{\circ}\text{C}$ , während ECA1 neu erst bei  $133^{\circ}\text{C}$  eine Reaktion aufzeigt. Die Temperaturdifferenzen sind für die großen Zeiträume nicht sonderlich groß und kleiner als  $10\text{K}$ . Dennoch lässt sich diese Zeitabhängigkeit bei beiden Klebstoffen bestätigen. Das gleiche Verhalten spiegelt sich in den Peaktemperaturen wieder. Die Temperaturbereiche sind durch den DSC-Kurvenverlauf gestiegen. Das ist der hauptsächliche Unterschied zwischen den Starttemperaturen und den Peaktemperaturen. Die Differenzen der Temperaturbereiche zwischen den verschiedenen Alterungsstufen scheint kleiner zu werden. Dennoch ist das Maximum der exothermen Reaktion bei ECA2 alt zuerst erreicht, dann folgen ECA2 neu und ECA2 Mix. Auch für den anderen Klebstoff erreicht ECA1 alt zuerst das Reaktionsmaximum und ECA1 neu folgt bei einer größeren Temperatur.

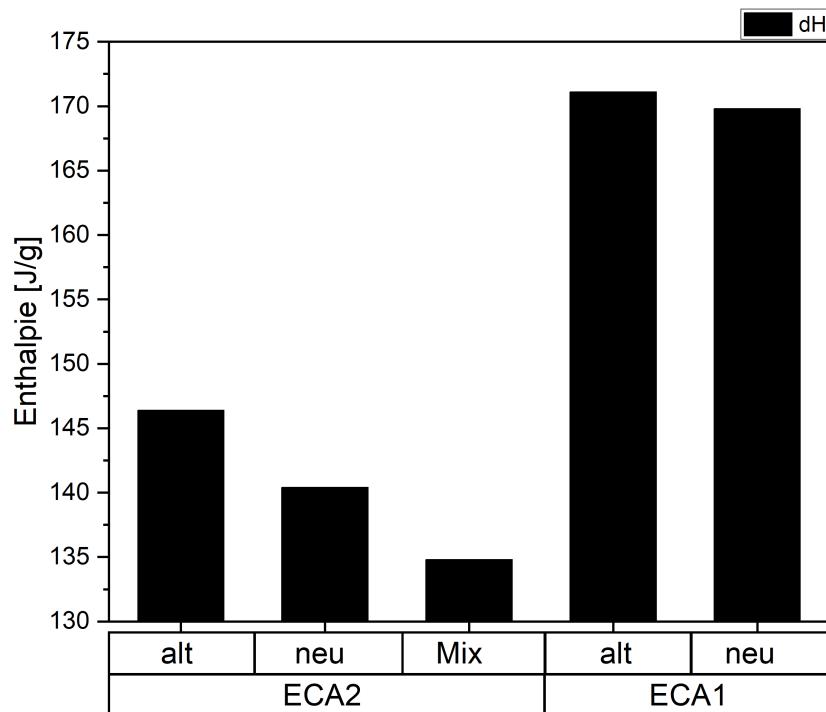


Abbildung 46: Gegenüberstellung der extrapolierten Fläche als Enthalpieänderung der unterschiedlichen Proben aus der DSC-Messung

Die Ergebnisse der Enthalpie zeigen in Bezug auf die Herstellungs- und Lagerungszeit ein umgekehrtes Verhalten als zu den Starttemperaturen bzw. den Peaktemperaturen. ECA2 alt weist eine Enthalpie Änderung von  $-146,4 \frac{\text{J}}{\text{g}}$  auf. Der Wert ist negativ aufgrund der exothermen Reaktion. Dahingegen beträgt die Enthalpie von ECA2 neu  $-140,4 \frac{\text{J}}{\text{g}}$  und ECA2 Mix  $-134,8 \frac{\text{J}}{\text{g}}$ . Entscheidend ist der Betrag also die Menge der Enthalpie. Die Enthalpie für die Vernetzung von ECA2 ist bei ECA2 Mix und ECA 2 neu deutlich geringer als die von ECA2 alt. Der Unterschied ist für ECA1 etwas geringer. Hier beträgt die Enthalpie von ECA1 alt

$-171,1 \frac{J}{g}$  und von ECA1 neu  $-169,8 \frac{J}{g}$ . Die unterschiedlichen Enthalpieänderungen ergeben sich aus den DSC-Kurvenverläufen. Der Verlauf von ECA2 neu ist z.B. spitzer als der von ECA2 alt. Das würde bedeuten, dass für die älteren Klebstoffe eine größere Menge innere Energie benötigt wird, um die Vernetzung der Klebstoffe abzuschließen.

Im Folgenden wird auf die isotherme DSC-Messung eingegangen.

Der Verlauf der isothermen Messung setzt sich aus zwei Bereichen zusammen. Mit dem ersten Bereich ist eine Aufheizphase gemeint. Dieser Bereich ist die dynamische Messung. Der zweite Bereich ist ab dem Punkt erreicht, an dem die geforderte Solltemperatur einsetzt. Bei dieser Temperatur setzt die isotherme Messung ein und der Verlauf der Temperatur bleibt somit konstant. Allerdings kommt bei jeder Messung ein leichtes "Überschwingen" zum Erreichen der Solltemperatur vor (Abbildung 47). Über den konstanten Temperatur bildet sich dann das Reaktionsverhalten der verschiedenen ECA2 Proben ab. Die Abbildung 47 zeigt den Verlauf der Probe 1 exemplarisch auf. Die rot gekennzeichnete Kurve ist die Heizrate. Diese ist charakteristisch für den Temperaturverlauf über die Zeit. Der Wärmestrom der ECA2 Proben wird mit der grauen und blauen Kurven aufgezeichnet. Der graue Bereich stellt die dynamische Messung und der blaue Bereich die isotherme Messung dar. Als Grundlage der ersten Probe wurde anhand der Standard dynamischen Messung die gemessene Onsettemperatur als Orientierungswert gewählt. Diese Starttemperatur von ca.  $73^{\circ}\text{C}$  ist der Temperaturbereich der ersten Probe. Anhand des isothermen Verlaufs kann man ein Maximum der Vernetzungsreaktion der Probe 1 bei etwa 2min erkennen. Nach Beginn des isothermen Zustands würde das etwa nach 40s auftreten. Eine Zusammenfassung der Kurvenverläufe wird in Abbildung 49 aufgezeigt.

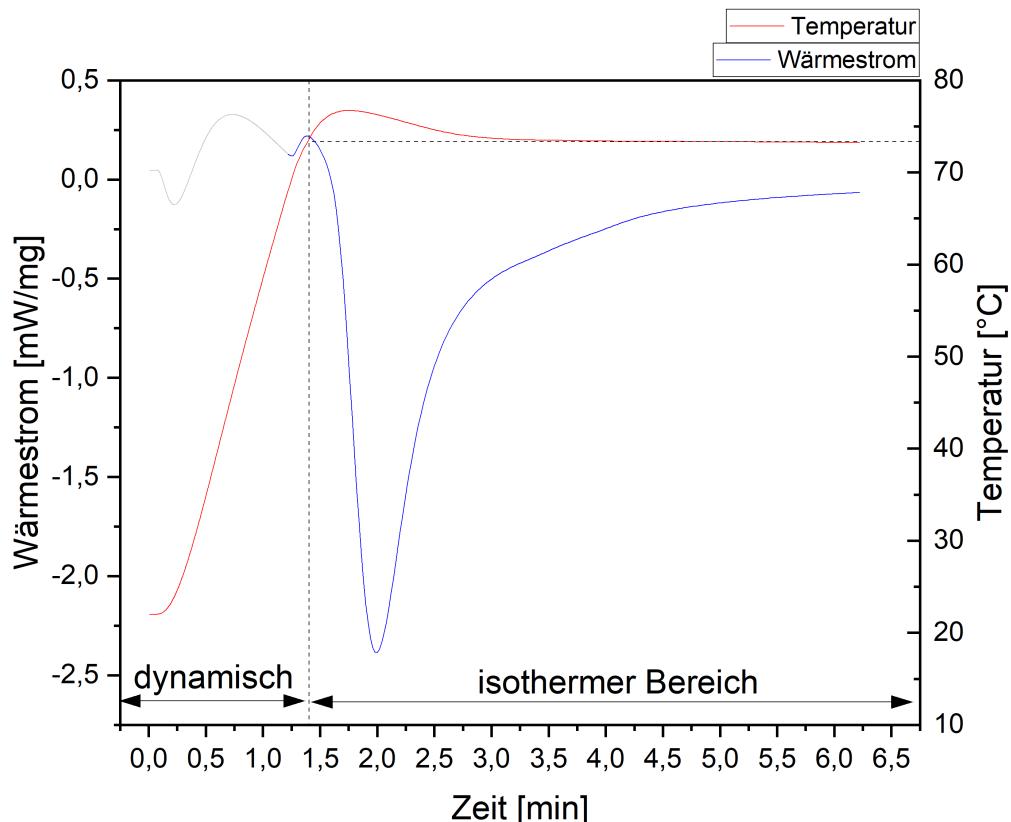


Abbildung 47: DSC-Kurve mit dynamischen und isothermen Bereich und Temperaturverlauf einer isothermen Messung von ECA2 Probe 1

Anhand dieses Vergleichs erkennt man den unterschiedlichen zeitlichen Einfluss der isothermen Temperaturbereiche. Die DSC-Kurve mit den sechs unterschiedlichen isothermen Temperaturbereichen stellt die unterschiedlichen Reaktionsverhalten dar. Für alle Proben wurde der gleiche Klebstoff verwendet, sodass von einer konstanten Materialeigenschaft ausgegangen werden kann. Anhand der Variation der Temperaturbereiche lässt sich die Reaktionszeit des Klebstoffs schlussfolgern. Es lässt sich in der Abbildung 49 eine deutliche Verschiebung der Peaktemperaturen auf der Zeitachse erkennen. Die verschiedenen Temperaturpeaks verlaufen größtenteils von links nach rechts umso kleiner die isothermen Temperaturen der Heizrate werden. Hier bestätigt sich die Annahme, dass die Vernetzung schneller das Reaktionsmaximum erreicht, umso mehr Wärme eingebracht wird. Nur die Probe 1 fällt etwas aus diesem Muster heraus. Das hängt mit einem Messfehler in der DSC-Messung zusammen. Das spiegelt sich auch in den Verläufen der Startbereiche der DSC-Kurven wieder. Bei Probe 1 ein deutlicher Versatz zu sehen. Alle Proben nähern sich nach der Vernetzung der Basislinie an. Besonders bei der Probe ( $T=59^{\circ}\text{C}$ ) wird deutlich, dass der exotherme Verlauf sehr gering ist. Hier ist damit zu rechnen, dass die Vernetzung nicht abgeschlossen ist. Außerdem liegt eine starke Verschiebung der Zeit bis zum Auftreten der maximalen Reaktionsgeschwindigkeit vor. Dadurch stellt der isotherme Bereich der Probe 5 von  $59^{\circ}\text{C}$  den unteren Grenzwert der Messung für den ECA2 dar. Die Probe 6 ( $T=77^{\circ}\text{C}$ ) stellt den oberen Grenzwert der isothermen Messung für den ECA2 dar. Mit der verwendeten Heizrate von  $40 \frac{\text{K}}{\text{min}}$  lassen sich kaum höhere isotherme Bereiche realisieren. Während des Aufheizens der Probe 7 ( $T=150^{\circ}\text{C}$ ) findet bereits die Vernetzung statt bevor der Zielwert für die Temperatur erreicht wird (Abbildung 48). Das liegt vor allem daran, dass die Temperatur erst in der Ofenkammer erzeugt ist wenn die Probe bereits eingelegt ist.

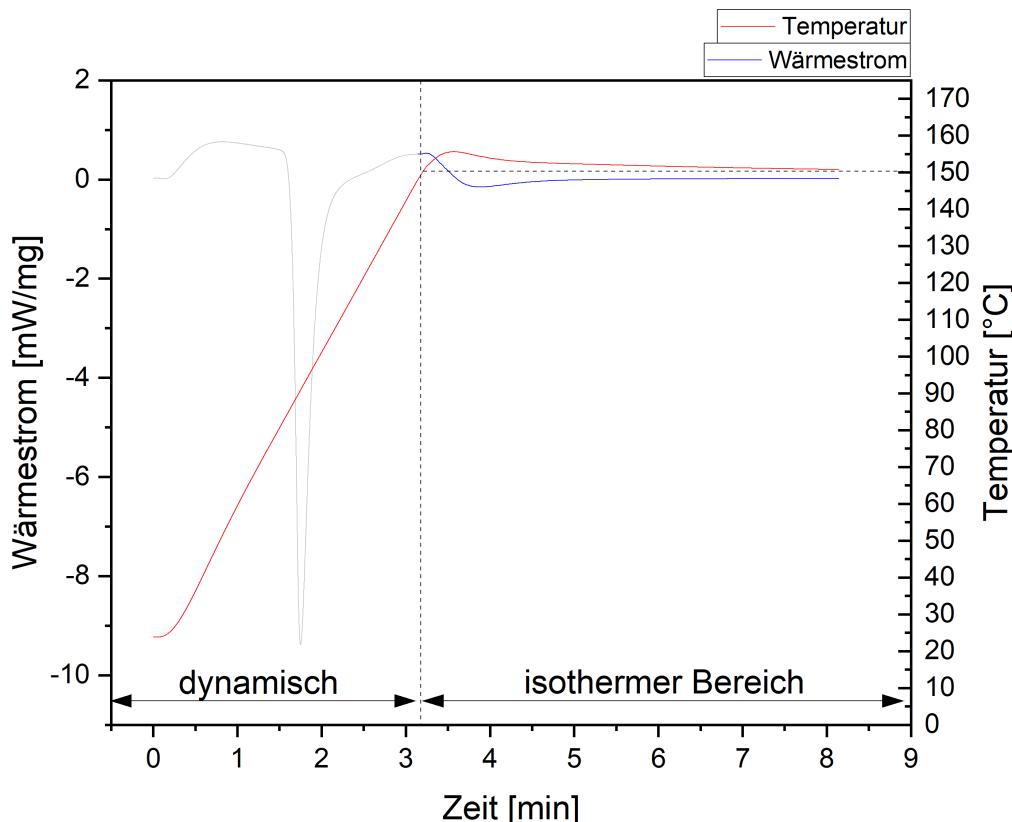


Abbildung 48: DSC-Kurve mit dynamischen und isothermen Bereich und Temperaturverlauf einer isothermen Messung von ECA2 Probe 7 mit Vernetzung im dynamischen Bereich

Eine Einlegen der Probe bei erreichtem isothermen Zustand ist nicht möglich. Durch diese Faktoren ist ein genauer Rückschluss über die Zeit auf eine mögliche Produktionszeit im Stringer nicht umsetzbar. Anhand der begrenzten Temperaturwerte und daraus resultierenden großen Zeitbereiche von mindestens 2min ist ein Projizieren der Messungen auf den Produktionsprozess auf direkte Weise nicht möglich. Eine Abschätzung auf größere Temperaturbereiche stellt das Ergebnis der isothermen Messung für die Übertragung auf die Stringproduktion dar (Kapitel 4.1). Aufgrund dieses Ausgangs der isothermen Messung für ECA2 wurde die Messung von ECA1 übersprungen und die Rückschlüsse auf die Stringproduktion aus der Standard-Messung übertragen.

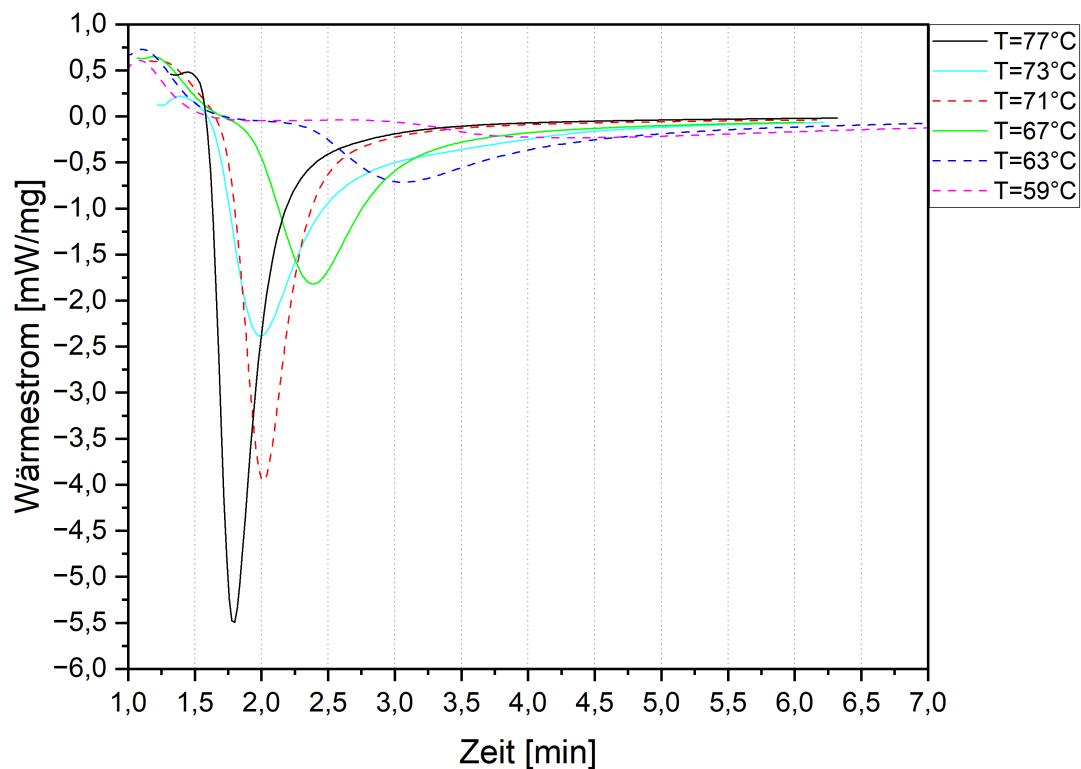


Abbildung 49: DSC-Kurven der isothermen Bereiche von ECA2

### Schälprüfung

Die Ergebnisse der Schälprüfung unterscheiden sich wie in der Durchführung beschrieben auf zwei Durchführungsmethoden. Für den ersten Teil sind die Ergebnisse mit den manuellen Verfahren mittels Ablesen an der Kraftmessdose erfolgt. Daraufhin ist das automatische Verfahren mittels Aufzeichnung der Kraft-Zeitkurve entstanden und hat das Ablesen der Messpositionen ersetzt. Dadurch unterscheiden sich die zwei Ergebnisteile in der Ergebnisdarstellung durch unterschiedliche Ergebnisaufzeichnungen. Der Versuchsgegenstand und die Messmethodik bleibt gleich. Die Ergebnisse einer Probe unterscheiden sich außerdem immer in Vorderseite und Rückseite. Das Kriterium entsteht aus der Versuchsdurchführung. Die Ergebnisse sind dadurch getrennt zu betrachten. Zunächst werden einzelne Ergebnisse aus dem manuellen Verfahren dargestellt, damit der Unterschied verdeutlicht wird. Danach folgen Ergebnisse zu den aufgezeichneten Kraftkurven. Die manuelle Messung betrifft chronologisch die ersten Probenreihen von ECA1 und ECA2. Die Ergebnisse der Schälfestigkeit für die einzelnen Proben sind in Histogrammen zusammengefasst. Die Y-Achse stellt die Anzahl der erreichten Schälfestigkeiten dar. Die X-Achse gibt dabei den Wert der Schälfestigkeit an. Die Werte stammen aus den Prüfprotokollen. Insgesamt ergeben sich pro Messung 32 Werte aus der Anzahl der Messstellen (4) und der Anzahl der Busbars (9). In der Abbildung 50 und 51 sind die Ergebnisse der Probe ECA2-T4 abgebildet. Anhand der Diagramme erschließt sich die Verteilung der Schälfestigkeit. Die Verteilung erstreckt sich bei ECA2-T4 Rückseite über sowie unterhalb des Grenzwertes von  $0,5 \frac{N}{mm^2}$ . Deutlich wird die Toleranz von jedem Wert der Vorderseite der Probe ECA2-T4 unterschritten. Hier wird schon durch den Blick auf das Histogramm (Abbildung 51) nachvollziehbar, dass unter diesen Fertigungsbedingungen keine Freigabe für den Prozess erfolgen kann.

Die Proben Lot, ECA1-V6 und ECA2-T9 sind mit dem automatischen Verfahren aufgenommen wurden. Aus diesen Messungen zeichnen sich die einzelnen Kraft-Zeitdiagramme ab. Als Beispiel ist der Verlauf der Kraft von ECA2-T9 Rückseite über die Zeit abgebildet (Abbildung 52). Über die Verbinderbreite erhält man den Wert für die Festigkeit nach der Schälfestigkeitsgleichung (Kapitel 2.2.2). Die Diagramme werden auf die Bereiche der Verbinder ausgelesen und für jeden Verbinder wird die Schälfestigkeit ausgewertet.

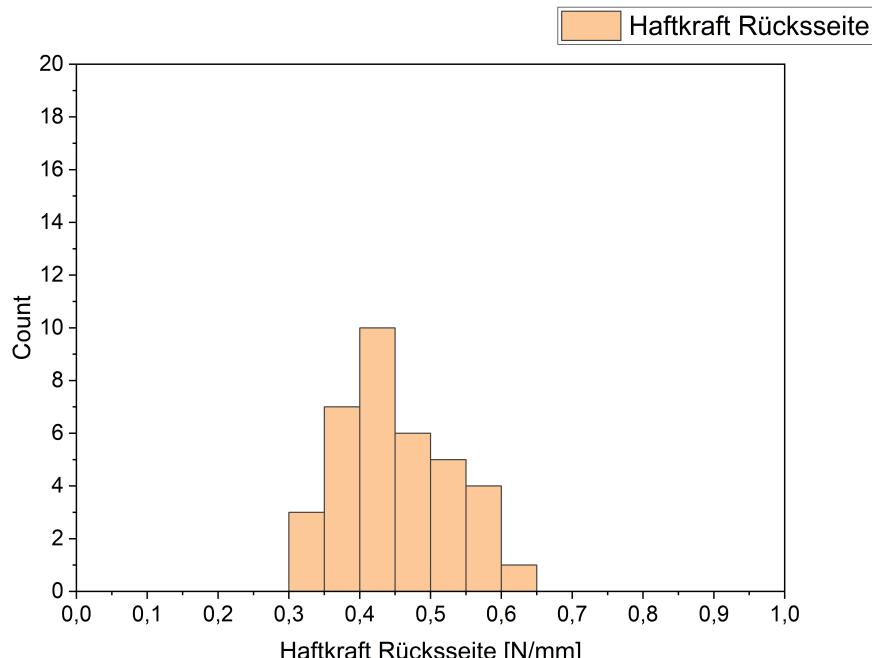


Abbildung 50: Histogramm der Verteilung der Häufigkeit der Schälfestigkeit von ECA2-T4 bezogen auf die Rückseite

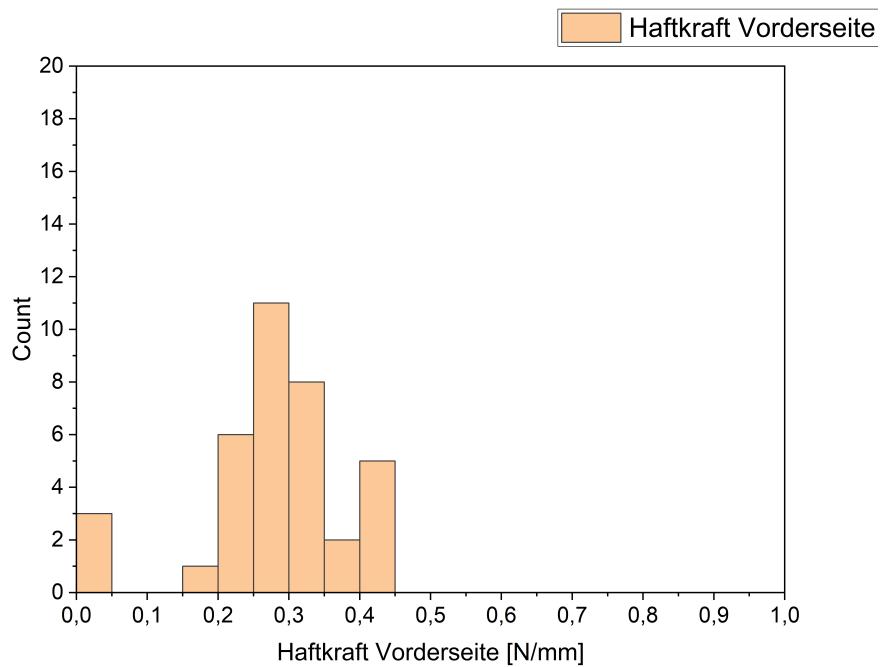


Abbildung 51: Histogramm der Verteilung der Häufigkeit der Schälfestigkeit von ECA2-T4 bezogen auf die Vorderseite

Die einzelnen Ergebnisse können als Gesamtergebnis in einem Histogramm abgebildet werden. Das aus der aufgezeichneten Kraft-Zeitkurve ermittelte Histogramm von ECA2-T9 Rückseite ist in Abbildung 53 zu sehen. Der Mittelwert wird in der Übersichtstabelle festgehalten. Dieser Mittelwert der Schälfestigkeit ist entscheidend für die Freigabe der Stringproduktion. Für die Produktion wurden die Probenreihen gewählt mit verbesserten Schälfestigkeiten. Wenn der Mittelwert der Schälfestigkeit größer ist als der Grenzwert  $0,5 \frac{N}{mm^2}$ , dann müssen die Mittelwerte der einzelnen Busbars überprüft werden, um Extremwerte an einzelnen Verbindern auszuschließen. Die Übersicht der Schälfestigkeiten der gesamten Proben ist in der Übersichtstabelle 9 und 10 zusammengefasst. Die Proben die für den Prozess freigegeben wurden, sind in der Übersichtstabelle grau hinterlegt.

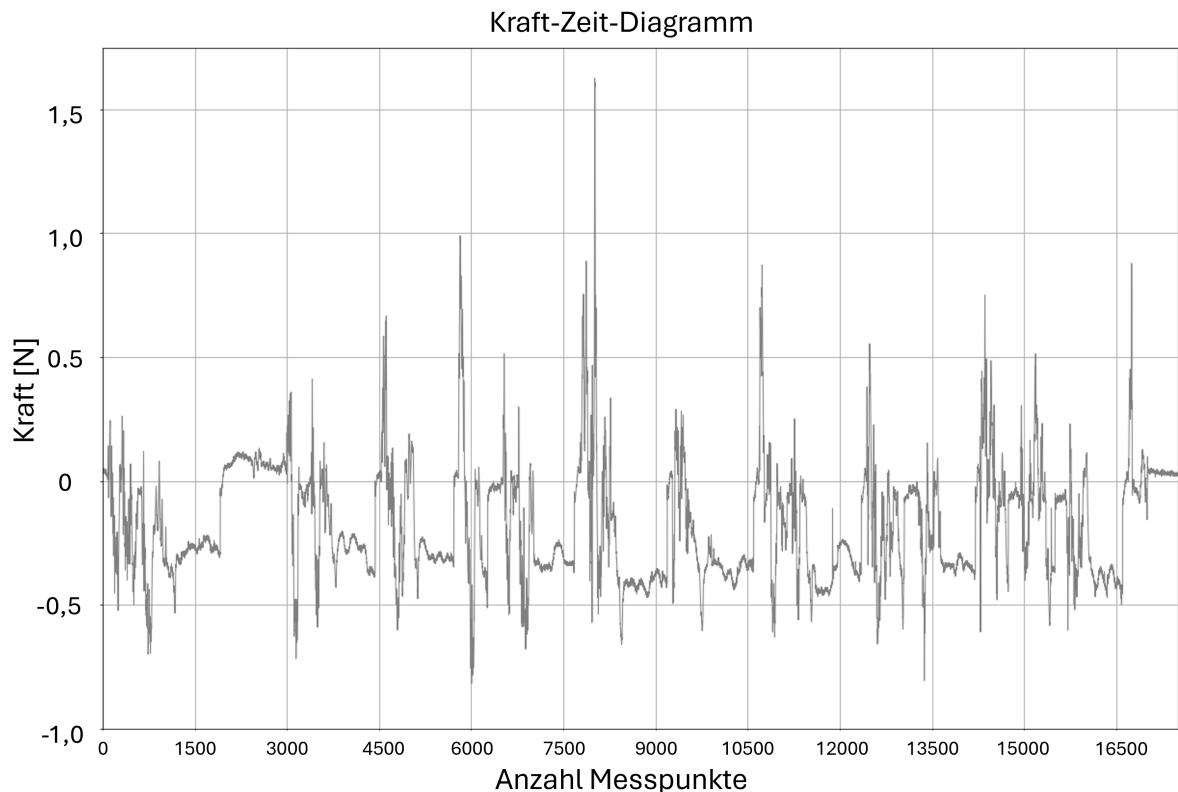


Abbildung 52: Kraft-Zeitkurve der Probe ECA2-T9 rückseitig, automatisch aufgezeichnet

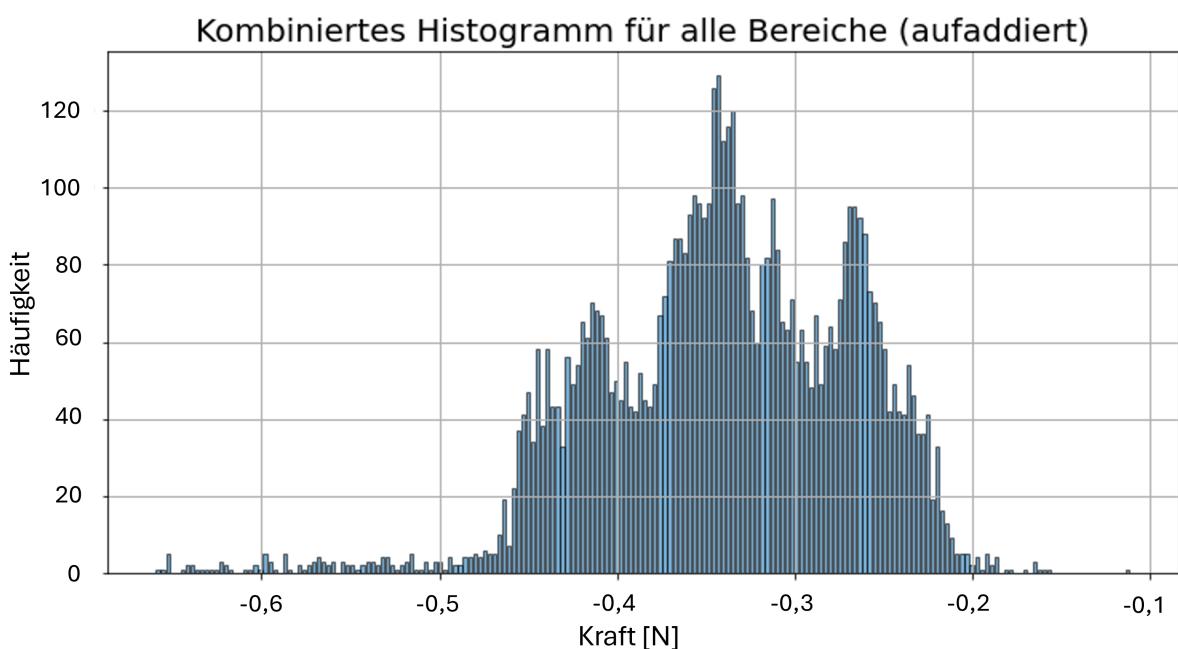


Abbildung 53: Selektiv erzeugtes Histogramm aus der aufgezeichneten Kraft-Zeitkurve und Verteilung der Häufigkeit der Kraft von ECA2-T9 Rückseite

Der Vergleich aller Proben wird in Abbildung 54 und 55 veranschaulicht. Es stellt die Verteilung der Schälfestigkeit dar. Dabei ist die Prüfvariante der Kraftaufzeichnung zu berücksichtigen. Die untersuchten Proben lassen sich in drei Gruppen unterteilen: ECA1 (V1, V3, V4, V6), ECA2 (T1, T2, T4, T9) und Lot. Die Ergebnisse der Rückseite zeigen, dass die mittels Lot verbundenen Solarzellen die höchste Schälfestigkeit aufweisen. Der Mittelwert liegt bei etwa 5,03 N/mm, was ein Vielfaches der Werte der ECA-Proben darstellt. Zudem zeigt diese Gruppe eine vergleichsweise große Streuung. Innerhalb der ECA-Verbindungen zeigen die Proben der Gruppe ECA1 höhere Schälfestigkeiten als die der Gruppe ECA2. Die mittleren Werte für ECA1 liegen zwischen 0,57 und 0,77 N/mm, wobei die höchste Schälfestigkeit bei V1 (0,76 N/mm) und die niedrigste bei V4 (0,572 N/mm) beobachtet wurde. Die Streuung innerhalb dieser Gruppe ist moderat. Im Gegensatz dazu weisen die Proben der Gruppe ECA2 insgesamt geringere Schälfestigkeiten auf, mit Werten zwischen 0,22 und 0,66 N/mm. Die niedrigste mittlere Schälfestigkeit wurde bei T2 mit 0,22 N/mm gemessen, während T9 mit 0,660 N/mm den höchsten Wert innerhalb dieser Gruppe erreichte.

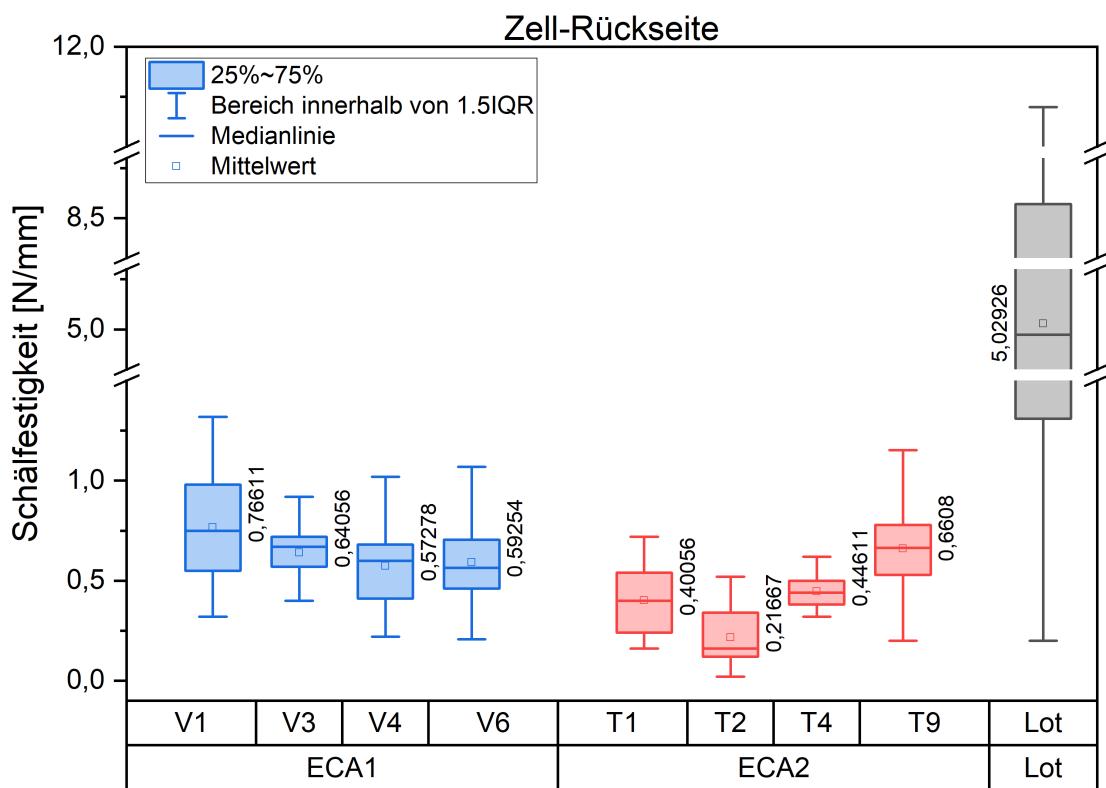


Abbildung 54: Verteilung der Schälfestigkeiten auf den Rückseiten, Unterscheidung nach der Verschalungsart der Proben

Die höchsten Schälfestigkeiten wurden auf den Zell-Vorderseiten erneut bei den Lotverbindungen gemessen, mit einem Mittelwert von 1,35 N/mm. Obwohl dieser Wert deutlich niedriger ist als auf der Zell-Rückseite, übertrifft er dennoch die Ergebnisse der ECA-Verbindungen signifikant. Zudem weist die Lot-Gruppe eine größere Streuung auf. Innerhalb der ECA-Proben zeigt die Gruppe ECA1 insgesamt höhere Schälfestigkeiten als ECA2. Die mittleren Werte in dieser Gruppe variieren zwischen 0,42 und 0,86 N/mm, wobei die höchste Schälfestigkeit bei V1 (0,855 N/mm) und die niedrigste bei V3 (0,419 N/mm) beobachtet wurde. Die Proben der Gruppe ECA2 weisen insgesamt geringere Schälfestigkeiten auf als ECA1, mit Werten zwischen 0,14 und 0,69 N/mm. Besonders niedrige Schälfestigkeiten wurden bei T1 (0,142 N/mm) und T2 (0,252 N/mm) gemessen, während T9 mit 0,690 N/mm den höchsten Wert innerhalb dieser Gruppe aufweist. Zusammenfassend zeigt sich, dass die Schälfestigkeiten auf

der Zell-Vorderseite generell niedriger sind als auf der Rückseite. Die Lot-Technologie bleibt die stabilste Verbindungs methode, während innerhalb der ECA-Verbindungen ECA1 eine höhere mechanische Stabilität aufweist als ECA2.

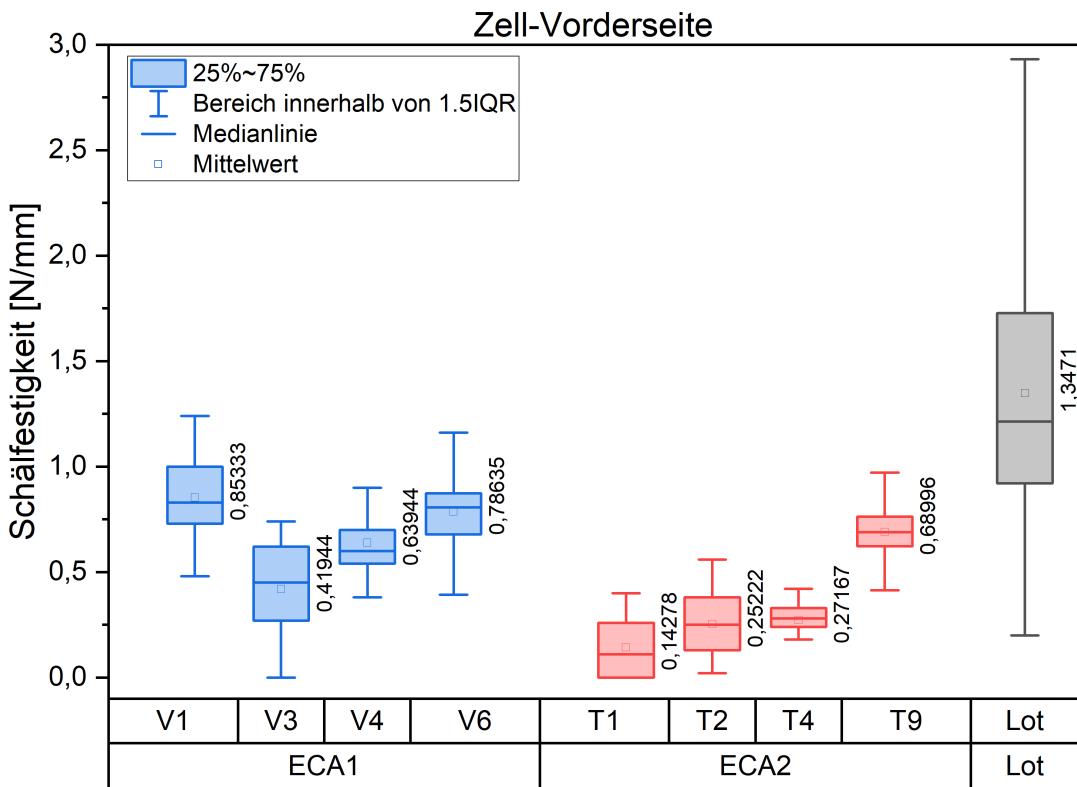


Abbildung 55: Verteilung der Schälfestigkeiten auf den Vorderseiten, Unterscheidung nach der Verschaltungsart der Proben

An den Lot Proben war aufgrund der teilweise großen Schälfestigkeit die Messung besonders schwierig und kompliziert. Die äußerst fragilen Zellen beginnen bei solchen starken Verbindungen vorher zu brechen bevor die Verbinder abgezogen werden können. Dadurch konnten zum Teil keine Ergebnisse generiert werden. Dennoch ist es gelungen eine Schälfestigkeit zu bestimmen.

Die Variation der Temperaturprofile in der Stringfertigung verbessert die Schälfestigkeiten hauptsächlich für den ECA2. Die Temperaturänderung von ECA1 hat eher gleich bleibende Schälfestigkeiten ergeben. Es lässt sich hier vermuten, dass das Reaktionsverhalten von ECA1 stabiler ist für Prozessveränderungen. Durch die Versuche haben sich Kennwerte für die gefertigten Strings ergeben. Zusammengefasst kann man festhalten, dass Lot die festeste Verbindung ist. Mit kleineren Schälfestigkeiten folgt ECA1. Die geringste Festigkeit weist ECA2 auf. Dabei sollte berücksichtigt werden, dass pro String eine Stichprobe von einer Zelle erfolgt und zu Messunsicherheiten führt.

Tabelle 9: Darstellung der Schälfestigkeiten auf den Rückseiten der gesamten Proben anhand des Verfahrens (automatischer oder manueller Kraftablesung) und Mittlung der Ergebnisse

Probe	Ergebnisse Schälfestigkeit [N/mm]			Verfahren
	Mittelwert	Median	Standard-abweichung	
Lot	5,03	4,97	3,50	automatisch
ECA1-V1	0,77	0,75	0,27	manuell
ECA1-V2	0,62	0,60	0,18	manuell
ECA1-V3	0,64	0,67	0,15	manuell
ECA1-V4	0,57	0,60	0,17	manuell
ECA1-V6	0,59	0,56	0,18	automatisch
ECA2-T1	0,40	0,40	0,16	manuell
ECA2-T2	0,22	0,16	0,15	manuell
ECA2-T4	0,45	0,44	0,08	manuell
ECA2-T9	0,66	0,66	0,21	automatisch

Tabelle 10: Darstellung der Schälfestigkeiten auf den Vorderseiten der gesamten Proben anhand des Verfahrens (automatischer oder manueller Kraftablesung) und Mittlung der Ergebnisse

Probe	Ergebnisse Schälfestigkeit [N/mm]			Verfahren
	Mittelwert	Median	Standard-abweichung	
Lot	1,35	1,21	0,68	automatisch
ECA1-V1	0,85	0,83	0,17	manuell
ECA1-V2	-	-	-	manuell
ECA1-V3	0,42	0,45	0,24	manuell
ECA1-V4	0,64	0,6	0,17	manuell
ECA1-V6	0,79	0,81	0,17	automatisch
ECA2-T1	0,14	0,11	0,15	manuell
ECA2-T2	0,25	0,25	0,16	manuell
ECA2-T4	0,27	0,28	0,11	manuell
ECA2-T9	0,69	0,69	0,15	automatisch

### 4.3.2 Modulcharakterisierung

Die Modulcharakterisierung umfasst die Charakterisierung der Fassadenmodul-Proben. Im Folgenden werden Ergebnisse der EL-Tests und I-U-Kennlinien betrachtet. Diese sind zum Zeitpunkt nach der Produktion der Modulproben entstanden. Das bezieht sich auf den ersten Kreislauf der Modulcharakterisierung aus dem Versuchsplan. Auf die darauf folgenden Modulbeanspruchungen wird nicht eingegangen. Diese würden nach diesen Ergebnissen folgen. Die folgenden Ergebnisse sind als Bestandsaufnahme vor den Modulbeanspruchung oder als Anfangszustand zu betrachten.

#### Elektrolumineszenz-Test

Für die insgesamt 28 verschiedenen Modulproben sind die EL-Aufnahmen entstanden. Die angeschlossene Modulspannung beträgt 70V für die EL-Tests. Die Stromstärke wird zwischen den Werten 0, 55A und 5, 5A gewechselt. Daraus ergeben sich unterschiedliche Kontraste der Aufnahmen. Es wird ein gelötetes Fassadenmodul mit geringeren Fehlerbild in Abbildung 56 aufgezeigt. Deutlich größere Beschädigungen eines gelötzten Moduls sind in Abbildung 57 vorzufinden. Der Unterschied der verschiedenen Fehler wird quantitativ an den EL-Aufnahmen deutlich. Während der String mit weniger Beschädigungen eine fehlerhafte, sind bei dem String in Abbildung 57 vier Zellen betroffen. Dieses Kriterium spielt allerdings für die Modulleistung keine Rolle.

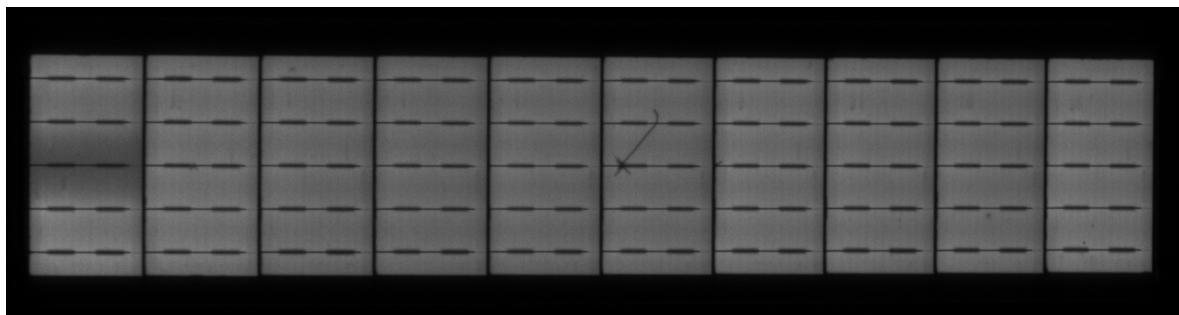


Abbildung 56: EL-Aufnahme des Moduls ID20240150 bzw. eines gelötzten Strings mit geringem Fehlerbild

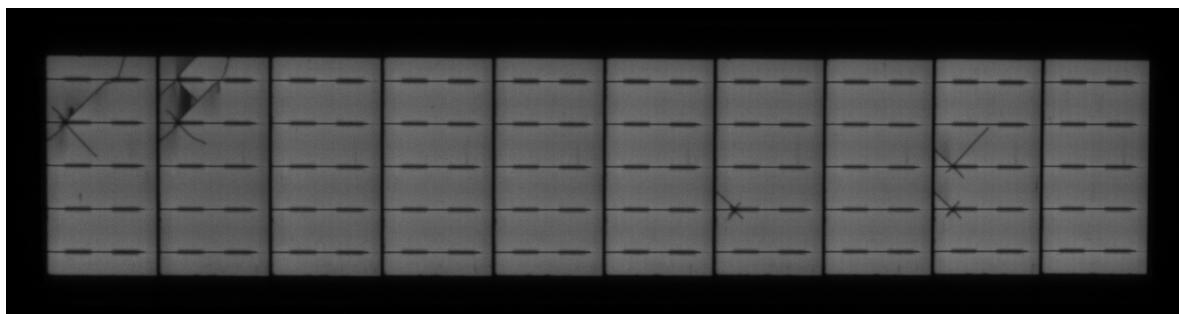


Abbildung 57: EL-Aufnahme des Moduls ID20240149 bzw. eines gelötzten Strings mit verstärktem Fehlerbild

Es würde theoretisch ausreichen, wenn der Stromfluss von einer Zelle blockiert oder eingeschränkt wird. Dann würde die Modulleistung deutlich beeinträchtigt werden, da die Strings in Reihe verschaltet sind. Die Wahrscheinlichkeit der Störung des Stromflusses ist am größten, wenn die Verbinder eines Strings betroffen sind. Daher wird im Folgenden das Hauptkriterium auf die lokalen Stellen der Verbinder gelegt. Auf den Abbildungen lassen sich die verschiedenen Fehlerbilder, die in den Grundlagen erklärt sind (Kapitel 2.1.3) erkennen. In

der Abbildung 56 ist eine dunklere Stelle zu sehen. Diese befindet sich von links aus auf der ersten Zelle am mittleren Verbinder. Es lässt sich daraus schließen, dass hier der Stromfluss eingeschränkt wird aufgrund einer nicht sorgfältig verbundenen Verlötung zwischen Zelle und Verbinder. In der Abbildung 57 kommen Fehler in Form von Rissen, Zellbrüchen und Kratzern vor. Der Unterschied zwischen einer angekratzten Oberfläche oder einem durchgehenden Riss kann nur schwer interpretiert werden. Die Fehler erscheinen auf gleiche Weise als dunkle Linie. Es ist eher von einem Riss auszugehen, wenn die Linie den dunkelsten Ton wie der Hintergrund angenommen hat. Aber das richtig zu erkennen ist äußerst schwierig und kann optisch täuschen. Ein Zellbruch ist durch Fehlstellen gut identifizierbar. Eine solche Fehlstelle ist auf der zweiten Zelle von links zu sehen. Zwischen den vermeintlichen Rissen ist etwas von der Zelle heraus gebrochen. Hierbei wird nicht nur der Stromfluss durch eine Zelle verringert, sondern die Gesamtleistung einer Zelle wird aufgrund fehlender Fläche reduziert. Betrachtet man den gesamten String, sind von oben nach unten vier Verbinderreihen auf verschiedenen Zellen mit Beschädigungen betroffen.

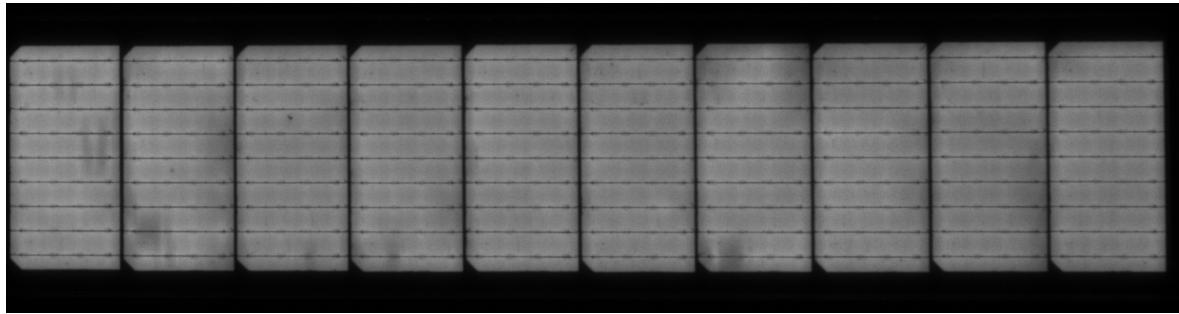


Abbildung 58: EL-Aufnahme des Moduls ID20240158 bzw. eines mit ECA1 verschalteten Strings mit geringem Fehlerbild

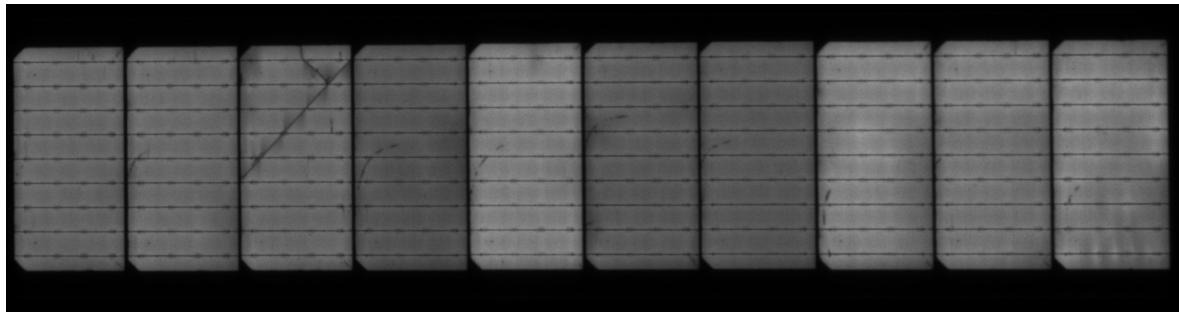


Abbildung 59: EL-Aufnahme des Moduls ID20240168 bzw. eines mit ECA1 verschalteten Strings mit verstärktem Fehlerbild

Nur in der letzten Reihe kommt keine Beschädigung. Die Schlussfolgerung für den String in Abbildung 57 würde lauten, dass letztendlich Strom fließen würde aber durch die Häufigkeit der Beschädigungen mit einer bereits reduzierten Stromfluss zu rechnen ist. Aufgrund dieser Schlussfolgerung wurde dieses Modul für die späteren Messungen aussortiert. Eine Modulbeanspruchung mit folgenden Charakterisierungen würde viel Aufwand und Zeit erfordern. Dadurch sollte ein sinnvoller Anfangszustand gewählt werden. An dieser Stelle ist bereits mit initiierten Fehlern zu rechnen. Auf dieser Grundlage wurden alle EL-Aufnahmen ausgewertet. Ein Beispiel einer EL-Aufnahme von einem Fassadenmodul verschaltet mit ECA1 ist in Abbildung 58 und 59 dargestellt. Ein deutlicher Unterschied wird aufgrund der Anzahl an Verbindern sichtbar. Die Interpretation der Fehlerbilder verhält sich auf die geklebten Verbinder gleichermaßen. Für alle 28 Fassadenmodule sind die Auswertungen in der Tabelle 11 zusammengefasst. In der Tabelle sind die Zuordnung, Ausmaße und Häufigkeiten der Fehler

aus den EL-Aufnahmen in den Spalten veranschaulicht. Unterschieden werden die einzelnen Module anhand ihrer Verschaltung in Lot und Klebstoffe (ECA1, ECA2). Insgesamt haben 8 von 28 Module keine offensichtlichen Beschädigungen. Das sind mit etwa 28,5% nicht viele fehlerfreie Module. Die Ursache dafür ist die äußerst schwierige Bewegung der Strings. Aufgrund dass jede einzelne Zelle sehr fragil ist, erschwert die Verschaltung zum String die Handhabung. Bereits bei der Stringentnahme gestaltet sich das Greifen eines Strings aus 10 Zellen kompliziert. Hinzu kommt die Transportfähigkeit der Strings. Trotz sorgfältigen Verpacken in Transportkisten und Auslegen von Zwischenlagen nach jedem String ist eine Beschädigung durch einen Transport nicht ausgeschlossen. Durch die Beschränkung der vorrätigen Materialien wurden nach den stärksten Beschädigungen insgesamt vier Module für ein Nachbau ausgesucht. Anhand der Kennzeichnung der Module wurden die exakten Materialkomponenten identifiziert.

Tabelle 11: Auswertung der EL-Aufnahmen der verschiedenen Module und Quantifizierung der Fehler

Modul ID	Bauart	EL ohne Fehler	EL mit Zellbruch	EL mit geringen Fehlerbild	EL mit verstärkten Fehlerbild	Verbinder betroffen	Bemerkungen
CSP-S-ID20240149	Lot		x		x	7	Nachbau
CSP-S-ID20240150	Lot			x		2	
CSP-S-ID20240151	Lot		x		x	5	
CSP-S-ID20240152	Lot		x		x	6	
CSP-S-ID20240153	Lot		x		x	4	
CSP-S-ID20240154	Lot		x		x	7	Nachbau
CSP-S-ID20240155	Lot	x				0	Anschlüsse verpolzt
CSP-S-ID20240156	Lot	x				0	
CSP-S-ID20240157	ECA1	x				0	
CSP-S-ID20240158	ECA1	x				0	
CSP-S-ID20240159	ECA1	x				0	
CSP-S-ID20240160	ECA1		x	x		2	
CSP-S-ID20240161	ECA1			x		4	
CSP-S-ID20240162	ECA1		x	x		5	
CSP-S-ID20240163	ECA1			x		4	
CSP-S-ID20240164	ECA1			x		6	
CSP-S-ID20240165	ECA1			x		2	
CSP-S-ID20240166	ECA1				x	7	
CSP-S-ID20240167	ECA1			x		5	
CSP-S-ID20240168	ECA1		x		x	10	Nachbau
CSP-S-ID20240169	ECA1			x		6	
CSP-S-ID20240170	ECA1		x	x		5	
CSP-S-ID20240171	ECA1		x	x		7	Nachbau
CSP-S-ID20240172	ECA1	x				0	
CSP-S-ID20240258	ECA2		x	x		1	
CSP-S-ID20240259	ECA2				x	8	
CSP-S-ID20240260	ECA2	x				0	
CSP-S-ID20240261	ECA2	x				0	

### Bestimmung der I-U-Kennlinie

Die I-U-Kennlinie konnte für jedes Fassadenmodul unter STC-Bedingungen erstellt werden. Für die Sicherheit wurden jeweils zwei Messungen durchgeführt. Aufgezeichnet wurden drei Messpunkte, die für die Strom-Spannungskennlinie vergleichbare Ergebnisse liefern sollen. Aus Kapazitätsgründen wird nur der mittlere Messpunkt in den Diagrammen dargestellt. Die folgenden Diagramme werden nach den Modulen und der Verschaltung unterschieden. Die ersten Diagramme sind aus der gelötenen Verschaltung (Abbildung 61 und 60). Die darauf folgenden Kennlinien gehören zu den ECA1 (Abbildung 62 und 63) und die letzten zu den ECA2 Verbindungen (Abbildung 65 und 64). Jeweils ist ein Diagramm abgebildet aus (in den EL-Test festgestellt) einer nahezu fehlerfreien Fertigung und ein weiteres aus beschädigten Modulproben (Tabelle 11). Das soll die Gegenüberstellung der Verschaltungsart und die Folgen der Beschädigungen verdeutlichen. Die Standardtestbedingungen wurden mit einer Bestrahlungsstärke von den üblichen  $1000 \frac{W}{m^2}$  ausgeführt. Zum Vergleich wurde eine Messung bei gleichen Bedingungen und einer Bestrahlungsstärke von  $200 \frac{W}{m^2}$  durchgeführt. Die Ergebnisse der I-U-Kennlinien für die Messungen mit  $200 \frac{W}{m^2}$  sind in Tabelle 13 abgebildet.

In den Diagrammen wird die Stromstärke und die Leistung gegenüber dem Verlauf der Spannung dargestellt. Die Stromstärke bleibt immer bis zu einer bestimmten Spannung nahezu konstant (Kurzschlussstrom). Währenddessen steigt die Leistung linear an. Ab einer bestimmten Spannung fällt die Stromstärke leicht ab. Gleichzeitig sinkt der positive Anstieg der Leistung bis zu einem maximalen Punkt. An diesem Punkt ist der Anstieg der Leistung null. Das Maximum zeichnet den sogenannten Maximum Power Point (MPP) ab. Nach diesem MPP sinkt die Stromstärke rapide ab. Währenddessen beginnt auch die Leistung abzufallen. Die Stromstärke fällt solange ab, bis Sie den Nullwert erreicht. Dadurch etwas verzögert aber zum gleichen Spannungsbetrag (Leerlaufspannung) sinkt die Leistung auf null. Aus dem maximalen Betrag der Leistung bildet sich die Spannung für den MPP ab. Diese Spannung im MPP gibt die Stromstärke in dem MPP an.

Das Modul ID20240149 (Abbildung 61) weist stärkere Mängel auf als das Modul ID20240150 (Abbildung 60). Die Erwartung ist hier, dass der MPP für das Modul ID20240149 kleiner ist. Der Stromfluss wäre aufgrund der Beschädigung eingeschränkt. Dadurch fließen weniger Ladungsträger pro Zeit. Das würde die Stromstärke verringern. Das wiederum führt die Verringerung der Leistung gleichzeitig mit sich. Für das Modul ID20240149 ergibt sich nach der Messung eine Stromstärke von 4,45A und eine Leistung bei MPP von 25,18W. Für das Modul ID20240150 wird eine Stromstärke bei MPP von 4,47A und eine Leistung von 25,31W in dem MPP gemessen. Damit bestätigt sich in diesem Fall der Zusammenhang zwischen Stromdurchfluss und der Beschädigung der Zelle. Die Auswirkungen scheinen noch gering zu sein. Die Betrachtung wird für die weiteren I-U-Kennlinien der Fassadenmodule fortgesetzt.

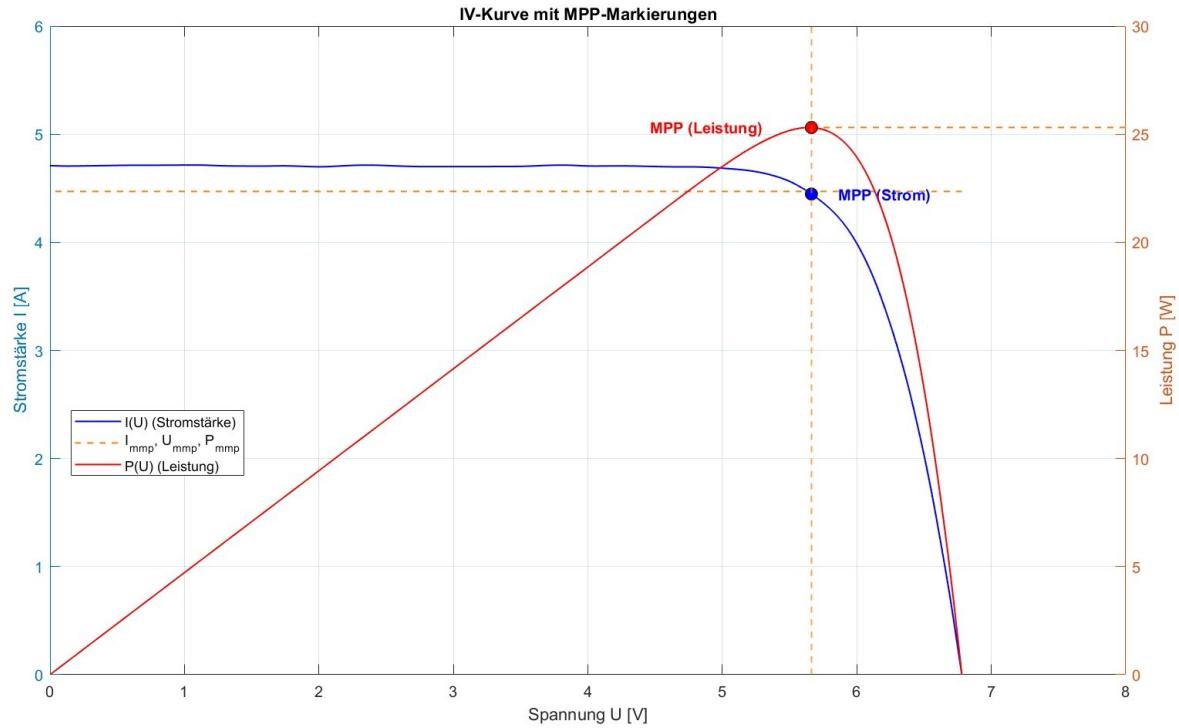


Abbildung 60: I-U-Kennlinie und P-U-Kennlinie des Moduls ID20240150 (Lot) mit geringen Fehlern aus der EL-Aufnahme

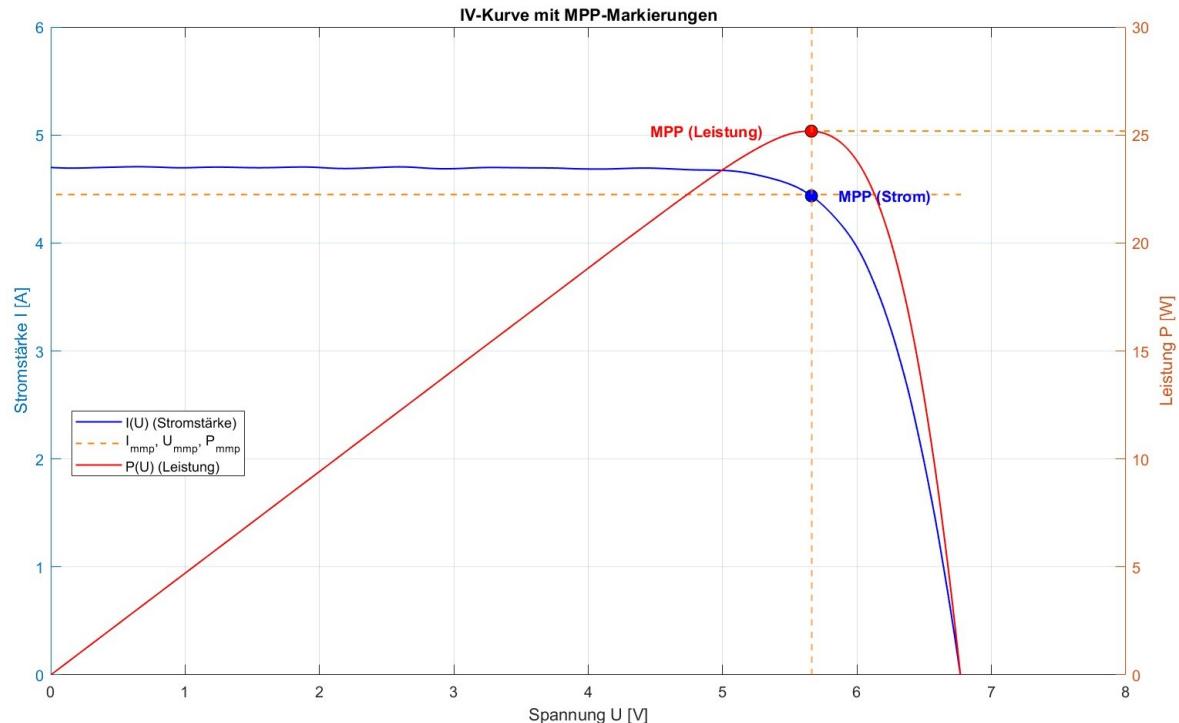


Abbildung 61: I-U-Kennlinie und P-U-Kennlinie des Moduls ID20240149 (Lot) mit verstärkten Fehlern aus der EL-Aufnahme

In den Diagrammen von ECA1 fällt gegenüber dem Diagramm von Lot auf, dass der MPP steigt. Für das Modul ID20240158 (Abbildung 62) wird die Stromstärke im MPP von 4,84A und die Leistung von 27,79W gemessen. Das ist in dem Fall eine Steigerung der Leistung von mehr als 2W durch die unterschiedliche Verschaltung. Das Modul ID20240168 (Abbildung 63) weist die Stromstärke 4,76A und die Leistung 27,03W im MPP auf. Hier zeichnet sich erneut der Einfluss der Beschädigungen auf den Stromfluss aus.

Bei der Betrachtung der I-U-Kennlinien der ECA2 Fassadenmodule fällt auf, dass der MPP etwa genauso groß ist wie der der ECA1 Module. Die Stromstärke im MPP liegt bei 4,82A und die Leistung bei 27,59W für das Modul ID20240260 (Abbildung 64). Das beschädigte Modul ID20240259 (Abbildung 65) weist erstaunlicherweise trotzdem eine Stromstärke von 4,83A und eine Leistung von 27,72W auf. An dieser Stelle scheinen die Beschädigungen keinen Unterschied zu bewirken. Bei der Betrachtung des EL-Bilds von Modul ID20240259 handelt es sich hauptsächlich um feine dunkel dargestellte Linien. Diese sind eher als Kratzer anstatt durchgehende Risse oder Brüche einzuführen. Daher könnte der Stromfluss bis zu diesem Fehlerbild unbeeinflusst bleiben. Es ist allerdings davon auszugehen, dass solche Beschädigungen mit der Zeit oder mit folgenden Beanspruchungen wachsen können. Dann würden sich die Folgeerscheinungen eventuell anders auf die Stromstärke und damit Leistung des Moduls ausüben.

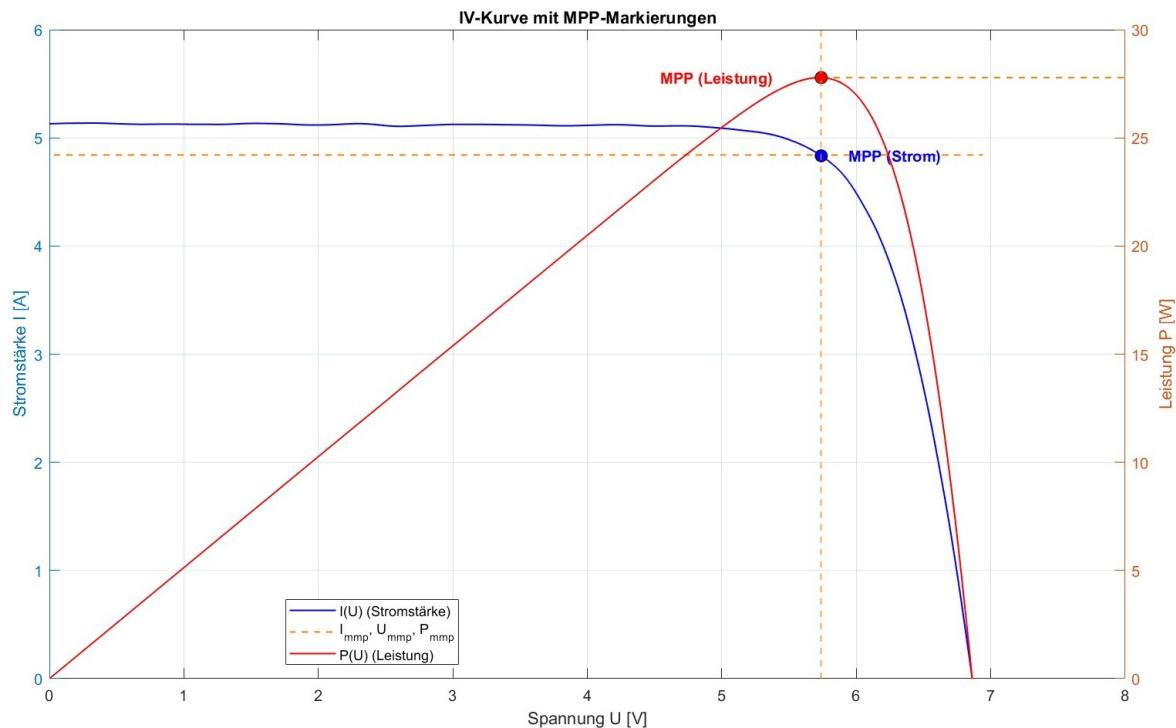


Abbildung 62: I-U-Kennlinie und P-U-Kennlinie des Moduls ID20240158 (ECA1) mit geringen Fehlern aus der EL-Aufnahme

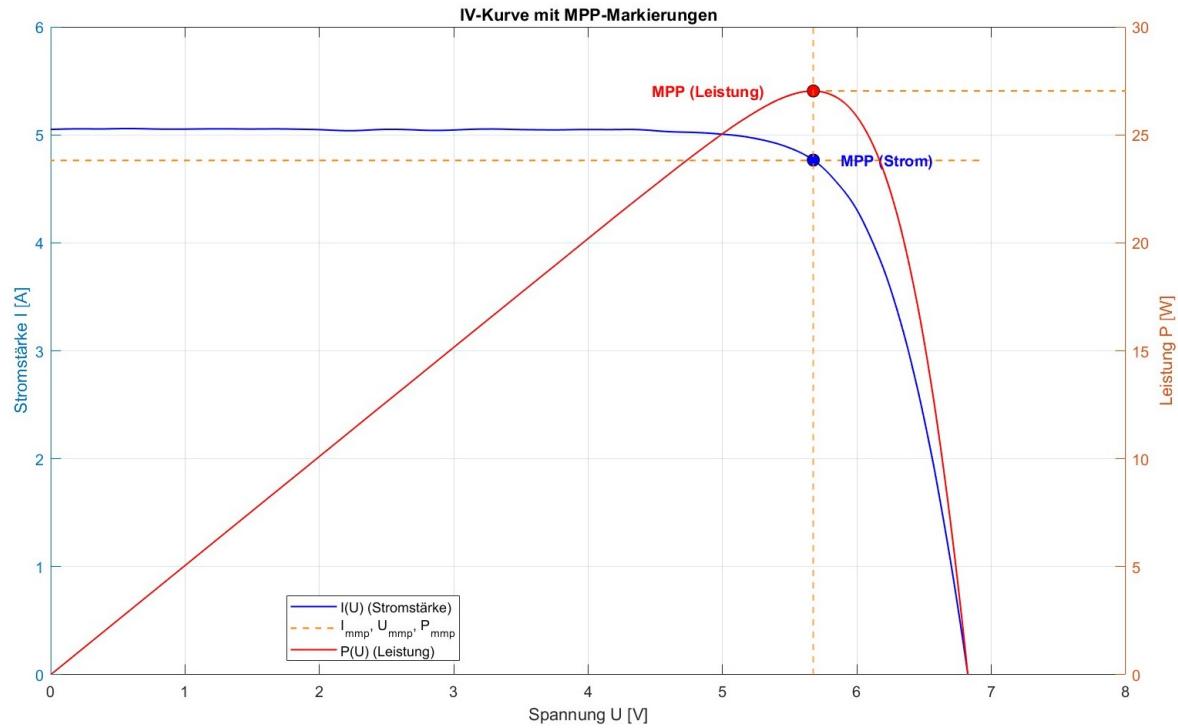


Abbildung 63: I-U-Kennlinie und P-U-Kennlinie des Moduls ID20240168 (ECA1) mit verstärkten Fehlern aus der EL-Aufnahme

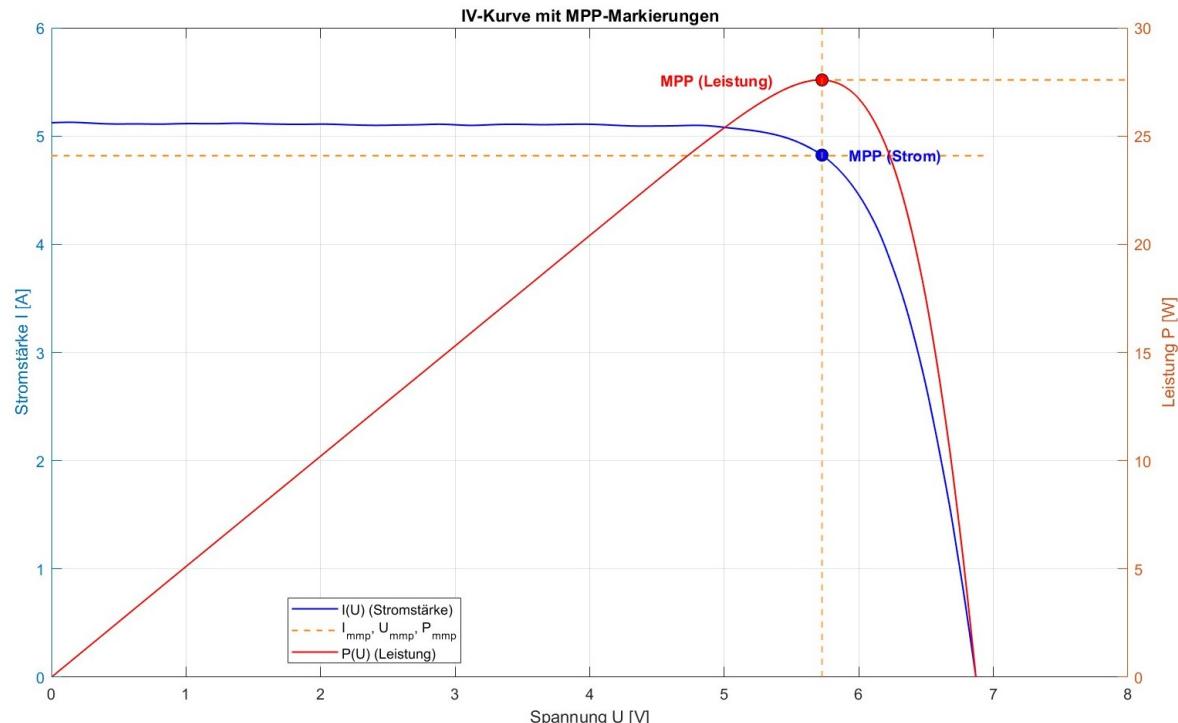


Abbildung 64: I-U-Kennlinie und P-U-Kennlinie des Moduls ID20240260 (ECA2) mit geringen Fehlern aus der EL-Aufnahme

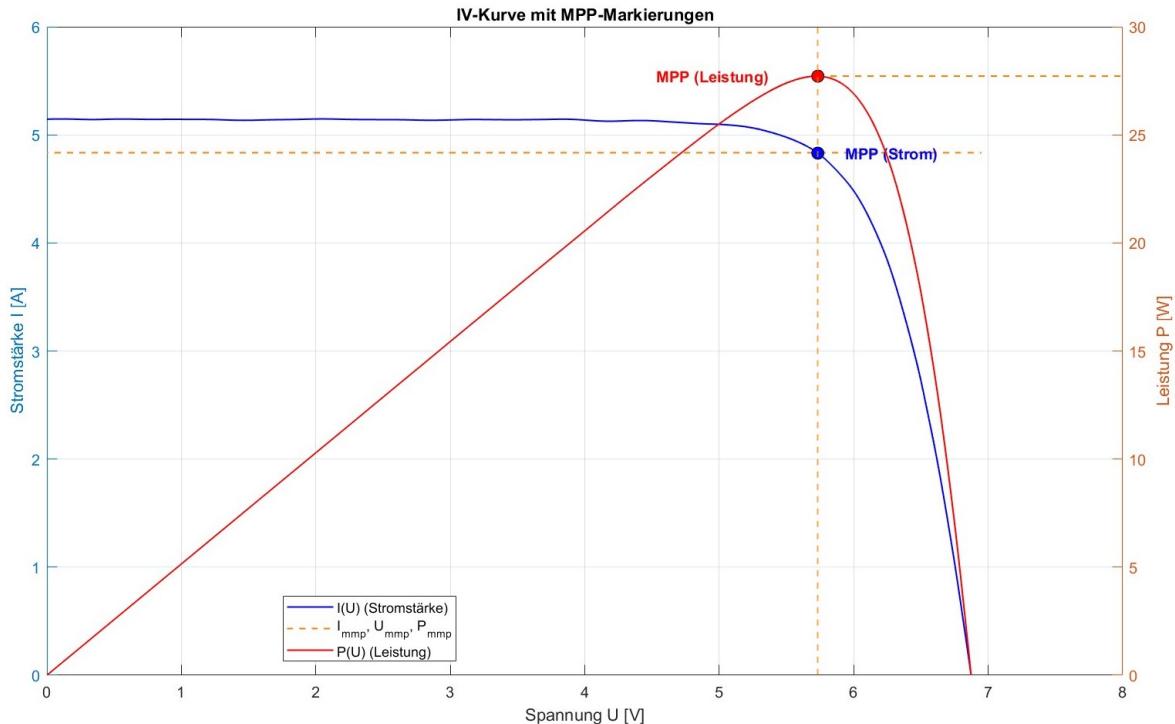


Abbildung 65: I-U-Kennlinie und P-U-Kennlinie des Moduls ID20240259 (ECA2) mit verstärkten Fehlern aus der EL-Aufnahme

Die Berechnungen des Füllfaktors und des Wirkungsgrads des Moduls erfolgen nach den Gleichungen 1. Die Module die mit der gelöteten Verschaltung gefertigt wurden weisen einen niedrigeren Wirkungsgrad auf als die meisten der ECA Module. Etwas weniger als die Hälfte der ECA1 Module besitzt auch einen geringeren Wirkungsgrad (Tabelle 12). Dabei muss auf die unterschiedliche Fertigung und den Einsatz unterschiedlicher Zellen geachtet werden. Es ist nicht eindeutig auf die Verschaltung zurückzuführen, sondern hängt mit von den Material der Module ab. Die Lot Module erreichen im Schnitt einen Wirkungsgrad von 14,0%. Die ECA Module haben insgesamt einen Wirkungsgrad von 14,9%. Dabei liegt der Wirkungsgrad der ECA1 Module im Schnitt bei 14,8% und bei den ECA2 Modulen bei 15,4%. Die Wirkungsgrade beziehen sich auf die Laminationsfläche. Das Verhältnis fällt bei geringerer Beleuchtungsstärke ähnlich aus. Die Wirkungsgrade sind nur etwas geringer. Die Lot Module weisen einen Wirkungsgrad im Schnitt von 13,2% auf, während die ECA Module einen Wirkungsgrad von 14,1% haben.

Ähnliche Verhältnisse zeichnen sich auf die maximale Leistung ab. Der Vergleich der Modulproben mit den unterschiedlichen Ausführungen der Module ist in Abbildung 66 ersichtlich. Insgesamt zeichnen sich ziemlich konstante Werte in den einzelnen Gruppen ab. Diese Verteilung der maximalen Modulleistung bildet den Zeitpunkt nach der Fertigung ab. Diese maximalen Leistungspunkte können nach den Beanspruchungen des Moduls deutlich beeinträchtigt werden.

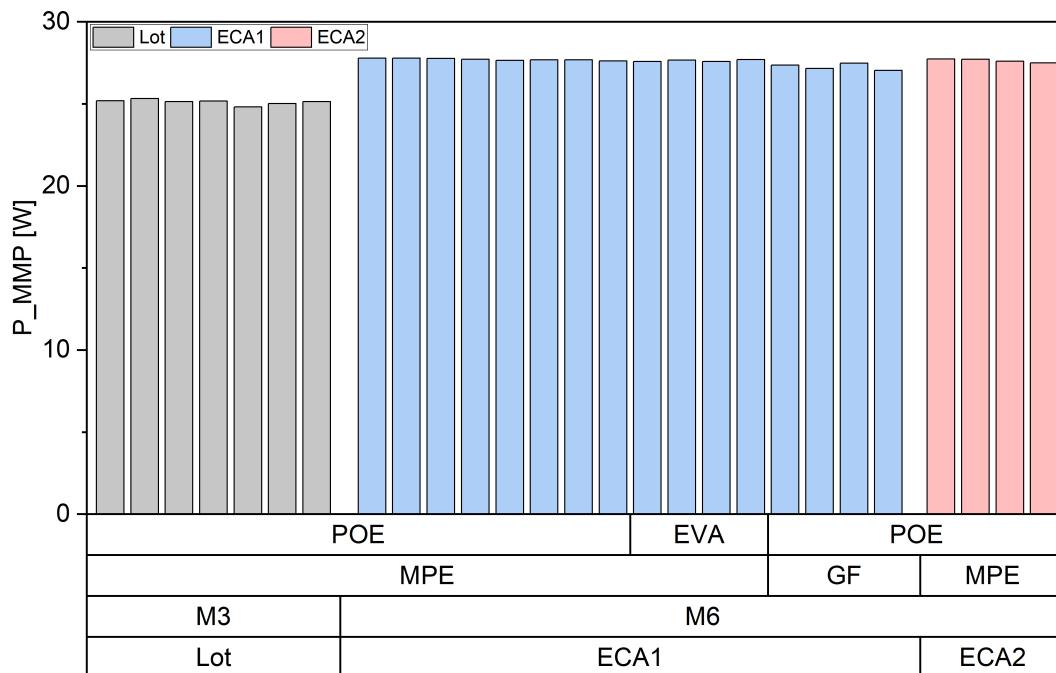


Abbildung 66: Übersicht der maximalen Modulleistung direkt nach der Fertigung der Fassadenmodule;  
Unterteilung der Proben in Verkapselungsmaterial (oben), Zwischenlage, Zellformat  
und Stringverschaltung (unten)

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Das grundlegende Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung und Bewertung von bleifreien Photovoltaik-Fassadenmodulen hinsichtlich der Zuverlässigkeit. Diese bleifreie Herstellung wird mit Leitklebstoffen (ECA) realisiert. In Bezug darauf wird die Fertigung und Bewertung von diesen Fassadenmodulen geplant. Die Charakterisierung des Klebstoffs stellt die Grundlage für die Fertigung dar. Darunter findet als Messmethode eine Dynamische Differenz Kalorimetrie-Messung (DSC) statt. Die Stabilität der Stringverschaltung wird mit Schältests überprüft. Für die Qualitätsbewertung werden Standard-Klimatests nach DIN EN 61730 und IEC 61215 durchgeführt.

Für die Herstellung von Photovoltaik-Modulen werden generell Strings benötigt. Es werden zum Vergleich unterschiedliche Verschaltungsarten untersucht, insbesondere die elektrisch leitfähigen Klebstoffe sowie die gelötete Verbindung. Zwei verschiedene Arten von Klebstoffen, leitender Epoxidklebstoff und acrylatbasierter Klebstoff, werden verwendet. Die Klebstoffcharakterisierung erfolgt durch DSC-Messung und Schältests. Aus der DSC-Messung werden die Temperaturen für die Vernetzung der Klebstoffe ermittelt. Die Klebstoffe weisen unterschiedliche Temperaturverhalten auf. Der acrylatbasierte Klebstoff benötigt deutliche geringere Temperaturen, um eine Vernetzungsreaktion abzuschließen. Mit den Schältests werden die Schälfestigkeiten der Verschaltung von Strings kontrolliert. Zusammen auf Basis dieser Ergebnisse können die optimalen Temperaturparameter für die beiden Leitklebstoffe und für die Stringherstellung ermittelt werden. Damit wird der Prozess der Klebstoffaushärtung im Stringer angepasst. Der optimierte Prozess stellt die Produktionsgrundlage von verbesserten Strings dar. In den Schältests, die die Haftkräfte der Klebstoffe zu Solarzelle und Verbinde überprüfen, zeigte sich, dass die Lötverbindungen eine deutlich höhere Schälfestigkeit aufwiesen als die ECA-Klebstoffe.

Die Herstellung der Fassadenmodule erfolgt durch Laminieren der Photovoltaikzellen mit einer spezifischen Schichtabfolge. Es werden unterschiedliche Materialkombinationen verwendet, um ein Materialversagen bei den Klimatests vergleichen zu können. Besonders das Dehnungsverhalten der verschiedenen Materialien wird analysiert. Nach der Fertigung werden die Module mittels EL-Bildgebung und I-U-Kennlinien (Initialtests) auf Defekte überprüft, wobei Beschädigungen wie Risse und Kontaktprobleme sichtbar wurden. Danach erfolgt die Bewitterung der Module, damit die beste Materialkombination für die Anwendung als Aluminium-Fassadenmodul extrahiert werden kann. Die Auswertung der Initialtests verdeutlicht, dass Beschädigungen den Stromfluss behindern und dadurch die elektrische Leistung mindern können. Besonders auffällig sind die Unterschiede zwischen intakten und beschädigten Modulen sowie die unterschiedlichen Auswirkungen der Verschaltungsarten auf die Modulleistung. Die I-U-Kennlinien wurden unter Standard-Testbedingungen (STC) aufgenommen.

In der Fortsetzung dieser Arbeit sind die Modultests mit zyklischen Belastungen notwendig. Durch diese Beanspruchungen können weitere Auswirkungen betrachtet werden. Auf Grundlage des Versuchsplans erfolgt als nächster Schritt die Prüfungen der Fassadenmodule nach der Norm DIN EN 61730 mit den gewählten Sequenzen B, D und E. Dabei werden die unterschiedlichen Modulkomponenten unter anderem Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen ausgesetzt. Danach erfolgen erneut die Tests, die bereits nach der Fertigung stattfanden. Das liefert einen Vergleich von Ausgangs- und Endzustand der Fassadenmodule. Insofern dieser Vergleich sich als zuverlässiges Ergebnis bewährt, ist eine industrielle Umsetzung der bleifreien Produktion dieser Fassadenmodule möglich. Mit den Untersuchungen der Arbeit ist eine Basis der fehlerfreien Produktion der Fassadenmodule geschaffen worden.

# Abbildungsverzeichnis

1	Statistischer Verbrauch und Verteilung verschiedener Primärenergien . . . . .	1
2	Prognostische Weltmarktanteil der verschiedenen Zellverbindungs-Technologien	3
3	Aufbau und Funktionsweise einer Solarzelle . . . . .	5
4	Aufbaustruktur eines Standard PV-Moduls und Darstellung installierter PV-Module . . . . .	6
5	Verschiedene Möglichkeiten und Ausführungen von gebäudeintegrierten PV-Modulen . . . . .	6
6	Schichtweiser Aufbau eines halbtransparenten BIPV-Modul . . . . .	7
7	Darstellung von Strings mit verschiedener Verbinder Anzahl . . . . .	8
8	Produktionskette und Arbeitsschritte der Herstellung eines typischen PV-Moduls	11
9	Beispiel einer IU- und PU-Kennlinie mit Maximum Power Point (MPP) . . . . .	14
10	Temperatur-Zeit-Zyklus einer Standard TC-Prüfung . . . . .	16
11	Temperatur- und Feuchtigkeitszyklus einer Standard HF-Prüfung . . . . .	17
12	Versuchsschema einer Wärmestrom-Differenz-Kalorimetrie . . . . .	20
13	Reaktionsbereiche einer DSC-Kurve . . . . .	20
14	Grafische Darstellung und Kennwerte einer DSC-Kurve . . . . .	22
15	Versuchsschema der Schälprüfung nach DIN EN ISO 8510-2 . . . . .	24
16	Schälprüfungsschema einer mit Leitklebstoff verschalteten Solarzelle (IEC TS 62788) . . . . .	24
17	Beispiel einer aufgezeichneten Schälkraft-Weg-Kurve . . . . .	25
18	Schematische Darstellung des Versuchsplans . . . . .	28
19	ECA Solarzelle . . . . .	30
20	Lot Solarzelle . . . . .	31
21	Schematische Darstellung des schichtweisen Aufbaus der Fassadenmodule . . . . .	31
22	Prozessaufteilung und Anordnung der Prozessmodule . . . . .	33
23	Teamtechnik STRINGER TT Lab i8 ECA . . . . .	34
24	Seitenansicht des Rundschalttischs (links) und Druckeinheit mit Sieb und aufgetragenen ECA in geflutetem Zustand (rechts) . . . . .	35
25	Schematische Darstellung der Taktanzahl pro Heizmodul . . . . .	36
26	Seitenansicht der Heizmodule (2-5) ohne Niederhalter (links) und Seitenansicht der Heizmodule (6-7) mit der Niederhalterentnahme (rechts); mit der Orientierung von rechts nach links . . . . .	36
27	Temperatur-Zeit-Diagramm der theoretischen Solltemperatur für die Heizmodule bezogen auf ECA1 und ECA2 . . . . .	37
28	Ende des Stringtransportbandes bzw. Stringentnahme mit Stringwender (links), Detailansicht der Sauggreifer (rechts) . . . . .	37
29	Arbeitsschritte für die Vorbereitung der Lamination . . . . .	38
30	Meier Solutions GmbH - Vakuum-Laminator Icolam 28/26 mit Fassadenmodulen (links) und vorbereitete Fassadenmodule für die Lamination (rechts) . . . . .	39
31	Laminationsprozess Vakuumdruck-Zeit-Diagramm . . . . .	39
32	Innenansicht der Anschlussdose und Montage mit Silikon . . . . .	40
33	Aufgezeichneter Temperatur-Zeitverlauf des Aufheizvorgangs in der Ofenkammer während der DSC-Messung . . . . .	41
34	NETZSCH Messgerät DSC 204 F1 Phoenix (links) und Probenmagazin (rechts)	42
35	Versuchsaufbau eines Schältests . . . . .	43
36	Klimakammer mit Anordnung von PV-Modulen aus einem Versuchsbeispiel . . . . .	45
37	Übersicht zu den Prüfsequenzen, Auszug aus DIN EN 61730 . . . . .	46

38	Temperatur-Zeitverlauf der ECA1/ VX-Proben . . . . .	48
39	Temperatur-Zeitverlauf der ECA2/ TX-Proben . . . . .	49
40	Vorderseite eines Strings mit 10 Halbzellen (Probe T5) . . . . .	50
41	Rückseite eines Strings mit 10 Halbzellen (Probe T5) . . . . .	50
42	Vergleich der Temperatur-Zeitverläufe der Stringfertigung von ECA1 und ECA2 mit dargestellter Temperaturdifferenz . . . . .	51
43	Vergleich zwischen schematischer (links) und realer (rechts) Darstellung der Fassadenmodule . . . . .	52
44	DSC-Kurven der verschiedenen Proben von ECA1 und ECA2 . . . . .	54
45	Vergleich der Peak- und Onsettemperaturen der unterschiedlichen Proben aus der DSC-Messung . . . . .	54
46	Gegenüberstellung der extrapolierten Fläche als Enthalpieänderung der unterschiedlichen Proben aus der DSC-Messung . . . . .	55
47	DSC-Kurve mit dynamischen und isothermen Bereich und Temperaturverlauf einer isothermen Messung von ECA2 Probe 1 . . . . .	56
48	DSC-Kurve mit dynamischen und isothermen Bereich und Temperaturverlauf einer isothermen Messung von ECA2 Probe 7 mit Vernetzung im dynamischen Bereich . . . . .	57
49	DSC-Kurven der isothermen Bereiche von ECA2 . . . . .	58
50	Histogramm der Verteilung der Häufigkeit der Schälfestigkeit von ECA2-T4 bezogen auf die Rückseite . . . . .	59
51	Histogramm der Verteilung der Häufigkeit der Schälfestigkeit von ECA2-T4 bezogen auf die Vorderseite . . . . .	60
52	Kraft-Zeitkurve der Probe ECA2-T9 rückseitig, automatisch aufgezeichnet . .	61
53	Selektiv erzeugtes Histogramm aus der aufgezeichneten Kraft-Zeitkurve und Verteilung der Häufigkeit der Kraft von ECA2-T9 Rückseite . . . . .	61
54	Verteilung der Schälfestigkeiten auf den Rückseiten, Unterscheidung nach der Verschaltungsart der Proben . . . . .	62
55	Verteilung der Schälfestigkeiten auf den Vorderseiten, Unterscheidung nach der Verschaltungsart der Proben . . . . .	63
56	EL-Aufnahme des Moduls ID20240150 bzw. eines gelöteten Strings mit geringem Fehlerbild . . . . .	65
57	EL-Aufnahme des Moduls ID20240149 bzw. eines gelöteten Strings mit verstärktem Fehlerbild . . . . .	65
58	EL-Aufnahme des Moduls ID20240158 bzw. eines mit ECA1 verschalteten Strings mit geringem Fehlerbild . . . . .	66
59	EL-Aufnahme des Moduls ID20240168 bzw. eines mit ECA1 verschalteten Strings mit verstärktem Fehlerbild . . . . .	66
60	I-U-Kennlinie und P-U-Kennlinie des Moduls ID20240150 (Lot) mit geringen Fehlern aus der EL-Aufnahme . . . . .	69
61	I-U-Kennlinie und P-U-Kennlinie des Moduls ID20240149 (Lot) mit verstärkten Fehlern aus der EL-Aufnahme . . . . .	69
62	I-U-Kennlinie und P-U-Kennlinie des Moduls ID20240158 (ECA1) mit geringen Fehlern aus der EL-Aufnahme . . . . .	70
63	I-U-Kennlinie und P-U-Kennlinie des Moduls ID20240168 (ECA1) mit verstärkten Fehlern aus der EL-Aufnahme . . . . .	71
64	I-U-Kennlinie und P-U-Kennlinie des Moduls ID20240260 (ECA2) mit geringen Fehlern aus der EL-Aufnahme . . . . .	71
65	I-U-Kennlinie und P-U-Kennlinie des Moduls ID20240259 (ECA2) mit verstärkten Fehlern aus der EL-Aufnahme . . . . .	72

66	Übersicht der maximalen Modulleistung direkt nach der Fertigung der Fassadenmodule; Unterteilung der Proben in Verkapselungsmaterial (oben), Zwischenlage, Zellformat und Stringverschaltung (unten) . . . . .	73
67	Ermittlung der Enthalpieänderung von ECA2 alt über die Integration der Kurvenfläche mit interpolierter Basislinie . . . . .	84
68	Ermittlung der Enthalpieänderung von ECA2 Mix über die Integration der Kurvenfläche mit interpolierter Basislinie . . . . .	84
69	Ermittlung der Enthalpieänderung von ECA2 neu über die Integration der Kurvenfläche mit interpolierter Basislinie . . . . .	85
70	Ermittlung der Enthalpieänderung von ECA1 alt über die Integration der Kurvenfläche mit interpolierter Basislinie . . . . .	85
71	Ermittlung der Enthalpieänderung von ECA1 neu über die Integration der Kurvenfläche mit interpolierter Basislinie . . . . .	86
72	Vergleich der maximalen Leistung und des Füllfaktors der Fassadenmodule nach der Fertigung . . . . .	89
73	Vergleich des Kurzschlusstroms und der Leerlaufspannung der Fassadenmodule nach der Fertigung . . . . .	89

# Tabellenverzeichnis

1	ECA Eigenschaften im flüssigen Zustand . . . . .	29
2	ECA Eigenschaften im gehärteten Zustand . . . . .	29
3	Probentabelle . . . . .	32
4	DSC Standard-Messung Probentabelle . . . . .	42
5	DSC isotherme Messung Probentabelle . . . . .	42
6	Proben für die Schältestversuche . . . . .	43
7	Aufteilung von Stückzahlen der Proben auf die Anwendung von Modultests .	44
8	Übersicht der Modulzuordnung nach der Fertigung . . . . .	53
9	Darstellung der Schälfestigkeiten auf den Rückseiten der gesamten Proben anhand des Verfahrens (automatischer oder manueller Kraftablesung) und Mittlung der Ergebnisse . . . . .	64
10	Darstellung der Schälfestigkeiten auf den Vorderseiten der gesamten Proben anhand des Verfahrens (automatischer oder manueller Kraftablesung) und Mittlung der Ergebnisse . . . . .	64
11	Auswertung der EL-Aufnahmen der verschiedenen Module und Quantifizierung der Fehler . . . . .	67
12	Zusammenfassung der Ergebnisse aus der I-U-Kennlinienbestimmung (STC) und des Maximum Power Points, Berechnungsergebnisse der Füllfaktoren und Wirkungsgrade der Fassadenmodule . . . . .	87
13	Zusammenfassung der Ergebnisse unter einer Bestrahlungsstärke von $200 \frac{W}{m^2}$ aus den I-U-Kennlinien (STC) und des Maximum Power Points, Berechnungsergebnisse der Füllfaktoren und Wirkungsgrade der Fassadenmodule . . . . .	88

## Literaturverzeichnis

# Literatur

- [1] IEA World Energy Balances database. *Primärenergie- Versorgung*. <https://www.bpb.de/kurz-knapp/zahlen-und-fakten/globalisierung/52741/primaerenergie-versorgung/>. [Online; abgerufen am 27.05.2024]. 2023.
- [2] Konrad Mertens. *Photovoltaik: Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2022.
- [3] Anette Regelous und Jan-Peter Meyn. „Erneuerbare Energien-eine physikalische Be trachtung“. In: *PhyDid B-Didaktik der Physik-Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung* (2011).
- [4] Clemens Boekholt. *Erneuerbare Energien im Überblick: Wie groß ist ihr Anteil? Was sind die Vor- und Nachteile?* <https://www.co2online.de/klima-schuetzen/energiewende/erneuerbare-energien/>. [Online; abgerufen am 05.08.2024]. 2018.
- [5] co2 online. *Was ist Photovoltaik? Definition und Funktion im Überblick*. <https://www.co2online.de/modernisieren-und-bauen/photovoltaik/was-ist-photovoltaik-faq/>. [Online; abgerufen am 05.08.2024]. 2021.
- [6] Nallapaneni Manoj Kumar u. a. „BIPV power plants and policy recommendatons“. In: *2018 4th International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES)*. IEEE. 2018, S. 652–655.
- [7] VDMA Photovoltaic Equipment. „International technology roadmap for photovoltaic (ITRPV)“. In: *Results 2023* 15 (2024).
- [8] Harry Wirth, Karl-Anders Weiß und Cornelia Wiesmeier. *Photovoltaic modules: Technology and reliability*. Walter de Gruyter GmbH & Co KG, 2016.
- [9] Veronika Nikitina u. a. „High-Speed characterization of electrically conductive adhesives for industrial SHJ solar cell interconnection“. In: *AIP Conference Proceedings*. Bd. 2709. 1. AIP Publishing. 2022.
- [10] Volker Quaschning. *Regenerative Energiesysteme: Technologie-Berechnung-Klimaschutz*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2023.
- [11] Heckert Solar. *SZEUS 1.0 N-Type Bifaziales Glas-Glas-Modul 445WP*. Produktdatenblatt: <https://www.heckertsolar.com/>. [Online; abgerufen am 15.11.2024]. -.
- [12] K Sudhakar, M Samykano, V Jayaseelan u. a. „BIPV Market growth: SWOT analysis and favorable factors“. In: *2018 4th International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES)*. IEEE. 2018, S. 412–415.
- [13] KE Park u. a. „Analysis of thermal and electrical performance of semi-transparent photovoltaic (PV) module“. In: *Energy* 35.6 (2010), S. 2681–2687.
- [14] Klaus Feldmann und Volker Schöppner. *Handbuch Fügen, Handhaben und Montieren*. Bd. 5. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2013.
- [15] AMETEK Engineered Interconnect und Packaging. *Data Sheet 63 Tin-37 Lead*. <https://www.ametekinterconnect.com/>. [Online; abgerufen am 10.09.2023].
- [16] IEC 61730-2:2016-08, *Photovoltaic (PV) module safety qualification Part 2: Requirements for testing*. Norm. Aug. 2016.
- [17] IEC 61215-2:2016-03, *Terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval – Part 2: Test procedures*. Norm. 2016.
- [18] Achim Frick und Claudia Stern. *DSC-Prüfung in der Anwendung*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2013.

- [19] Gottfried W Ehrenstein. *Thermische Analyse: Brandprüfung, Wärme-und Temperaturleitfähigkeit, DSC, DMA, TMA*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2020.
- [20] DIN-EN-ISO-11357-1 *Kunststoffe - Dynamische Differenz-Thermoanalyse DSC - Teil 1 Allgemeine Grundlagen*. Norm. Feb. 2017.
- [21] DIN-EN-ISO-11357-5 *Kunststoffe - Dynamische Differenz-Thermoanalyse DSC - Teil 5 Bestimmung von charakteristischen Reaktionstemperaturen und -zeiten, Reaktionsenthalpie und Umsatz*. Norm. Juli 2014.
- [22] DIN EN ISO 8510-2 *Klebstoffe - Schälprüfung für flexibel/starr geklebte Proben - Teil 2: 180-Grad-Schälversuch*. Norm. 2010.
- [23] IEC TS 62788-8-1 *Measurement procedures for materials used in photovoltaic modules - Part 8-1 Electrically conductive Adhesives - Measurement of material properties*. Norm. Jan. 2022.
- [24] Datenblatt ECA1. Technisches Datenblatt. Jan. 2017.
- [25] Datenblatt ECA2. Technisches Datenblatt. Juni 2018.
- [26] Betriebsanleitung - STRINGER TT Lab i8 ECA - F22ST9001 - Originalbetriebsanleitung V1.0. Instruction Manual. Feb. 2023.
- [27] teamtechnik. *STRINGER TT4000 i8 ECA, ADVANCED ADHESIVE TECHNOLOGY FOR HIGH PERFORMANCE CRYSTALLINE SOLAR CELLS*. <https://www.teamtechnik.com/en/new-energy/stringer-systems/solar-stringer-tt4000i8eca>. [Online; abgerufen am 12.11.2024]. -.

## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre hiermit an Eides statt, die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Zuhilfenahme unzulässiger Hilfsmittel angefertigt zu haben. Wörtliche oder dem Sinne nach übernommene Ausführungen sind gekennzeichnet, sodass Missverständnisse über die geistige Urheberschaft ausgeschlossen sind. Diese Arbeit war bisher noch nicht Bestandteil einer Studien- oder Prüfungsleistung in gleicher oder ähnlicher Fassung.

---

Merseburg, den 14. Februar

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei allen Personen bedanken, die mich während der Erstellung dieser Bachelorarbeit unterstützt haben.

Mein Dank gilt meinem Betreuer Prof. Dr. Christoph Sammler, der mir während der gesamten Bearbeitungszeit mit wertvollen Anregungen und konstruktivem Feedback zur Seite stand. Zudem danke ich insbesondere meinem fachlichen Betreuer Dipl.-Ing. Ringo Köpge, der nicht nur das interessante Thema und die facettenreiche Aufgabenstellung dieser Arbeit entwickelt, sondern mich auch mit wissenschaftlicher Expertise begleitet und mir bedeutende Forschungsmöglichkeiten am Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik eröffnet hat.

Ein weiterer Dank gebührt dem gesamten Team der Gruppe „Komponenten und Fertigung von PV-Modulen“, das mich während meiner Arbeit freundlich aufgenommen sowie bei der experimentellen Durchführung und Auswertung unterstützt hat. Ebenso möchte ich mich bei dem Team der Gruppe „Materialanalytik“ bedanken, das durch ihre wertvolle Zuarbeit entscheidend zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat. Mein Dank gilt auch den gesamten Kolleginnen und Kollegen des Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik und des Fraunhofer-Instituts für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen, die mir die Möglichkeit gegeben haben, meine Versuche in diesem Umfeld durchzuführen. Besonders hervorheben möchte ich meine studentischen Kolleginnen und Kollegen Till, Sophia, Sarah, Theresa und Paul, die mich über verschiedene Phasen hinweg begleitet und durch ihre wertvolle Hilfestellung maßgeblich unterstützt haben.

Schließlich möchte ich meiner Familie und meinen Freunden danken. Mein tiefster Dank gilt meinen Eltern für ihre unermüdliche Motivation sowie meinen Großeltern, die mich nicht nur beständig ermutigt, sondern auch mit ihrer Erfahrung unterstützt haben. Ebenso danke ich meinen Freunden sowie Familie Fabian und Franzi, die mich während des Schreibprozesses begleitet und mir in vielen Momenten mit Rat und Tat zur Seite gestanden haben.

Ohne diese Unterstützung wäre die Entstehung dieser Arbeit in dieser Form nicht möglich gewesen. Darüber hinaus bin ich für alle während dieser Zeit gesammelten Erfahrungen dankbar, die mich sowohl fachlich als auch persönlich weiterentwickelt haben.

## Anlagenverzeichnis

<b>Anlage</b>	<b>Inhalt</b>	<b>Seite</b>
I	Messdaten DSC	84
II	I-U-Kennlinien (STC)	87

## Anlagen

### Anhang 1: Messdaten DSC

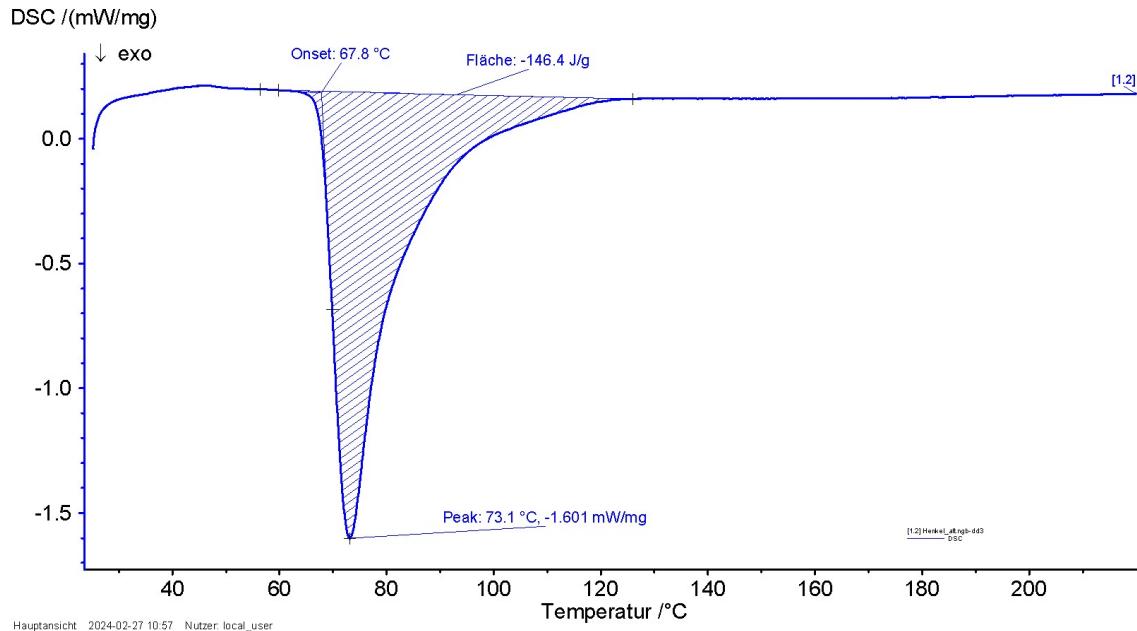


Abbildung 67: Ermittlung der Enthalpieänderung von ECA2 alt über die Integration der Kurvenfläche mit interpolierter Basislinie

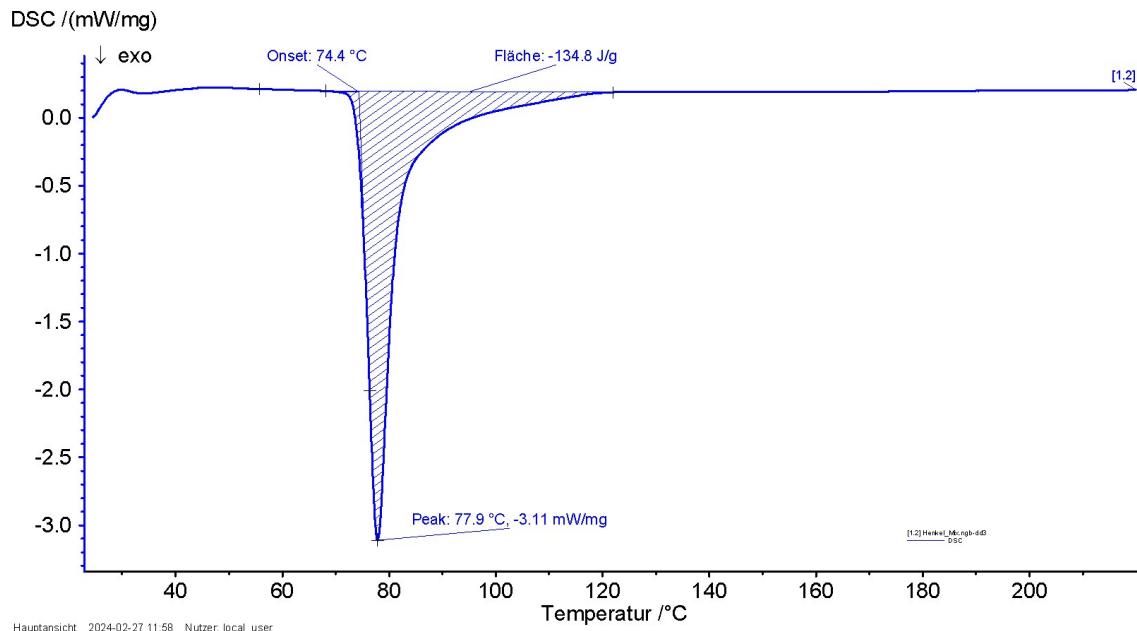


Abbildung 68: Ermittlung der Enthalpieänderung von ECA2 Mix über die Integration der Kurvenfläche mit interpolierter Basislinie

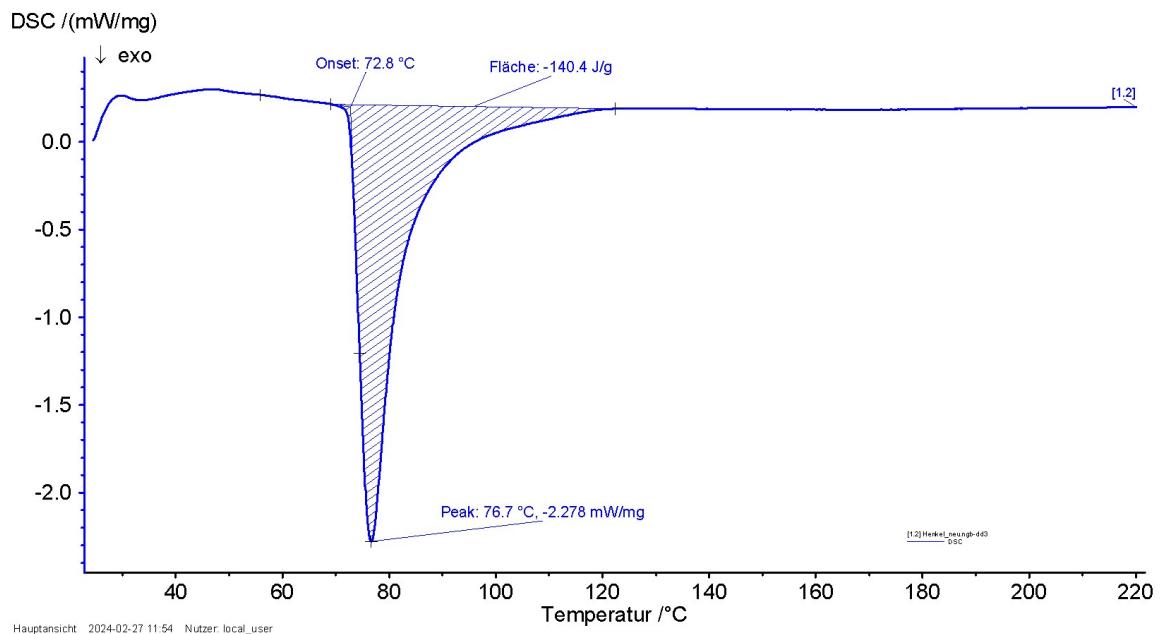


Abbildung 69: Ermittlung der Enthalpieänderung von ECA2 neu über die Integration der Kurvenfläche mit interpolierter Basislinie

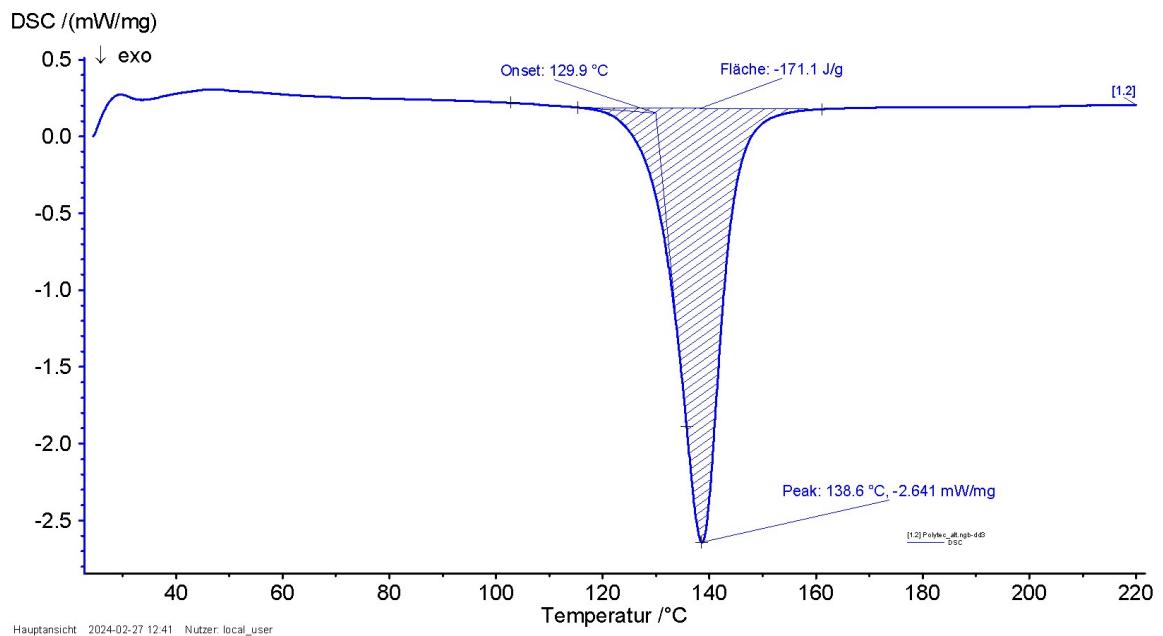


Abbildung 70: Ermittlung der Enthalpieänderung von ECA1 alt über die Integration der Kurvenfläche mit interpolierter Basislinie

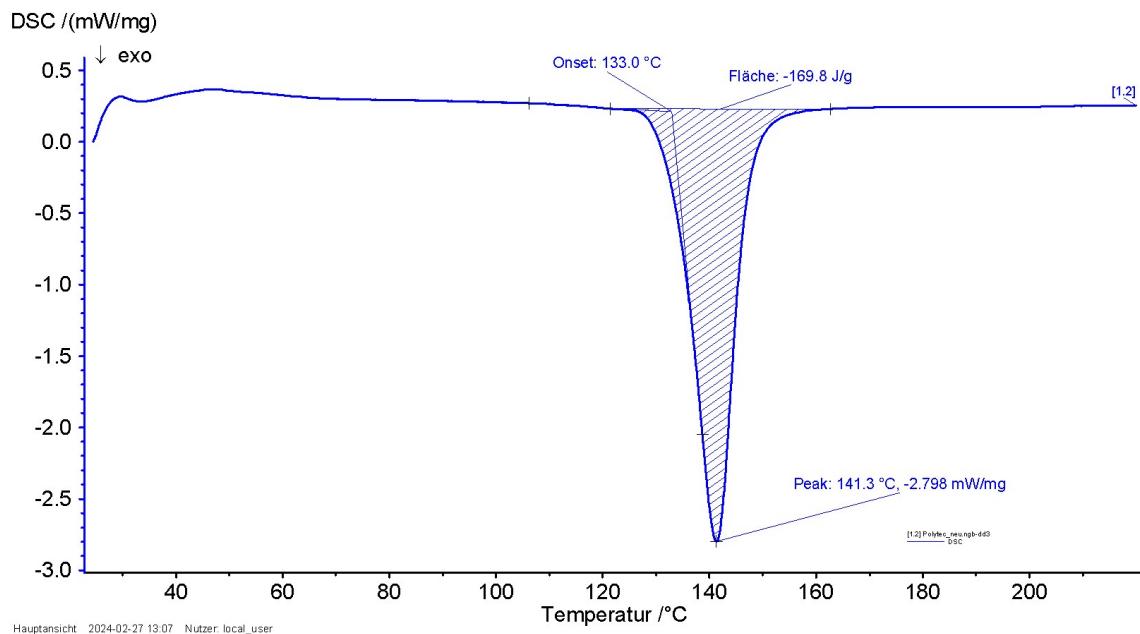


Abbildung 71: Ermittlung der Enthalpieänderung von ECA1 neu über die Integration der Kurvenfläche mit interpolierter Basislinie

## Anhang 2: I-U-Kennlinien (STC)

Tabelle 12: Zusammenfassung der Ergebnisse aus der I-U-Kennlinienbestimmung (STC) und des Maximum Power Points, Berechnungsergebnisse der Füllfaktoren und Wirkungsgrade der Fassadenmodule

CellIDStr	Tcell [°C]	Isc [A]	Impp [A]	Umpp [V]	Pmpp [W]	Uoc [V]	FF	
CSP-S-id20240149	25,55	4,70	4,45	5,66	25,18	6,78	78,96	13,98%
CSP-S-id20240150	25,57	4,72	4,47	5,66	25,31	6,79	79,01	13,99%
CSP-S-id20240151	25,46	4,69	4,45	5,65	25,14	6,78	79,04	14,06%
CSP-S-id20240152	25,52	4,71	4,45	5,65	25,16	6,79	78,74	14,06%
CSP-S-id20240154	25,25	4,72	4,44	5,58	24,81	6,79	77,33	13,97%
CSP-S-id20240155	25,49	-4,68	-4,44	-5,64	25,02	-6,77	79,04	13,97%
CSP-S-id20240156	25,68	4,70	4,46	5,64	25,13	6,78	78,87	13,98%
CSP-S-id20240157	25,40	5,14	4,84	5,74	27,78	6,87	78,60	13,98%
CSP-S-id20240158	25,71	5,13	4,84	5,74	27,79	6,88	78,83	13,78%
CSP-S-id20240159	25,14	5,12	4,84	5,74	27,77	6,88	78,92	13,79%
CSP-S-id20240160	25,20	5,13	4,83	5,74	27,72	6,87	78,65	13,89%
CSP-S-id20240161	25,71	5,13	4,83	5,72	27,64	6,87	78,37	13,90%
CSP-S-id20240162	25,25	5,14	4,83	5,73	27,68	6,87	78,41	13,96%
CSP-S-id20240163	25,27	5,12	4,83	5,73	27,68	6,88	78,61	13,96%
CSP-S-id20240164	25,32	5,13	4,83	5,72	27,61	6,88	78,33	15,44%
CSP-S-id20240165	25,74	5,06	4,77	5,73	27,36	6,88	78,54	15,43%
CSP-S-id20240166	25,58	5,05	4,76	5,71	27,16	6,88	78,14	15,44%
CSP-S-id20240167	25,43	5,09	4,80	5,73	27,48	6,88	78,54	15,44%
CSP-S-id20240168	25,48	5,05	4,76	5,68	27,03	6,83	78,32	15,43%
CSP-S-id20240169	25,12	5,13	4,83	5,71	27,58	6,87	78,30	15,43%
CSP-S-id20240170	25,13	5,12	4,84	5,71	27,66	6,87	78,58	15,40%
CSP-S-id20240171	25,45	5,12	4,81	5,73	27,58	6,87	78,46	15,40%
CSP-S-id20240172	25,42	5,13	4,84	5,72	27,70	6,87	78,63	15,36%
CSP-S-id20240258	25,36	5,12	4,83	5,74	27,73	6,88	78,73	15,36%
CSP-S-id20240259	25,50	5,14	4,83	5,73	27,72	6,88	78,31	15,36%
CSP-S-id20240260	25,51	5,11	4,82	5,73	27,59	6,88	78,47	15,37%
CSP-S-id20240261	25,64	5,11	4,82	5,70	27,50	6,88	78,23	15,38%

Tabelle 13: Zusammenfassung der Ergebnisse unter einer Bestrahlungsstärke von  $200 \frac{W}{m^2}$  aus den I-U-Kennlinien (STC) und des Maximum Power Points, Berechnungsergebnisse der Füllfaktoren und Wirkungsgrade der Fassadenmodule

<b>CellIDStr</b>	<b>Tcell [°C]</b>	<b>Isc [A]</b>	<b>Imp [A]</b>	<b>Umpp [V]</b>	<b>Pmpp [W]</b>	<b>Uoc [V]</b>	<b>FF</b>	
CSP-S-id20240149	25,55	0,94	0,88	5,43	4,76	6,33	80,33	13,20%
CSP-S-id20240150	25,57	0,94	0,89	5,41	4,80	6,34	80,67	13,22%
CSP-S-id20240151	25,46	0,93	0,88	5,42	4,76	6,33	80,42	13,32%
CSP-S-id20240152	25,52	0,94	0,88	5,40	4,76	6,33	80,21	13,33%
CSP-S-id20240154	25,25	0,94	0,88	5,39	4,73	6,34	79,38	13,19%
CSP-S-id20240155	25,49	-0,93	-0,88	-5,42	4,75	-5,86	86,95	13,21%
CSP-S-id20240156	25,68	0,93	0,88	5,41	4,77	6,33	80,63	13,20%
CSP-S-id20240157	25,40	1,03	0,96	5,51	5,27	6,44	79,81	13,22%
CSP-S-id20240158	25,71	1,02	0,95	5,52	5,26	6,44	79,84	13,16%
CSP-S-id20240159	25,14	1,02	0,95	5,52	5,26	6,44	79,93	13,14%
CSP-S-id20240160	25,20	1,02	0,95	5,51	5,23	6,44	79,41	13,20%
CSP-S-id20240161	25,71	1,03	0,96	5,47	5,22	6,43	79,21	13,18%
CSP-S-id20240162	25,25	1,03	0,95	5,47	5,21	6,43	78,94	13,22%
CSP-S-id20240163	25,27	1,02	0,95	5,50	5,24	6,44	79,63	13,25%
CSP-S-id20240164	25,32	1,02	0,95	5,48	5,21	6,44	79,05	14,63%
CSP-S-id20240165	25,74	1,01	0,94	5,50	5,18	6,44	79,53	14,64%
CSP-S-id20240166	25,58	1,01	0,94	5,48	5,13	6,44	79,02	14,63%
CSP-S-id20240167	25,43	1,02	0,94	5,50	5,18	6,44	79,14	14,61%
CSP-S-id20240168	25,48	1,01	0,94	5,44	5,11	6,38	79,40	14,62%
CSP-S-id20240169	25,12	1,02	0,95	5,47	5,21	6,42	79,28	14,61%
CSP-S-id20240170	25,13	1,02	0,95	5,48	5,21	6,43	79,26	14,54%
CSP-S-id20240171	25,45	1,02	0,95	5,47	5,21	6,43	79,24	14,53%
CSP-S-id20240172	25,42	1,02	0,96	5,48	5,25	6,43	79,79	14,51%
CSP-S-id20240258	25,36	1,02	0,96	5,49	5,25	6,43	79,72	14,49%
CSP-S-id20240259	25,50	1,03	0,95	5,48	5,21	6,44	78,83	14,51%
CSP-S-id20240260	25,51	1,02	0,95	5,48	5,22	6,43	79,48	14,47%
CSP-S-id20240261	25,64	1,02	0,95	5,49	5,21	6,43	79,26	14,48%

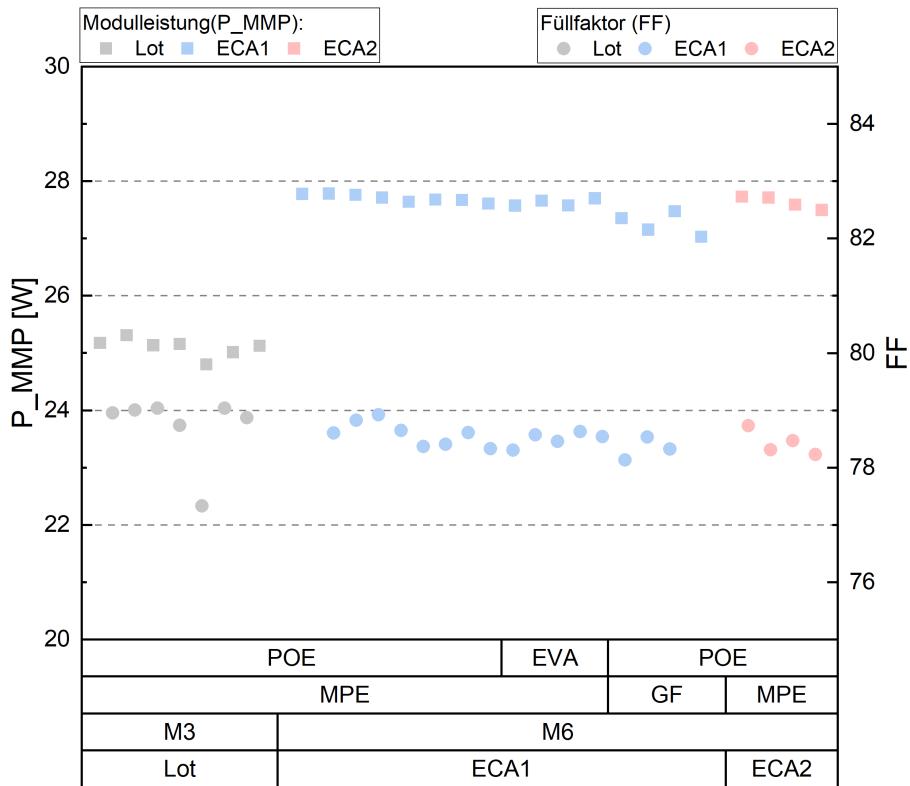


Abbildung 72: Vergleich der maximalen Leistung und des Füllfaktors der Fassadenmodule nach der Fertigung

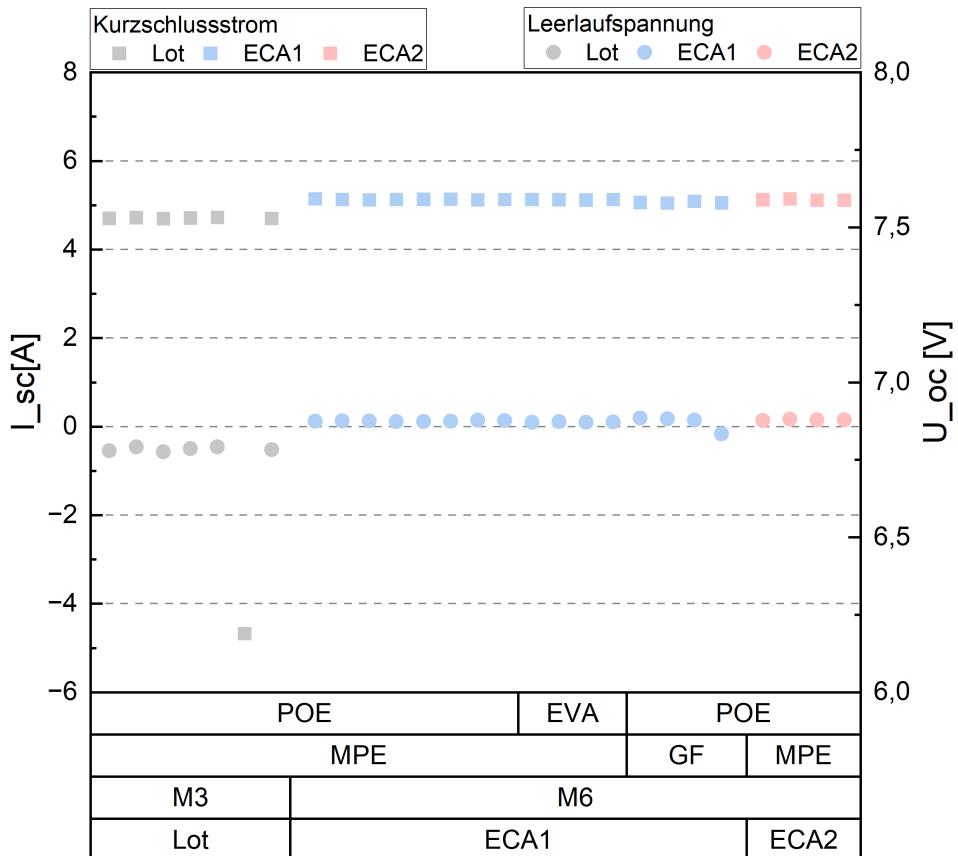


Abbildung 73: Vergleich des Kurzschlusstroms und der Leerlaufspannung der Fassadenmodule nach der Fertigung