

Flachglas Sülzfeld GmbH

**Entwicklung eines innovativen
PV-Moduls auf Basis eines
Standardisoliertes**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 38518/01 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Stephan Witte, Dr. Thomas Schmidt, Milan Marjanovic

Sülzfeld, März 2025

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	6
Abkürzungsverzeichnis	7
Zusammenfassung.....	8
1. Einleitung.....	9
2. Hauptteil	12
2.1 Herstellung des PV-Iso	12
2.1.1 Der geplante Aufbau des Moduls basiert auf einer Standard Isolierglaseinheit.	12
2.1.2 Isolierglas	12
2.1.3 Randverbund.....	12
2.1.4 Solarzellen	13
2.1.5 Elektrischer Anschluss.....	13
2.2 Auswahl geeigneter Klebstoffe für die Verklebung der PV-Zellen mit Glas.....	14
2.2.1 Suche nach geeigneten Klebstoffen	14
2.2.2 Klebeversuche mit den ausgewählten Klebstoffen.....	14
2.2.3 Evaluierung der Klebstoffe	16
2.2.4 Ergebnisse	17
2.3 Auswahl geeigneter Isolationsmöglichkeiten für die elektrischen Verbinder der PV-Zellen zur Durchführung durch den Isolierglasrahmen	17
2.3.1 Notwendigkeit der Isolierung.....	17
2.3.2 Test verschiedener Isolationsmaterialien anhand erster PV-Iso-Scheiben	18
2.3.3 Evaluierung der Isolationsmöglichkeiten	20
2.3.4 Ergebnisse	20
2.4 Anschluss der gebauten PV-Iso-Scheiben mit Standard-Junctionboxen aus dem PV-Modul-Bereich	21
2.4.1 Notwendigkeit einer geeigneten Anschlusslösung	21
2.4.2 Herausforderungen bei der Montage der Standard-Junctionboxen.....	21
2.5 Entwicklung einer eigenen Junctionbox für die PV-Iso-Scheiben.....	23
2.5.1 Entwicklung und Prototyping.....	23
2.5.2 Verbesserte Kabelführung und neue Anschlussstecker	25
2.5.3 Ergebnisse	26
2.6 Arbeiten an weiteren möglichen Lösungen für die elektrische Durchführung der PV-Zellen durch den Isolierglasrahmen.....	26
2.6.1 Herausforderungen der bisherigen elektrischen Durchführung.....	26

2.6.2 Klimabelastungen bei Isolierglasscheiben	27
2.6.3 Integration der elektrischen Durchführung direkt in den Isolierglasrahmen	28
2.6.4 Materialwahl für die neuen Rahmenverbinder	28
2.6.5 Test der Materialeigenschaften und Prototypenentwicklung	29
2.6.6 Erste Prototypen und Optimierungsansätze	30
2.6.7 Integration der Sperrdioden in die Zellmatrix.....	31
2.6.8 Ergebnisse	32
2.6.9 Ausblick	32
2.7 Prüfung der im Projekt hergestellten Module.....	33
2.7.1 Beschreibung des Tests:	33
2.7.2 Trockentest (Isolationsprüfung unter trockenen Bedingungen)	34
2.7.3 Nasstest (Isolationsprüfung unter feuchten Bedingungen).....	34
2.7.4 Bedeutung der Isolationsprüfung	35
2.7.5 Ergebnisse:	35
2.8 Recycling von Solarmodulen.....	36
2.8.1 Herausforderungen und Lösungsansätze.....	36
2.8.2 Zusammensetzung von Solarmodulen.....	37
2.8.3 Technische Herausforderungen	37
2.8.4 Wirtschaftliche Herausforderungen.....	38
2.8.5 Gesetzliche und regulatorische Rahmenbedingungen	38
2.8.6 Mangelnde Infrastruktur und Recyclingkapazitäten	39
2.8.7 Zukunftsperspektiven und Lösungsansätze	39
2.8.8 Ergebnisse	39
2.9 Recycling des PV-Iso.....	40
2.9.1 Recyclingmöglichkeiten von Isolierglas.....	40
2.9.2 Recycling von Glas.....	40
2.9.3 Flachglasproduktion	40
2.9.4 Alternatives Konzept: Reuse von Glas.....	40
2.9.5 Hegla IG2Pieces Anlagenlösung für das automatische Isolierglastrennen	41
2.9.6 Trennung von Glas und Solarzellen – Optimierung für Wiederverwendung und Recycling.....	42
2.9.7 Ergebnisse	45
2.9.9 Entwicklung einer eigenen Recyclinglösung für PV-Iso-Scheiben aus Sicherheitsglas	46

2.10 Verbreitung der Vorhabensergebnisse	48
3. Fazit	49
4. Literaturverzeichnis	50

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Querschnitt einer Isolierglasscheibe	12
Abbildung 2: BondLock FEBA-KPt Klebstoff auf Solarzelle	14
Abbildung 3: Solarzellenmatrix mit Klebepunkten und Trägerglas	14
Abbildung 4: Applikation von KK7410 Klebepunkten auf Solarzellen	15
Abbildung 5: Applikation von Photobond VE557758 Klebstoff auf Solarzellen	16
Abbildung 6: UV-Licht aushärtung von Photobond VE557758	16
Abbildung 7: Elektrischer Verbinder isoliert mit Plasti Dip Liquid Tape	18
Abbildung 8: Elektrischer Verbinder isoliert mit Tesa 4129 Klebeband	19
Abbildung 9: Anschlussbox/Junctionbox auf Glasscheibe verklebt	21
Abbildung 10: Anschlussbox/Junctionbox mit Vergussmasse verfüllt	22
Abbildung 11: Erster Anschlussversuch mit Standard Junctionbox	24
Abbildung 12: Zweiter Versuch mit Standard Junctionbox	24
Abbildung 13: Dritter Versuch mit Standard Junctionbox	24
Abbildung 14: Anschlussversuch mit eigens entwickelter Anschlussbox	24
Abbildung 15: Anschlussbox/Junctionbox im Scheibenzwischenraum auf Isolierglasrahmen	25
Abbildung 16: Anschlussstecker Mini Cable Connector	25
Abbildung 17: Anschlussstecker MC4	25
Abbildung 18: Verformungen einer Isolierglasscheibe durch Änderungen des Luftdrucks und der Temperatur	27
Abbildung 19: 3D-Druck Probekörper für Dichtigkeitstest	29
Abbildung 20: Druckbehälter für Dichtigkeitstest von 3D Druck Probekörper	29
Abbildung 21: Dichtigkeitstest von 3D Druck Probekörper	30
Abbildung 22: Rahmenverbinder Teil 1 mit Lötkontakten	30
Abbildung 23: Rahmenverbinder Teil 2 mit Isolierglasrahmen	30
Abbildung 24: Einteiliger Rahmenverbinder mit Lötkontakten	31
Abbildung 25: Einteiliger Rahmenverbinder mit Schraubkontakten	31
Abbildung 26: Einteiliger Rahmenverbinder mit einem Schraubkontakt	32
Abbildung 27: Rahmenverbinder mit integrierter Junctionbox	33
Abbildung 28: Trockentest für Isolationsprüfung Bild: ISFH, Dr. Kevin Meyer	34
Abbildung 29: Nasstest für Isolationsprüfung, Bild: ISFH, Dr. Kevin Meyer	35
Abbildung 30: END-OF-LIFE MANAGEMENT Solar Photovoltaic Panels	37
Abbildung 31: Testmuster für Ablöseversuche	42
Abbildung 32: Ablöseversuch mit Luftdruck	43
Abbildung 33: Rückstände auf Glas nach Ablöseversuch mit Luftdruck	43
Abbildung 34: Ablöseversuch mit Glasschaber	44
Abbildung 35: Material Trennstation für das Recycling von PV-Isolierglas	47
Abbildung 36: PV-Isos auf dem Messestand Bau Messe München 2025	48

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vor- und Nachteile der getesteten Klebstoffe.....	17
Tabelle 2: Vor- und Nachteile der getesteten Isolationsmaterialien	20
Tabelle 3: Gemessene Isolationswiderstände im Trockentest.....	36
Tabelle 4: Gemessene Isolationswiderstände im Nasstest	36
Tabelle 5: Vor- und Nachteile der getesteten Ablösemethoden	45

Abkürzungsverzeichnis

SZR.....	Scheibenzwischenraum
LZR.....	Luftzwischenraum
PV.....	Photovoltaik
UV.....	Ultraviolettstrahlung
Epoxy.....	Epoxydharz
PE.....	Polyethylen
kV/mm.....	Kilovolt/Millimeter
CAD.....	Computer Aided Design
3D.....	Dreidimensional
VDC.....	Volts of Direct Current
MC4.....	Multi-Contact 4
DT.....	Delta Temperatur
DH.....	Delta Höhe
K.....	Kelvin
kN/m ²	Kilonewton/Quadratmeter
ASA.....	Acrylester-Styrol-Acrylnitril
MΩ.....	Megaohm
GΩ.....	Gigaohm

Zusammenfassung

Im Rahmen des zweijährigen Forschungsvorhabens „Entwicklung eines innovativen PV-Moduls auf Basis eines Standardisoliertes“ wurde ein neuartiges Photovoltaik-Modul konzipiert, das auf handelsüblichem Isolierglas basiert. Ziel der Entwicklung war die Optimierung des Designs hinsichtlich einer verbesserten Recyclingfähigkeit sowie einer nachhaltigen Nutzung der eingesetzten Materialien.

Ein zentrales Element der Innovation stellt die punktuelle Befestigung der PV-Strings im Inneren des Isolierglases dar. Diese Konstruktionsweise ermöglicht eine sortenreine Trennung der verwendeten Materialien, darunter Glas, Silizium und Silber. Durch den Verzicht auf konventionelle Verkapselungsmaterialien, die eine Wiederverwertung erschweren, wird eine effiziente Rückgewinnung der wertvollen Rohstoffe gewährleistet. Dies trägt wesentlich zur Förderung eines nachhaltigen Materialkreislaufs bei und entspricht den Prinzipien der Circular Economy.

Ein weiteres zentrales Entwicklungsziel war die elektrische Durchführung durch den Isolierglasverbund. Der von den integrierten Photovoltaikzellen im Inneren des Isolierglases erzeugte Strom muss nach außen abgeführt werden, ohne die Integrität der Isolierglasabdichtung zu beeinträchtigen. Dabei müssen sowohl mechanische als auch elektrische Anforderungen berücksichtigt werden, um eine langfristige Beständigkeit des Systems zu gewährleisten. Im Rahmen des Forschungsprojekts konnte ein funktionsfähiges Modulsystem entwickelt werden, das durch die Verwendung eines Standardisoliertes die mechanische Stabilität mitbringt und eine zuverlässige elektrische Kontaktierung sicherstellt. Dieses innovative Modul wurde erstmals auf der Messe Bau 2025 der Öffentlichkeit präsentiert.

Basierend auf den erzielten Forschungsergebnissen wird die Entwicklung einer automatisierten Produktionslinie angestrebt, die auf einer Standard-Isolierglasfertigungslinie basiert. Diese Skalierung soll eine wirtschaftliche Serienproduktion des innovativen PV-Moduls ermöglichen. Darüber hinaus wurden im Verlauf des Projekts weiterführende Konzepte zur Optimierung der elektrischen Durchführung erarbeitet, die in zukünftigen Entwicklungszyklen umgesetzt werden sollen.

Die erzielten Fortschritte stellen einen bedeutenden Meilenstein in der Entwicklung nachhaltiger und recyclingfähiger Photovoltaikmodule dar. Durch die gezielte Integration von PV-Technologie in Standardisoliertes eröffnen sich neue Anwendungsfelder, insbesondere in der Gebäudeintegration (Building Integrated Photovoltaics, BIPV).

Dieses Projekt wurde durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt mit Aktenzeichen 38518/01 gefördert.

Der vollständige Abschlussbericht ist unter www.dbu.de abrufbar.

1. Einleitung

Die Solarenergie gilt als eine der vielversprechendsten erneuerbaren Energiequellen und spielt eine entscheidende Rolle bei der Bewältigung der globalen Klimakrise. Durch die Nutzung der nahezu unerschöpflichen Energie der Sonne können fossile Brennstoffe zunehmend ersetzt und der CO₂-Ausstoß erheblich reduziert werden. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund des steigenden weltweiten Energiebedarfs und der Notwendigkeit nachhaltiger Energielösungen von großer Bedeutung.

Um das volle Potenzial der Solarenergie auszuschöpfen, sind kontinuierliche technologische Fortschritte erforderlich. In diesem Zusammenhang nimmt die Forschung zur Effizienzsteigerung und Kostenreduktion von Photovoltaikmodulen eine zentrale Stellung ein. Eine der größten Herausforderungen besteht darin, die Herstellungskosten zu senken, die Energieausbeute zu maximieren und gleichzeitig die Umweltbilanz der Produktion zu verbessern.

Ein besonders vielversprechender Ansatz ist die Entwicklung innovativer Solarmodule auf Basis von Standardisoliervlas. Dabei wird bewusst auf die üblicherweise verwendete Einkapselungsfolie zum Schutz der Solarzellen sowie auf den energieintensiven Laminierprozess verzichtet. Diese neuartige Technologie könnte gleich mehrere Vorteile mit sich bringen: Zum einen lassen sich durch den Verzicht auf bestimmte Materialien und Produktionsschritte die Herstellungskosten reduzieren. Zum anderen trägt die Eliminierung des Laminierprozesses dazu bei, den Energieverbrauch in der Produktion erheblich zu senken, was die Umweltbilanz der Solarmodule weiter verbessert.

Darüber hinaus könnte die Verwendung von Standardisoliervlas die Langlebigkeit und Widerstandsfähigkeit der Module erhöhen, was wiederum die Wartungs- und Austauschkosten minimieren würde. In Kombination mit weiteren technologischen Innovationen, wie der Optimierung der Solarzellen selbst oder der Integration in Gebäudefassaden und Fenster, könnte diese Entwicklung einen wichtigen Beitrag zur weiteren Verbreitung der Solarenergie leisten.

Ein solches Projekt hat somit das Potenzial, die Produktion von Solarmodulen nicht nur effizienter zu gestalten, sondern auch bedeutende ökologische und ökonomische Vorteile zu bieten. Angesichts der dringenden Notwendigkeit, nachhaltige Energielösungen voranzutreiben, könnten derartige Innovationen maßgeblich dazu beitragen, die Energiewende zu beschleunigen und die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen weiter zu reduzieren.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde untersucht, wie ein Aufbau eines PV-Moduls auf Basis eines Standardisoliervlases erfolgen kann. Mit dem neu entwickelten Produkt, das PV ISO, soll die bisher bei Flachglas Sülzfeld geübte hohe Flexibilität der Isoliervlasfertigung mit der Produktion von Solarmodulen kombiniert werden. Mit Hilfe der Elemente aus der Isoliervlasfertigung soll eine Produktion mit hoher Flexibilität entstehen, ohne dass auf der anderen Seite hohe Kosten entstehen, wie es bisher bei Spezialmodulen der Fall ist. Gleichzeitig entsteht ein Modul, das von Beginn an auf Recyclingfähigkeit konstruiert und

gebaut ist. Der spezielle Aufbau des neuen Moduls erlaubt eine einfache Trennung der Materialien und ermöglicht so ein gutes stoffliches Recycling ohne hohen Aufwand in chemischer Verfahrenstechnik. So sind die beiden Gläser mechanisch voneinander trennbar gestaltet, ebenso die Verbindung von Glas und PV-Zelle.

Die folgenden Produkteigenschaften sind dabei von entscheidender Bedeutung.

Die Nutzung von Standardisolierverglas als Trägermaterial für das Solarmodul ermöglicht es, die Module in bereits bestehenden Produktionslinien für Isolierverglas zu integrieren. Dies reduziert die Notwendigkeit für spezielle Produktionsanlagen und senkt damit die Einstiegskosten. Zudem bietet Standardisolierverglas eine hohe Widerstandsfähigkeit und ist bereits in großem Umfang in der Bauindustrie etabliert, was eine einfache Integration in bestehende Infrastruktur erlaubt.

Ein zentrales Ziel des Projekts ist es, die Umweltbelastungen durch die Solarmodulproduktion und Entsorgung zu minimieren. Der innovative Aufbau, der auf neuen Klebeverbindungen basiert, stellt sicher, dass alle Bestandteile des Moduls nach der Nutzungsphase einfach, kostengünstig und schnell recycelbar sind. Dies bedeutet, dass sowohl das Glas als auch die Solarzellen und Klebstoffe ohne große Aufwendungen voneinander getrennt werden können, was eine effiziente Rückgewinnung von Rohstoffen ermöglicht. Diese Recyclingfähigkeit kann den gesamten Lebenszyklus des Moduls umweltfreundlicher gestalten und die Notwendigkeit für den Abbau neuer Rohstoffe minimieren.

Durch die Nutzung der bestehenden Produktionstechnologie für Isolierverglas und die Möglichkeit zur Lizenzierung des Verfahrens können die Produktionskapazitäten schnell und kosteneffizient ausgeweitet werden. Das Skalierungspotential dieses Ansatzes ermöglicht eine breite Marktverfügbarkeit und eine schnellere Akzeptanz des Produkts. Darüber hinaus kann die Technologie durch Lizenzierungen an andere Hersteller weiter verbreitet werden, was zu einer globalen Verfügbarkeit des Produkts führt und die Marktpenetration beschleunigt.

Die Möglichkeit, Module in verschiedenen Größen zu produzieren, erhöht die Flexibilität bei der Anwendung und ermöglicht den Einsatz des Solarmoduls sowohl in großen als auch in kleinen Installationen. Diese Flexibilität ist besonders vorteilhaft, um verschiedene Marktsegmente abzudecken, von privaten Haushalten bis hin zu gewerblichen und industriellen Anwendungen. So kann das Produkt auf unterschiedliche Bedürfnisse und Raumgegebenheiten zugeschnitten werden.

Der hohe Automatisierungsgrad in der Produktion stellt sicher, dass auch kleinere Losgrößen kostengünstig produziert werden können. Dies ermöglicht es, das Produkt in verschiedenen Produktionsvolumina und für unterschiedliche Marktsegmente anzubieten, ohne dass hohe Produktionskosten entstehen. Eine Automatisierung sorgt für eine gleichbleibende Qualität und senkt langfristig die Produktionskosten. Dies könnte insbesondere für die Einführung auf neuen Märkten von Vorteil sein, auf denen eine flexible und kostengünstige Produktion erforderlich ist.

Durch die Verwendung von zweiseitig entspiegeltem Glas wird der Wirkungsgrad des Solarmoduls signifikant verbessert. Diese Technik sorgt dafür, dass mehr Licht auf die

Solarzellen trifft und somit eine höhere Energieausbeute erzielt wird. Zweiseitig entspiegeltes Glas reduziert den Reflexionsverlust an der Glasoberfläche und erhöht die Menge des eingefangenen Sonnenlichts, was zu einer höheren Effizienz des Moduls führt. Trotz des innovativen Aufbaus bleibt der Wirkungsgrad damit im Bereich der herkömmlichen Standard-PV-Module und gewährleistet so eine konkurrenzfähige Leistung auf dem Markt.

2. Hauptteil

2.1 Herstellung des PV-Iso

2.1.1 Der geplante Aufbau des Moduls basiert auf einer Standard Isolierglaseinheit.

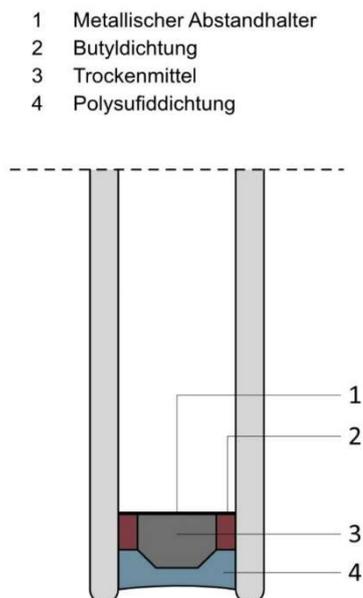
2.1.2 Isolierglas

„Der Kurzbegriff Isolierglas bezeichnet ein Mehrscheiben-Isolierglas, das eine komplexe und funktionelle Verglasungseinheit darstellt. Es besteht aus mindestens zwei Glasscheiben, die durch einen hermetisch abgeschlossenen Scheibenzwischenraum (SZR, auch LZR – Luftzwischenraum genannt, meist 8 bis 16 mm) getrennt sind und nur durch den Randverbund zusammengehalten werden.

2.1.3 Randverbund

Dem Randverbund kommt die wichtige Aufgabe zu, die einzelnen Glasscheiben dauerhaft zu verbinden und eine dampfdichte Sperre zu bilden. Insbesondere die Letztgenannte muss über die Nutzungsdauer hinweg eine Nachdiffusion von Wasserdampf in den SZR verhindern. Verformungen infolge des Isolierglaseffektes muss der Randverbund elastisch ausgleichen und dabei beständig sein gegen chemische Einwirkungen aus Atmosphäre und UV-Strahlung. Die Breite des Randverbundes wird durch den Abstandshalter bestimmt. Er ist mit einem Trockenmittel (auch: Adsorptionsmittel) gefüllt und mit Polyisobutylen (Butyl) eingeklebt. Diese Verklebung wird als Primärdichtstufe bezeichnet: Sie dichtet die Verklebung der Glasscheiben ab und verhindert die Diffusion von Wasserdampf und Gas.“

(<https://www.baunetzwissen.de/glas/fachwissen/funktionsglaeser/isolierglas-159107>)



Sulafa Isa, Berlin / Sebastian Schula, Darmstadt

Abbildung 1: Querschnitt einer Isolierglasscheibe

2.1.4 Solarzellen

Die Solarzellen sollen mittels einer punktuellen Verklebung in den Scheibenzwischenraum eines Isolierglases platziert werden. Hier gibt es zwei Möglichkeiten zur Positionierung der Solarzellen. Die Solarzellen können sowohl auf die Position 2 als auch auf die Position 3 der Glasscheiben geklebt werden.

Um die Oberflächen der Gläser eines Mehrscheiben-Isolierglases nicht zu verwechseln, helfen Positionsbezeichnungen. Für ein Zweifach-Isolierglas lauten diese:

Die Position 1 steht für die Außenseite der Außenscheibe

Die Position 2 steht für die Innenseite der Außenscheibe (zum SZR)

Die Position 3 steht für die Außenseite der Innenscheibe (zum SZR)

Die Position 4 steht für die Innenseite der Innenscheibe

2.1.5 Elektrischer Anschluss

Die in die Isolierglasscheibe integrierten Solarzellen müssen für die Stromerzeugung zuverlässig mit dem Stromnetz verbunden werden. Dafür ist es erforderlich, eine elektrische Verbindung zwischen den Solarzellen im Scheibenzwischenraum und der externen Verkabelung herzustellen, die den erzeugten Gleichstrom weiterleitet. Da es sich bei Isolierglas um eine hermetisch abgeschlossene Einheit handelt, die durch die Veränderung nicht beschädigt werden darf, stellt die Durchführung der elektrischen Leiter durch den Randverbund eine besondere Herausforderung dar. Erschwerend kommt hinzu, dass sowohl die Primär- als auch die Sekundärdichtstoffe eines Isolierglases zumindest bedingt elektrisch leitfähig sind, was zusätzlich die elektrische Isolierung zu diesen Materialien nötig macht.

2.2 Auswahl geeigneter Klebstoffe für die Verklebung der PV-Zellen mit Glas

2.2.1 Suche nach geeigneten Klebstoffen

Um die Solarzellen sicher und effizient mit den Glasscheiben zu verbinden, wurde im ersten Schritt nach geeigneten Klebstoffen recherchiert. Dabei standen verschiedene Kriterien im Fokus, darunter die Haftfestigkeit, die Transparenz des Klebers, die Verarbeitbarkeit sowie die Eignung für eine automatisierte Serienproduktion.

Bei der Recherche nach geeigneten Klebstoffen wurde anhand von Datenblättern eine erste Vorauswahl getroffen. Ein weiterer Klebstoff wurde nach unseren Vorgaben extra gemischt. Im weiteren Verlauf wurden diese ausgiebig getestet. Diese Klebstoffe sollten hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften, ihrer Verarbeitungsfreundlichkeit sowie ihrer Integrationsfähigkeit in einen automatisierten Produktionsprozess evaluiert werden.

2.2.2 Klebeversuche mit den ausgewählten Klebstoffen

1. BondLock FEBA-KPt (Firma IKTZ Innovative Klebtechnik Zimmermann)

Der erste getestete Klebstoff ist ein einkomponentiger pastöser, transparenter Kleber auf Epoxy Basis mit der Bezeichnung BondLock FEBA-KPt. Dieser wurde mittels einer Kartuschenpistole auf die Rückseite der Solarzellen in Form von Klebepunkten aufgetragen.

Im Anschluss wurde das Trägerglas vorsichtig auf die Solarzellen gelegt, um eine gleichmäßige Verteilung des Klebstoffs zu gewährleisten. Die Aushärtung des Klebstoffs erfolgt durch Lufttrocknung und dauert 24 Stunden. Die Vorgehensweise sowie das Ergebnis des Klebevorgangs sind in den Abbildung 2 und **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellt.

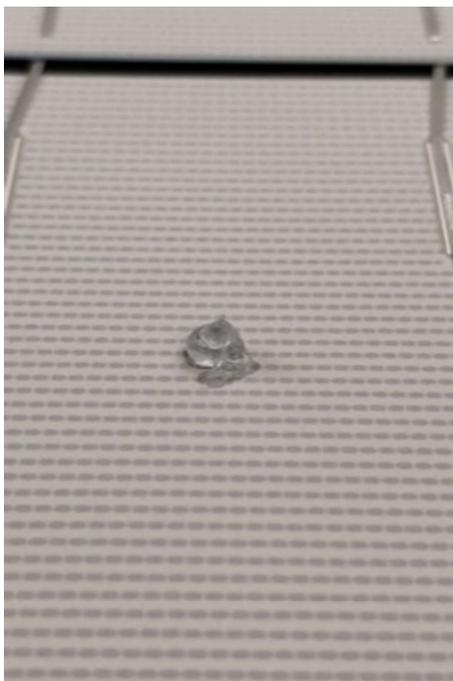


Abbildung 2: BondLock FEBA-KPt Klebstoff auf Solarzelle

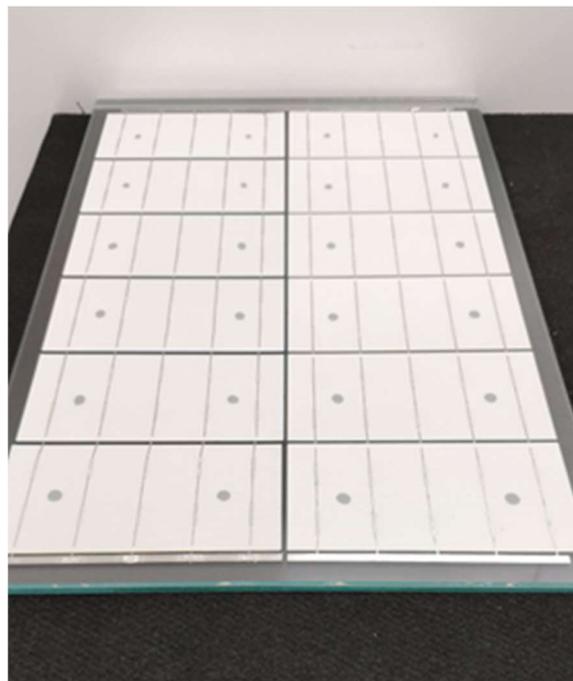


Abbildung 3: Solarzellenmatrix mit Klebepunkten und Trägerglas

2. KK7410 Klebepunkte (Firma K+K Klebetechnik)

Als zweite Option wurden transparente Klebepunkte auf Acrylat Basis des Typs KK7410 von der Firma K+K Klebetechnik verwendet. Diese werden von einer PE-Trägerfolie aus per Hand aufgebracht.

Die Klebepunkte ließen sich einfach per Hand auf die Solarzellen aufbringen. Nach der Applikation wurde das Trägerglas aufgelegt. Die Klebepunkte erreichten nach einer kurzen Wartezeit von etwa 20 Minuten eine ausreichende Klebefestigkeit. Die Handhabung und der Verklebungsprozess sind in Abbildung 4 dokumentiert.

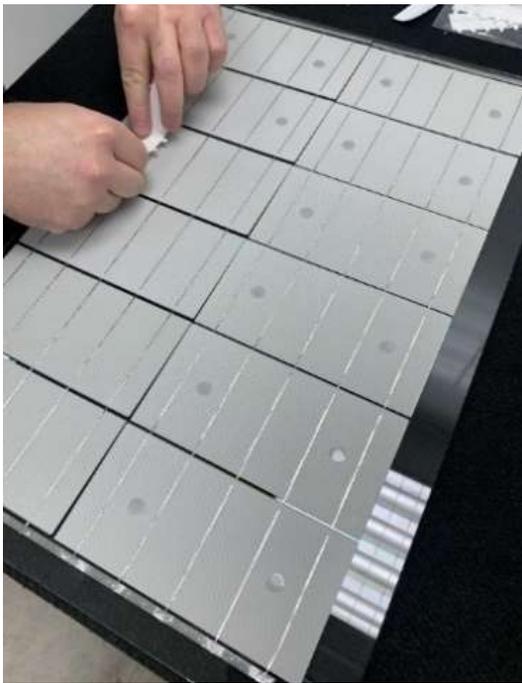


Abbildung 4: Applikation von KK7410 Klebepunkten auf Solarzellen

3. Photobond VE557758 (Firma Delo)

Der dritte getestete Klebstoff war ein speziell für dieses Projekt von der Firma Delo nach unseren Vorgaben gemischter transparenter UV-härtender Klebstoff mit der Bezeichnung Photobond VE557758. Dieser wurde mit einer Dosierpistole in Form kleiner Klebepunkte auf die Rückseite der Solarzellen appliziert.

Nach dem Auftragen wurde das Trägerglas auf die Solarzellen gelegt und die Verklebung mittels UV-Licht ausgehärtet wie in Abbildung 5 und Abbildung 6 zu sehen. Diese Vorgehensweise ermöglichte eine schnelle Fixierung des Klebers.

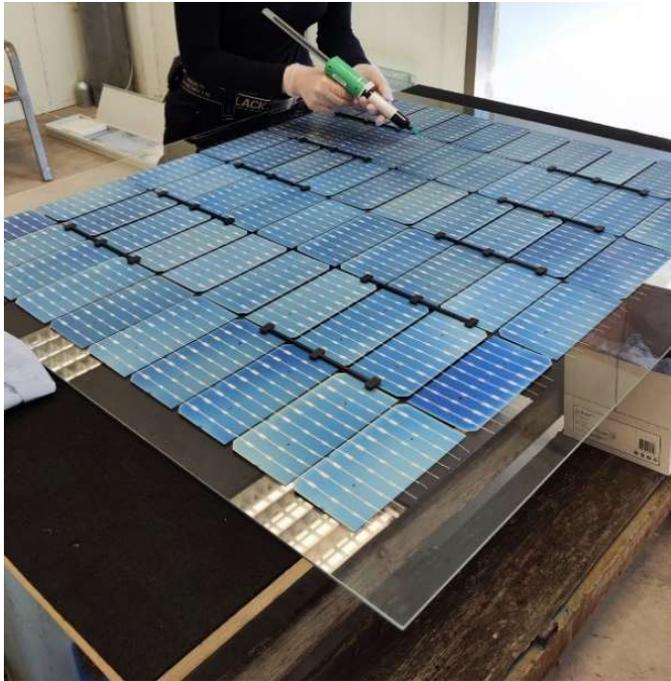


Abbildung 5: Applikation von Photobond VE557758 Klebstoff auf Solarzellen



Abbildung 6: UV-Licht aushärtung von Photobond VE557758

2.2.3 Evaluierung der Klebstoffe

Die drei Klebstoffe wurden hinsichtlich ihrer Verarbeitbarkeit, ihrer mechanischen Eigenschaften sowie ihrer Eignung für eine automatisierte Serienproduktion bewertet.

BondLock FEBA-KPt

Dieser Klebstoff lässt sich relativ einfach applizieren, allerdings hat seine hohe Viskosität zur Folge, dass die Klebepunkte vergleichsweise groß ausfallen. Dies wird insbesondere nach dem Auflegen des Trägerglases sichtbar, da das Eigengewicht des Glases die Klebepunkte weiter ausdehnt.

Ein weiterer Nachteil ist die lange Aushärtungszeit von 24 Stunden, was die Effizienz einer Serienfertigung erheblich einschränkt. Die verklebten Solarzellen müssen in diesem Zeitraum zwischengelagert werden, bevor die Weiterverarbeitung zum Isolierglas erfolgen kann.

Klebepunkte KK7410

Die Klebepunkte lassen sich ebenfalls einfach auf die Solarzellen aufbringen. Aufgrund ihrer Trägerfolie können sie jedoch nicht maschinell aufgetragen werden, was den Prozess sehr zeitaufwendig macht.

Daher sind diese Klebepunkte für eine automatisierte Serienfertigung ungeeignet, da die manuelle Anbringung zu einem erheblichen Zeitaufwand führt und die Produktionsgeschwindigkeit stark reduziert.

Photobond VE557758

Der Photobond VE557758 zeigte sich in den Versuchen als besonders vorteilhaft. Durch seine niedrige Viskosität lassen sich sehr kleine Klebepunkte erzeugen, wodurch sich ein erhebliches Einsparpotenzial ergibt. Zudem sorgt die feine Applikation für ein optisch ansprechenderes Endergebnis der PV-Isolierglasscheibe.

Ein entscheidender Vorteil dieses Klebstoffs ist seine UV-Aushärtung. Der Kleber bleibt so lange flüssig und verarbeitbar, bis er durch UV-Licht gezielt ausgehärtet wird. Dies ermöglicht eine sehr flexible Verarbeitung und beschleunigt den Produktionsprozess erheblich. Sowohl die Applikation als auch die Aushärtung mit UV-Lampen lassen sich hervorragend automatisieren, wodurch der Klebstoff ideal für die Serienproduktion geeignet ist.

	Topfzeit	Viskosität	Applikation	Dosierung	Trockenzeit	Automatisierung
BondLock FEBA-KPt	+	+	+	+	-	++
Klebepunkte KK7410	++	-	+	+	+	-
Photobond VE557758	++	++	++	++	++	++

Tabelle 1: Vor- und Nachteile der getesteten Klebstoffe

2.2.4 Ergebnisse

Die durchgeführten Tests haben gezeigt, dass der UV-Kleber Photobond VE557758 die besten Eigenschaften für eine effiziente, automatisierte Verklebung von Solarzellen mit Glas aufweist. Seine schnelle und kontrollierbare Aushärtung, die Möglichkeit zur exakten Dosierung sowie die hervorragende Integrationsfähigkeit in einen industriellen Produktionsprozess machen ihn zur bevorzugten Wahl gegenüber den beiden anderen getesteten Klebstoffen.

Während BondLock FEBA-KPt durch seine lange Trocknungszeit und die ausgeprägte Verbreitung der Klebepunkte Nachteile aufweist, sind die KK7410-Klebepunkte aufgrund der notwendigen manuellen Applikation für eine automatisierte Fertigung ungeeignet.

Die Ergebnisse dieser Tests liefern wertvolle Erkenntnisse für die weitere Entwicklung von PV-Glas-Verbundsystemen und zeigen, dass der gezielte Einsatz moderner Klebstofftechnologien eine entscheidende Rolle für die Effizienz und Wirtschaftlichkeit von Solarmodulen spielen kann.

2.3 Auswahl geeigneter Isolationsmöglichkeiten für die elektrischen Verbinder der PV-Zellen zur Durchführung durch den Isolierglasrahmen

2.3.1 Notwendigkeit der Isolierung

Die elektrischen Verbinder der Solarzellen müssen für den Anschluss aus der Isolierglaseinheit nach außen geleitet werden. Diese sollen durch die Primärdichtung

zwischen Glas und Isolierglasrahmen, welche für die Gasdichtigkeit zuständig ist, geführt werden. Das Butyl, welches für die Dichtung verwendet wird, ist elektrisch leitfähig.

Um mögliche Kurzschlüsse zu verhindern, müssen die elektrischen Verbinder in dem Bereich, in dem sie die Butyldichtung passieren, zuverlässig isoliert werden. Die Wahl eines geeigneten Isolationsmaterials ist entscheidend, um eine langfristig stabile elektrische Verbindung sicherzustellen, ohne die strukturelle Integrität der Isolierglaseinheit zu beeinträchtigen.

Da die elektrischen Verbinder sowohl mechanischen Belastungen als auch möglichen Temperaturschwankungen ausgesetzt sind, muss das gewählte Isolationsmaterial nicht nur eine hohe elektrische Durchschlagsfestigkeit aufweisen, sondern auch flexibel genug sein, um Materialspannungen und thermische Ausdehnung ohne Rissbildung zu kompensieren.

2.3.2 Test verschiedener Isolationsmaterialien anhand erster PV-Iso-Scheiben

Zur Isolierung der elektrischen Verbinder wurden drei verschiedene Materialien untersucht, die jeweils unterschiedliche Eigenschaften in Bezug auf Applikation, Haltbarkeit und elektrische Isolationsfähigkeit aufweisen.

1. Liquid Tape von Plasti Dip

Als erste Option wurde das flüssige Isoliermaterial Liquid Tape von Plasti Dip getestet. Hierbei handelt es sich um eine flexible, gummiartige Beschichtung, die speziell für elektrische Isolationszwecke entwickelt wurde. Die elektrischen Kontakte wurden im Bereich der Durchführung in mehreren Schichten mit dem Isoliermaterial besprüht, um eine ausreichende Isolationsschicht zu erzielen, wie Abbildung 7 zeigt.



Abbildung 7: Elektrischer Verbinder isoliert mit Plasti Dip Liquid Tape

Das Liquid Tape von Plasti Dip bietet einen hohen Durchschlagschutz von 56,0 kV/mm und sorgt für eine widerstandsfähige Schutzschicht, die sich nach dem Aushärten gut an die Geometrie der Verbinder anpasst. Besonders vorteilhaft ist die wasserdichte und flexible Beschaffenheit der getrockneten Beschichtung, die eine zusätzliche Schutzfunktion gegen

Feuchtigkeit bietet. Allerdings ist die Applikation relativ zeitaufwendig, da das Material schichtweise aufgetragen und zwischen den einzelnen Schichten getrocknet werden muss. Zusätzlich ist eine ausreichende Belüftung oder eine Absauganlage erforderlich, da die Aerosole nicht eingeatmet werden sollten.

2. UV-1 Klebeband von 3M

Als zweite Methode wurde das klare Klebeband UV-1 der Firma 3M verwendet. Dieses Klebeband ist speziell für elektrische Anwendungen konzipiert und weist einen Durchschlagschutz von 83,3 kV/mm auf. Die Anwendung des Klebebands gestaltet sich denkbar einfach: Es kann direkt auf die elektrischen Verbinder aufgebracht und durch leichten Druck fixiert werden.

Vorteile dieses Klebebands sind die einfache Handhabung, die schnelle Applikation sowie die saubere und trockene Verarbeitung ohne zusätzliche Trocknungszeiten. Allerdings ist die mechanische Belastbarkeit des Klebebands im Vergleich zu einer gummiartigen Beschichtung wie Liquid Tape begrenzt, sodass eine sorgfältige Applikation notwendig ist, um eine dauerhafte Isolierung zu gewährleisten.

3. 4129 Klebeband von Tesa

Als dritte Option wurde das transparente Klebeband 4129 von Tesa untersucht. Dieses Klebeband bietet mit einem Durchschlagschutz von 90,4 kV/mm eine besonders hohe elektrische Isolationsfähigkeit. Aufgrund dieser herausragenden Eigenschaften eignet es sich hervorragend für Anwendungen, bei denen höchste Sicherheitsanforderungen an die Isolation bestehen.

Die Anwendung des Tesa 4129 Klebebands ist ebenfalls sehr einfach und effizient: Das Band wird in passenden Stücken zugeschnitten, auf die elektrischen Verbinder aufgebracht und mit leichtem Druck fixiert wie die Abbildung 8 zeigt. Durch seine hohe Haftkraft bleibt das Klebeband sicher an Ort und Stelle, selbst unter Einfluss von Temperaturschwankungen und mechanischen Belastungen. Zudem weist es eine hohe Beständigkeit gegenüber Feuchtigkeit auf, was für den langfristigen Einsatz in Isolierglas-Solarmodulen von Vorteil ist.



Abbildung 8: Elektrischer Verbinder isoliert mit Tesa 4129 Klebeband

2.3.3 Evaluierung der Isolationsmöglichkeiten

Alle drei getesteten Isolationsmethoden erwiesen sich als grundsätzlich geeignet, um die elektrischen Verbinder sicher durch die Butyldichtung zu führen. Hinsichtlich der praktischen Handhabung und Effizienz zeigten sich jedoch deutliche Unterschiede:

- **Liquid Tape von Plasti Dip** bietet eine sehr gute Isolationsleistung und Flexibilität, erfordert jedoch eine aufwendige Applikation sowie eine geeignete Arbeitsumgebung mit Belüftung oder Absaugung. Zudem verlängert die notwendige Trocknungszeit den Verarbeitungsprozess erheblich.
- **Das Klebeband UV-1 von 3M** lässt sich einfach auftragen und ermöglicht eine schnelle und saubere Verarbeitung. Es bietet jedoch eine geringere Durchschlagsfestigkeit und ist mechanisch weniger widerstandsfähig als die anderen getesteten Materialien.
- **Das Tesa 4129 Klebeband** kombiniert eine hohe Durchschlagsfestigkeit mit einfacher Handhabung und schneller Verarbeitung. Es bietet zudem eine ausgezeichnete Haftkraft und Beständigkeit gegenüber Umwelteinflüssen.

	Durchschlagfestigkeit	Handhabung	Trockenzeit	Automatisierung
Plasti Dip Liquid Tape	+	-	-	-
3M UV-1	++	++	++	-
Tesa 4129	++	++	++	-

Tabelle 2: Vor- und Nachteile der getesteten Isolationsmaterialien

2.3.4 Ergebnisse

Während alle getesteten Isolationsmethoden grundsätzlich geeignet sind, zeigen die Klebebänder von 3M und Tesa deutliche Vorteile in Bezug auf die Durchschlagfestigkeit, Handhabung, und Trockenzeiten.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass für eine industrielle Anwendung und Serienproduktion insbesondere das Tesa 4129 Klebeband hier die beste Wahl darstellt. Seine hohe elektrische Durchschlagfestigkeit, gepaart mit der einfachen Handhabung und der zuverlässigen Haftung, macht es zur effizientesten und sichersten Lösung für die Isolierung der elektrischen Verbinder in PV-Isolierglasscheiben.

2.4 Anschluss der gebauten PV-Iso-Scheiben mit Standard-Junctionboxen aus dem PV-Modul-Bereich

2.4.1 Notwendigkeit einer geeigneten Anschlusslösung

Um die PV-Iso-Scheiben miteinander und mit einem Wechselrichter verbinden zu können, müssen diese mit Anschluss terminals (Junctionboxen) versehen werden. Da es sich hier um ein neuartiges Solarmodul handelt, für das es bislang keine speziell angepassten Junctionboxen auf dem Markt gibt, musste auf Standardlösungen aus dem konventionellen PV-Modul-Bereich zurückgegriffen werden.

2.4.2 Herausforderungen bei der Montage der Standard-Junctionboxen

Die gängigen Junctionboxen sind für klassische Glas-Folien- oder Glas-Glas-Module konzipiert und nicht für Isolierglaseinheiten mit einem Rahmen und einer Gasfüllung vorgesehen. Aufgrund ihrer Abmessungen und Bauweise ist eine Montage im Rahmenbereich zwischen den Glasscheiben einer Isolierglasscheibe leider nicht möglich.

Zusätzlich gibt es in Standard-Fensterrahmen und Fensterfassaden in der Regel nicht genügend Platz im Randbereich der Isolierglasscheiben, um eine Standard-Junctionbox unauffällig zu integrieren. Daher mussten die Junctionboxen auf die innere Glasscheibe auf die Position 4 im Randbereich geklebt und anschließend mit einer Vergussmasse verfüllt werden, wie in Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. zu sehen.

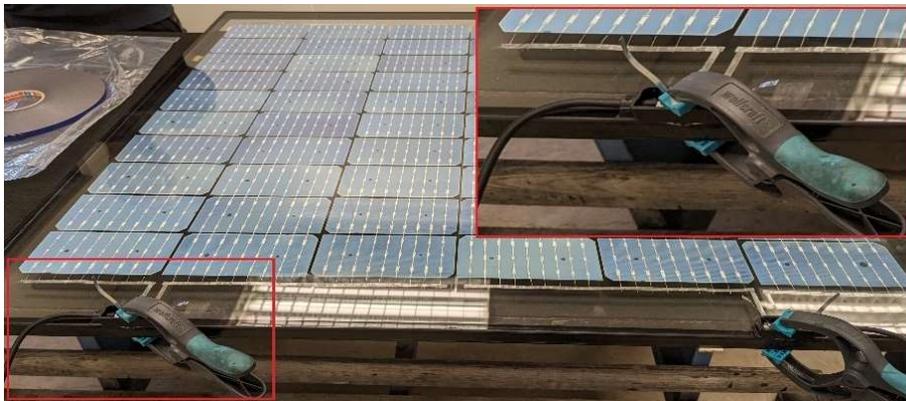


Abbildung 9: Anschlussbox/Junctionbox auf Glasscheibe verklebt

Das Vergießen der Junctionboxen erfüllt mehrere essenzielle Funktionen. Einerseits dient es dem Schutz der Elektronik im Inneren vor äußeren Einflüssen wie Staub, Feuchtigkeit und anderen Umwelteinwirkungen, die die Leistung oder Lebensdauer der Komponenten beeinträchtigen könnten. Andererseits trägt das Vergussmaterial dazu bei, entstehende Wärme effizient abzuleiten, wodurch eine Überhitzung der elektronischen Bauteile verhindert wird. Dies ist besonders wichtig, da die Junctionbox unter Sonneneinstrahlung und durch die elektrische Belastung Wärme entwickelt, die ohne geeignete Wärmeableitung zu Leistungseinbußen oder sogar zu Schäden führen könnte.

Darüber hinaus erhöht das Vergießen die mechanische Stabilität der Bauteile, da es Erschütterungen und Vibrationen dämpft. Dies ist vor allem in anspruchsvollen Einsatzgebieten von Vorteil, in denen die Module starken Temperaturschwankungen oder mechanischen Belastungen ausgesetzt sind. Je nach verwendeter Vergussmasse kann zudem eine erhöhte elektrische Isolation erreicht werden, die das Risiko von Kurzschlüssen minimiert.

Materialien wie Silikone, Epoxidharze oder Polyurethane kommen häufig zum Einsatz, wobei jede dieser Vergussmassen spezifische Vorteile hinsichtlich Temperaturbeständigkeit, Elastizität und Schutzwirkung bietet. Abbildung 10 zeigt eine vergossene Anschlussbox.



Abbildung 10: Anschlussbox/Junctionbox mit Vergussmasse verfüllt

Dies bringt jedoch mehrere Herausforderungen mit sich:

1. **Sichtbarkeit der Junctionboxen:** Da sich die Anschlüsse auf der Position 4 also der zum Raum hinzeigenden Scheibe befinden, sind sie deutlich sichtbar. Dies könnte insbesondere bei Anwendungen im architektonischen Bereich, wie beispielsweise in Fassaden oder Dachverglasungen, problematisch sein und die Akzeptanz der PV-Isolier-Scheiben verringern.
2. **Herausfordernde Kabelführung:** Die Kabel der Standard-Junctionboxen sind für den dauerhaften Einsatz im Außenbereich ausgelegt und verfügen daher über eine doppelte Ummantelung. Dies macht sie besonders widerstandsfähig, aber auch sehr starr. Dadurch lassen sie sich nicht ohne Weiteres um kleine Radien legen, was die Integration in das Design der Isolierglasscheibe zusätzlich erschwert.
3. **Mechanische Belastung und langfristige Haltbarkeit:** Bei den Versuchen, die Verkabelung in zusätzlichen Kabelkanälen möglichst unauffällig zu verbergen, wurden die Junctionboxen durch die sehr starren Kabel stark unter Spannung gesetzt. Dies könnte sich langfristig negativ auf die Haltbarkeit der Verklebung der Junctionboxen auf dem Glas auswirken.

Nach mehreren gebauten, eingebauten und angeschlossenen PV-Iso-Scheiben wurde beschlossen, dass eine alternative Anschlusslösung notwendig ist.

2.5 Entwicklung einer eigenen Junctionbox für die PV-Iso-Scheiben

Da sich Standard-Junctionboxen für die PV-Iso-Scheiben als ungeeignet erwiesen haben, wurde im späteren Verlauf des Projekts an einer Lösung gearbeitet, die eine Integration der Junctionbox innerhalb der Isolierglaseinheit ermöglicht.

2.5.1 Entwicklung und Prototyping

Es wurden erste CAD-Zeichnungen erstellt und im 3D-Druckverfahren Prototypen gefertigt, um eine mögliche Integration zu testen. Dabei mussten mehrere Faktoren berücksichtigt werden:

- **Kompakte Bauweise:** Die Junctionboxen mussten schmal genug sein, um die verschiedenen Rahmenbreiten im Isolierglasbereich abdecken zu können.
- **Begrenzte Bauhöhe:** Eine zu hohe Junctionbox würde einen sichtbaren Randbereich im eingebauten Zustand erzeugen, was es zu vermeiden galt.
- **Integration in das Isolierglas:** Die Box musste eine zuverlässige Abdichtung und elektrische Verbindung gewährleisten.
- **Einfache Montage und Wartung:** Die Anschlussbox sollte möglichst einfach zu montieren sein und im Falle eines Defekts ohne großen Aufwand ausgetauscht werden können.

Nach zahlreichen gedruckten Varianten wurde eine geeignete Anschlussbox entwickelt, mit der PV-Iso-Scheiben gebaut und angeschlossen werden konnten. Auf den folgenden Abbildung 11 Abbildung 12 Abbildung 13 Abbildung 14 lassen sich die Unterschiede in der Integration deutlich erkennen.

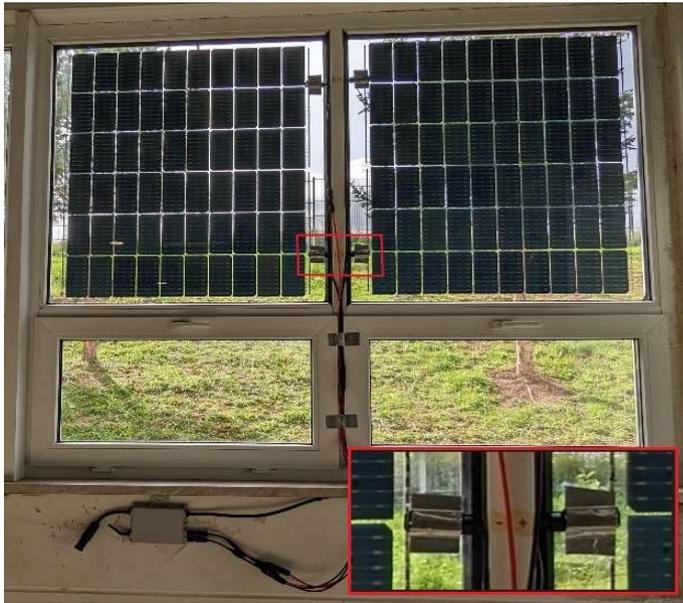


Abbildung 11: Erster Anschlussversuch mit Standard Junctionbox

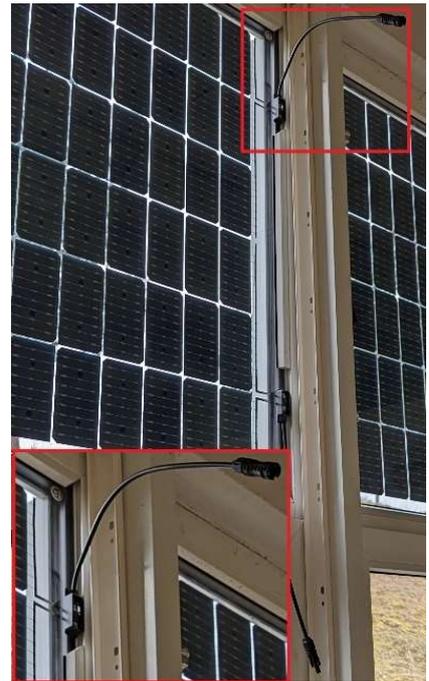


Abbildung 12: Zweiter Versuch mit Standard Junctionbox

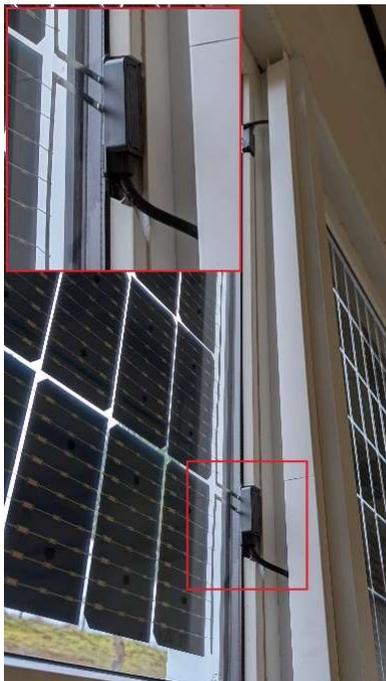


Abbildung 13: Dritter Versuch mit Standard Junctionbox



Abbildung 14: Anschlussversuch mit eigens entwickelter Anschlussbox

Während auf den Abbildungen 11 bis 13 noch die PV-Iso-Scheiben mit Standard Junctionboxen zu sehen sind, wurde bei der Abbildung 14 bereits eine eigens entwickelte Anschlussbox, wie in Abbildung 15 zu sehen, verwendet.

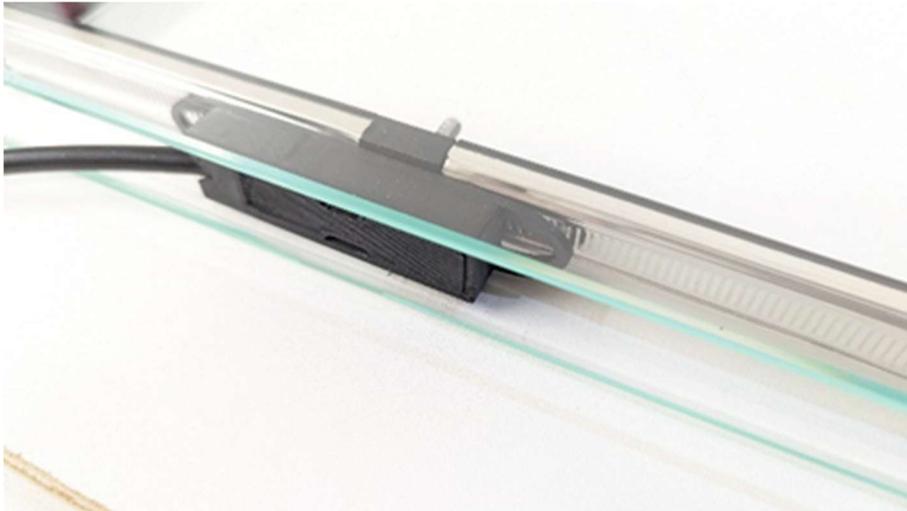


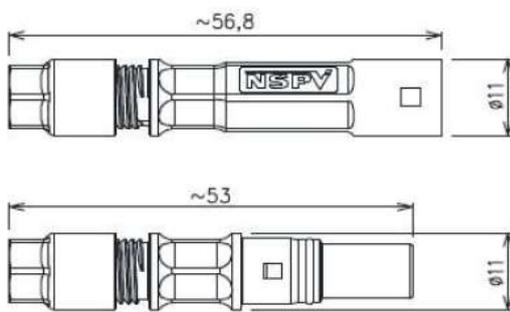
Abbildung 15: Anschlussbox/Junctionbox im Scheibenzwischenraum auf Isolierglasrahmen

2.5.2 Verbesserte Kabelführung und neue Anschlussstecker

Durch die geschützte Integration innerhalb der Isolierglaseinheit entfällt die direkte Witterungsexposition der Anschlusskabel. Dadurch konnte auf dünnere und flexiblere Kabelalternativen zurückgegriffen werden, was die Handhabung und Integration erheblich erleichtert. Zudem wurden verschiedene Kabelführungen getestet, um eine möglichst unauffällige und platzsparende Verlegung zu gewährleisten.

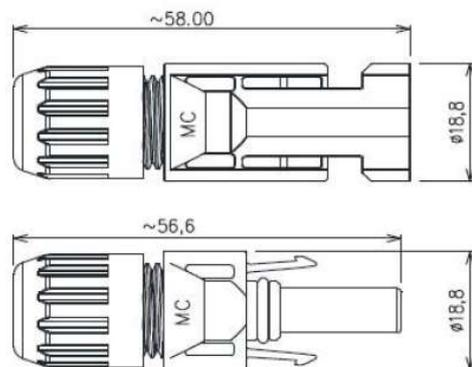
Zusätzlich wurde eine Alternative für die üblichen MC4-Anschlussstecker wie in Abbildung 17 gesucht. Diese sind zwar bewährter Standard in der Solarindustrie, jedoch aufgrund ihrer Größe nicht für kompakte Bauräume ausgelegt. Nach intensiver Recherche wurde eine Lösung gefunden:

Die Mini Cable Connector der Firma Newsun die in Abbildung 16 zu sehen sind. Diese wurden speziell für Photovoltaik-Anwendungen entwickelt, haben jedoch einen deutlich kompakteren Durchmesser und ermöglichen dadurch eine bessere Integration in den Rahmenbereich.



Newsun 1000VDC Mini cable connector

Abbildung 16: Anschlussstecker Mini Cable Connector



Newsun MC4/EVO cable connector

Abbildung 17: Anschlussstecker MC4

Die Vorteile dieser neuen Lösung sind:

- **Kompaktere Bauweise:** Die Stecker nehmen weniger Platz in Anspruch und können unauffällig in den Rahmenbereich integriert werden.
- **Einfache Handhabung:** Die neuen Stecker lassen sich leichter montieren und benötigen weniger Platz als herkömmliche MC4-Stecker.
- **Verbesserte Ästhetik:** Durch die reduzierte Größe und flexiblere Kabelführung kann das Erscheinungsbild der PV-Iso-Scheiben weiter optimiert werden.

2.5.3 Ergebnisse

Die Entwicklung einer eigenen Anschlusslösung für die PV-Iso-Scheiben stellte sich als notwendiger Schritt heraus, um eine effiziente, langlebige und optisch ansprechende Lösung zu realisieren. Während die Standard-Junctionboxen nur mit erheblichen Kompromissen einsetzbar waren, ermöglicht die neue, eigens entwickelte Anschlussbox eine optimale Integration in die Isolierglaseinheit. Die Kombination aus einer schlanken Junctionbox, flexibleren Kabeln und kompakteren Steckern verbessert nicht nur die Funktionalität, sondern auch die Akzeptanz der PV-Iso-Scheiben in architektonischen Anwendungen.

Durch die erfolgreiche Umsetzung dieser Lösung konnte ein entscheidender Schritt hin zur Serienfertigung von PV-Iso-Scheiben gemacht werden. Zukünftige Tests und Optimierungen werden darauf abzielen, die Anschlusslösung weiter zu verfeinern und mögliche weitere Verbesserungen in der Automatisierung der Produktion zu identifizieren.

2.6 Arbeiten an weiteren möglichen Lösungen für die elektrische Durchführung der PV-Zellen durch den Isolierglasrahmen

2.6.1 Herausforderungen der bisherigen elektrischen Durchführung

Wie sich herausgestellt hat, bergen die ursprünglich im Projekt verwendeten elektrischen Durchführungen einiges an Verbesserungspotenzial, was sowohl die elektrische Funktionalität als auch die Dichtigkeit der Isolierglasscheibe betreffen.

- **Leitfähigkeit des Butyls:** Eine der Hauptproblematiken liegt in der Tatsache, dass das im Isolierglasrandverbund verwendete Butyl leitfähig ist. Dies führte dazu, dass die elektrischen Leitungen zusätzlich isoliert werden mussten, um mögliche Kurzschlüsse zu vermeiden.
- **Erhöhtes Risiko von Undichtigkeiten:** Durch die notwendigen zusätzlichen Dichtungsebenen, die für die elektrische Durchführung geschaffen wurden, steigt das Risiko für potenzielle Undichtigkeiten. Dies stellt insbesondere bei langfristiger Nutzung und wechselnden klimatischen Bedingungen eine Herausforderung dar.
- **Mechanische Belastung durch klimatische Veränderungen:** Der Randverbund von Isolierglasscheiben wird durch Temperaturschwankungen und äußere Witterungseinflüsse zusätzlich belastet. Diese mechanischen Spannungen können im

Laufe der Zeit dazu führen, dass Dichtungsmaterialien nachgeben und potenzielle Defekte an den elektrischen Durchführungen entstehen.

2.6.2 Klimabelastungen bei Isolierglasscheiben

„Klimatische Veränderungen führen bei Isolierglasscheiben zu einer zusätzlichen Beanspruchung der Scheiben. Das im Scheibenzwischenraum (SZR) eingeschlossene Füllgas verändert bei Temperatur- und Luftdruckänderungen sein Volumen und führt damit zu einer klimatisch induzierten Beanspruchung der Einzelscheiben. Die Ein- bzw. Ausbauchung der Isolierglasscheibe wird auch als Doppelscheibeneffekt (Koppeleffekt) bezeichnet. Die resultierende Belastung hängt hierbei erheblich von der Nachgiebigkeit der Scheiben ab.

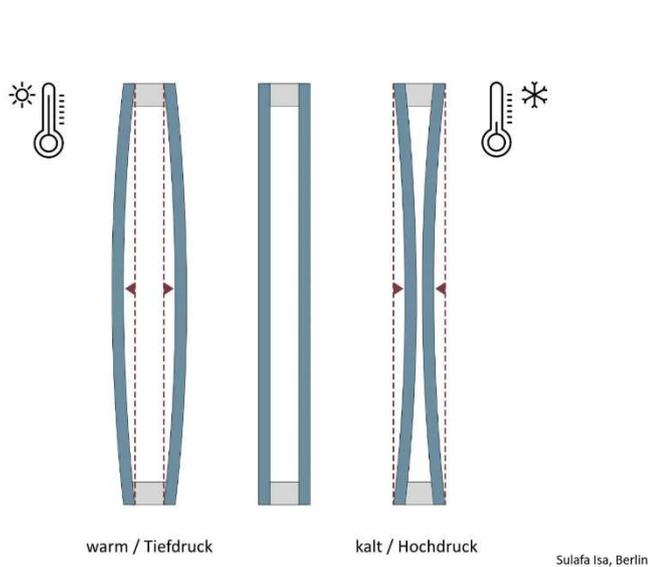


Abbildung 18: Verformungen einer Isolierglasscheibe durch Änderungen des Luftdrucks und der Temperatur

Bei großformatigen Scheiben mit einer hohen Nachgiebigkeit sind diese klimatisch induzierten Zwängungen weitestgehend vernachlässigbar. Bei kleinformatischen Scheiben mit einer geringen Nachgiebigkeit ergeben sich jedoch hohe Beanspruchungen, die bei der Bemessung einer Isolierglasscheibe besonders berücksichtigt werden müssen. Die klimatischen Einflüsse bestehen aus verschiedenen Anteilen. Zum einen führen Änderungen des Luftdrucks durch meteorologische Hoch- und Tiefdruckgebiete zu Druckdifferenzen zwischen der Umgebung und dem Scheibenzwischenraum, zum anderen verursachen Temperaturänderungen ΔT im Scheibenzwischenraum durch die Umgebungstemperatur oder durch solare Einstrahlungen Volumenänderungen des Füllgases, die zu Zwängungen führen. Auch Höhendifferenzen ΔH zwischen dem Herstellungs- und Einbauort bewirken Änderungen des äußeren Luftdrucks und sind daher zusätzlich bei einer Bemessung zu berücksichtigen.

Bei völlig unnachgiebigen (isochoren) Systemen führt eine Erwärmung im Scheibenzwischenraum um $\Delta T = 20 \text{ K}$ bei einer Höhendifferenz von 600 m und einer

Abnahme des meteorologischen Luftdruckes um 2 kN/m^2 zu einem isochoren Druck von etwa 16 kN/m^2 . Die effektive Belastung der Scheiben durch die klimatische Belastung ist im Wesentlichen von den Steifigkeiten der Scheiben und dem Scheibenzwischenraum (SZR) abhängig.

Beim Einsatz von Isolierglas bildet die allseitig liniengelagerte Rechteckplatte den häufigsten Anwendungsfall. Bei üblichen Verglasungen mit Gashalteleisten und ausreichend steifer Unterkonstruktion kann die Lagerung in statischer Hinsicht als starre Auflagerung mit freier Drehbarkeit angenommen werden. Bei kleinen Verformungen kann die Platte unter Ansatz der linearen Biegetheorie berechnet werden. Für die Berechnung derartiger statischer Systeme stehen in der Praxis vielfältige Tabellenwerke zur Verfügung, um die maximalen Biegespannungen und Verformungen der Platte zu berechnen.

Für die Berechnung der klimatisch induzierten Belastungen von rechteckigen Isolierglasscheiben definiert Feldmeier die charakteristische Kantenlänge der Isolierglasscheibe. Bei Isolierglasscheiben mit einer wahren Kantenlänge bis zur doppelten charakteristischen Kantenlänge sind Klimabelastungen als relevant anzusehen.“
(<https://www.baunetzwissen.de/glas/fachwissen/sicherheit-tragfaehigkeit/klimabelastungen-bei-isolierglasscheiben-159324>)

2.6.3 Integration der elektrischen Durchführung direkt in den Isolierglasrahmen

Statt die Kabel weiterhin durch die Randversiegelung zu führen, entstand die Idee, die elektrischen Leitungen direkt in den Rahmen der Isolierglaseinheit zu integrieren. Dies hätte mehrere Vorteile: Die elektrische Verbindung wäre besser vor Umwelteinflüssen geschützt, die Gefahr von Undichtigkeiten im Randverbund würde reduziert, und die Installation könnte insgesamt einfacher und zuverlässiger gestaltet werden.

Ein zentraler Ansatz war die Anpassung der Rahmenverbinder, mit denen die Rahmenteile des Isolierglases zusammengefügt werden. Ziel war es, diese so zu verändern, dass die elektrischen Leitungen durch speziell angepasste Kanäle innerhalb der Verbinder geführt werden können. Um die Umsetzbarkeit dieser Idee zu überprüfen, wurden verschiedene Konzepte in CAD entworfen und erste Prototypen entwickelt.

2.6.4 Materialwahl für die neuen Rahmenverbinder

Bevor die ersten physischen Prototypen im 3D-Druck hergestellt werden konnten, musste zunächst ein geeignetes Filament für die Rahmenverbinder ausgewählt werden. Das Material musste mehrere essenzielle Anforderungen erfüllen:

- **UV-Beständigkeit:** Da die Rahmenverbinder langfristig Sonnenlicht ausgesetzt sein könnten, musste das Material eine hohe Widerstandsfähigkeit gegenüber UV-Strahlung aufweisen, um Versprödung oder Degradation zu verhindern.
- **Mechanische Stabilität:** Das Material musste stark genug sein, um die Belastungen im Randbereich der Isolierglasscheibe auszuhalten, insbesondere durch Druckunterschiede und Temperaturschwankungen.

- **Gasdichtigkeit:** Um den dauerhaften Erhalt der Isoliergasfüllung im Inneren der Scheibe zu gewährleisten, durfte das Material keine unerwünschte Durchlässigkeit für Gase aufweisen.

Nach Abwägung verschiedener Materialoptionen fiel die Wahl auf ASA-Filament (Acrylnitril-Styrol-Acrylat), das für seine hohe Witterungsbeständigkeit, UV-Stabilität und gute mechanische Eigenschaften bekannt ist. Um die Eignung des Materials zu testen, wurden zunächst Probekörper im 3D-Druckverfahren hergestellt, wie in Abbildung 19 zu sehen und auf ihre Belastbarkeit untersucht.



Abbildung 19: 3D-Druck Probekörper für Dichtigkeitstest

2.6.5 Test der Materialeigenschaften und Prototypenentwicklung

Zur Überprüfung der Gasdichtigkeit und mechanischen Stabilität wurde ein spezieller Druckbehälter gebaut, in den die gedruckten Probekörper in eine Öffnung eingesetzt und luftdicht verklebt wurden. Abbildung 20.



Abbildung 20: Druckbehälter für Dichtigkeitstest von 3D Druck Probekörper

Anschließend wurde der Behälter mit Druckluft beaufschlagt, um zu testen, ob das Material dichthält und bis zu welchem Druck es stabil bleibt. Die Tests ergaben, dass das ASA-Filament sowohl der mechanischen Beanspruchung als auch den Dichtigkeitsanforderungen standhält, wie man auf Abbildung 21 sehen kann.



Abbildung 21: Dichtigkeitsstest von 3D
Cruck Probekörper

Mit diesen positiven Ergebnissen konnten die ersten Rahmenverbinder mit integrierter elektrischer Durchführung gedruckt und in der Praxis getestet werden. Hierbei wurden unterschiedliche Designs erprobt, um eine optimale Lösung zu finden.

2.6.6 Erste Prototypen und Optimierungsansätze

In den ersten Versuchen wurden zweiteilige Rahmenverbinder entwickelt, in die jeweils zwei durchgeführte Lötkontakte für den elektrischen Anschluss integriert wurden, wie man auf Abbildung 22 sehen kann. Der erste Teil dieser Verbinder wurde bei der Verklebung der Zellmatrix an einer definierten Position auf die Glasscheibe geklebt, während das passende Gegenstück später an der Isolierglaslinie in den Rahmen eingesetzt wurde, auf Abbildung 23 zu sehen.

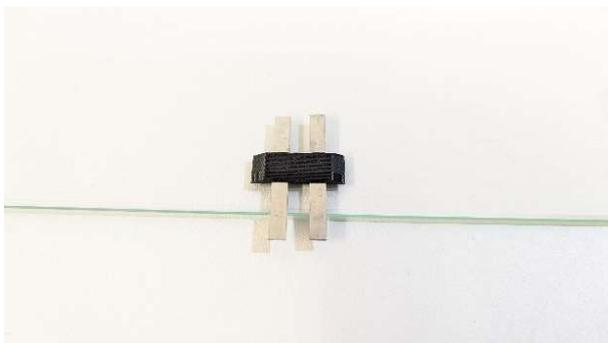


Abbildung 22: Rahmenverbinder Teil 1 mit Lötkontakten

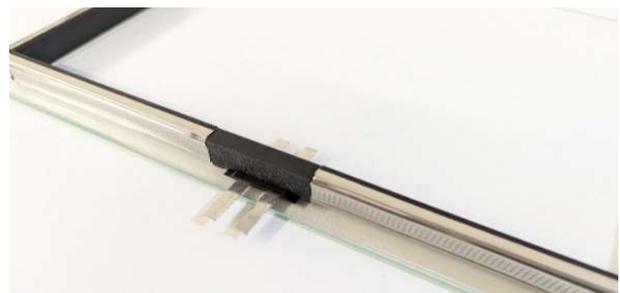


Abbildung 23: Rahmenverbinder Teil 2 mit Isolierglasrahmen

Allerdings zeigte sich bei dieser Methode, dass durch den mehrteiligen Aufbau der Verbinder eine zusätzliche Dichtungsebene entstand, die wiederum eine potenzielle Fehlerquelle für Undichtigkeiten darstellte. Zudem waren bei der Montage an der Isolierglaslinie exakte Positionierungen erforderlich, um eine fehlerfreie Verbindung der beiden Verbinderteile zu gewährleisten. Kleinste Ungenauigkeiten konnten dazu führen, dass der Kontakt nicht richtig hergestellt wurde oder eine Undichtigkeit entstand.

Um diese Problematik zu umgehen, wurde eine alternative Variante entwickelt: ein einteiliger Rahmenverbinder mit integrierten elektrischen Lötkontakten, wie in Abbildung 24 zu sehen. Dies reduziert nicht nur die Anzahl der Dichtungsebenen, sondern minimiert auch mögliche Montagefehler und erhöht die langfristige Dichtigkeit des Systems. Auch hier gab es noch Verbesserungspotenzial, da das Verlöten der Zellmatrix mit den Kontakten im Rahmenverbinder an der Produktionslinie nicht optimal war. Deswegen wurde der Rahmenverbinder mit Gewindestiften wie in Abbildung 25 versehen, somit konnte die Verbindung an der Produktionslinie einfach und schnell über die Verschraubung hergestellt werden.

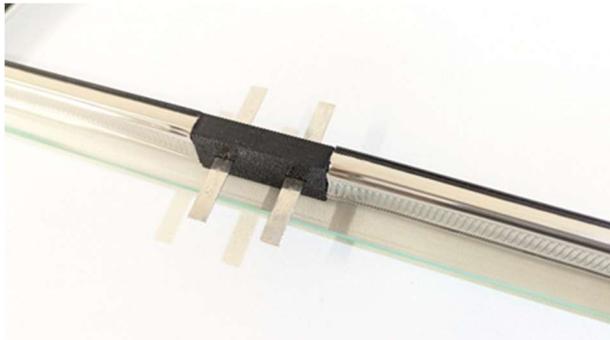


Abbildung 24: Einteiliger Rahmenverbinder mit Lötkontakten

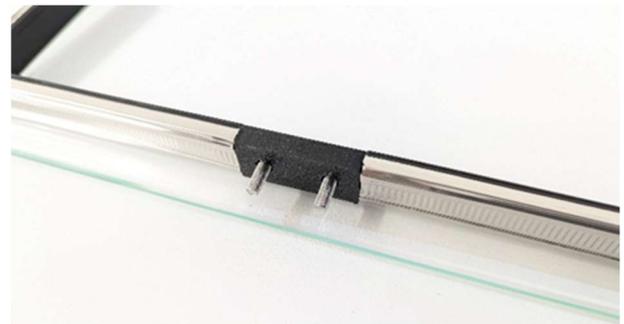


Abbildung 25: Einteiliger Rahmenverbinder mit Schraubkontakten

Weiteres Optimierungspotenzial ergab sich in Bezug auf die Anzahl der notwendigen elektrischen Anschlüsse. In der ursprünglichen Konstruktion mussten pro Anschlusspol jeweils zwei Verbindungen hergestellt werden, da ein Anschluss vor und einer nach der Diode in der Junctionbox angeschlossen werden muss. Dies erhöhte die Komplexität der Installation und steigerte das Risiko von Kontaktproblemen.

2.6.7 Integration der Sperrdioden in die Zellmatrix

Um die elektrische Durchführung noch einfacher zu gestalten, wurde überlegt, die Sperrdioden, die üblicherweise in der Junctionbox integriert sind, direkt in die Zellmatrix zu integrieren. Sperrdioden dienen dazu, die PV-Module bei Verschattungen vor Hotspots zu schützen und sind ein wesentlicher Bestandteil jeder Solaranlage. Durch die direkte Integration der Dioden in die Zellmatrix könnte die Anzahl der benötigten Anschlüsse in zukünftigen Modulen reduziert werden, was die elektrische Durchführung weiter vereinfachen würde. Dadurch würde sich auch der Platzbedarf im Rahmen verringern, was insbesondere bei der Montage in schmalen Fensterprofilen oder Fassadenkonstruktionen vorteilhaft wäre. Abbildung 26 zeigt einen Rahmenverbinder mit nur einem Anschluss.

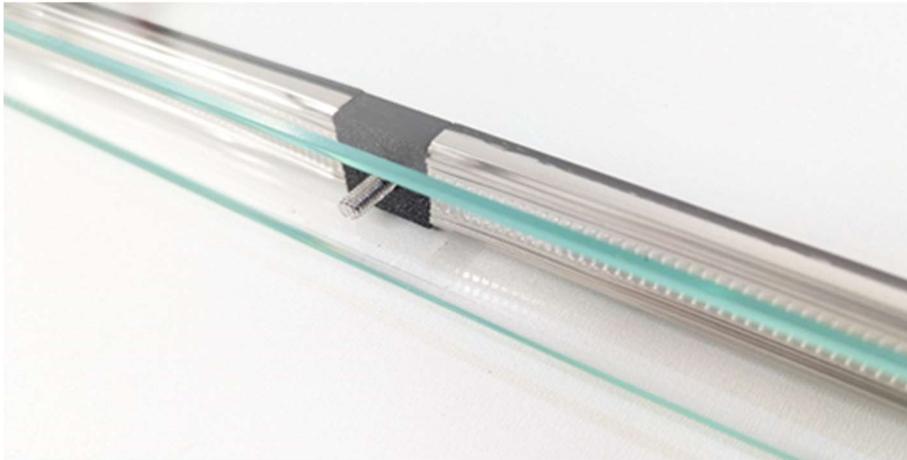


Abbildung 26: Einteiliger Rahmenverbinder mit einem Schraubkontakt

2.6.8 Ergebnisse

Die bisherigen Entwicklungen zeigen vielversprechende Fortschritte bei der Verbesserung der elektrischen Durchführung durch den Isolierglasrahmen. Die Umstellung von einer herkömmlichen Durchführung durch die Randversiegelung hin zu einer Integration in den Rahmen bietet zahlreiche Vorteile in Bezug auf Dichtigkeit, mechanische Stabilität und Installationsfreundlichkeit. Die Entwicklung spezieller Rahmenverbinder, die sowohl mechanisch als auch elektrisch optimiert sind, stellt einen wichtigen Schritt in Richtung einer serienreifen Lösung dar.

Wir sehen in der Idee noch weiteres Potenzial, welches durch weitere Optimierungen und eine noch bessere Integration zu einer möglichst effizienten und zuverlässigen Anschlusslösung führt. Falls notwendig, könnten alternative Materialien für die Rahmenverbinder evaluiert oder Fertigungsprozesse weiter verbessert werden.

Diese Entwicklungen tragen maßgeblich dazu bei, die PV-Iso Scheiben in der Praxis nutzbar zu machen und ihre Integration in Gebäudefassaden und Fensterlösungen zu erleichtern. Mit jeder weiteren Iteration wird das System robuster, effizienter und für eine großflächige Anwendung besser geeignet.

2.6.9 Ausblick

Gegen Ende des Projekts entstand eine vielversprechende neue Idee für die elektrische Verbindung der Solarzellen durch den Isolierglasrahmen. Der bisherige Ansatz mit einer externen Anschlussbox brachte einige Herausforderungen mit sich, insbesondere in Bezug auf Platzbedarf, Ästhetik und Abdichtung. Die neue Idee sieht vor, den Rahmenverbinder zum Scheibenzwischenraum hin so zu erweitern, dass er direkt in die Isolierglaseinheit integriert wird, wie in Abbildung 27 zu sehen.

Durch diese Erweiterung nach innen könnte ein Rahmenverbinder entwickelt werden, der nahezu ohne räumliche Restriktionen auskommt. Dies würde nicht nur den optischen

Eindruck verbessern, sondern auch die Installation vereinfachen. In diesem Konzept könnten die identischen elektrischen Bauteile, die sich normalerweise in einer Standard-Junctionbox befinden, direkt in den Rahmenverbinder integriert werden. Somit würde sich die Anschlussbox, wie sie bislang im Projekt genutzt wurde, erübrigen. Der Verbinder könnte bereits bei der Herstellung schon mit einer Vergussmasse verfüllt werden, was den späteren Einbau an der Isolierglasslinie noch einmal deutlich vereinfachen und beschleunigen würde.

Ein weiterer Vorteil dieser Lösung wäre die Vereinfachung der Kabeldurchführung: Statt einer Anschlussbox müsste lediglich ein einziges Kabel durch die Sekundärdichtung geführt werden. Dies könnte das Risiko von Dichtigkeitsproblemen deutlich reduzieren und gleichzeitig den Fertigungsprozess optimieren.

Da sich das Projekt bereits in der Endphase befand, konnte dieser Ansatz nur konzeptionell erarbeitet werden. Diese Lösung stellt eine vielversprechende Möglichkeit dar, die unbedingt weiterverfolgt werden sollte, um langfristig eine noch effizientere, ästhetisch ansprechendere und technisch optimierte Integration der elektrischen Verbindung in PV-Isolierglasscheiben zu ermöglichen.

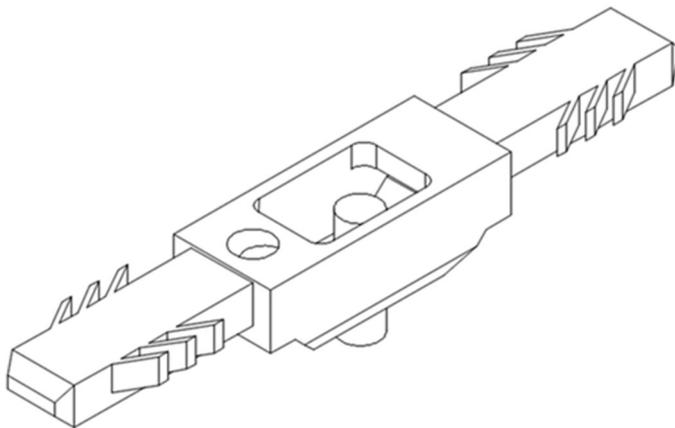


Abbildung 27: Rahmenverbinder mit integrierter Junctionbox

2.7 Prüfung der im Projekt hergestellten Module

Es wurden nach dem Verfahren, das in Kapitel 2.3 beschrieben wurde insgesamt 6 Muster gefertigt und zum ISFH Hameln geliefert. Dort wurden sie einem Isolationstest unterzogen.

2.7.1 Beschreibung des Tests:

Die Isolationmessung dient der Überprüfung des Isolationswiderstands eines elektrischen Systems. Ziel dieses Tests ist es, die Sicherheit und Fehlerfreiheit der Isolation zu gewährleisten und potenzielle Isolationmängel frühzeitig zu erkennen. Insbesondere bei Photovoltaik-Modulen ist eine zuverlässige Isolation essenziell, um elektrische Gefahren wie Leckströme oder Kriechströme zu vermeiden.

2.7.2 Trockentest (Isolationsprüfung unter trockenen Bedingungen)

Der Trockentest überprüft die Berührungssicherheit des Moduls in einer trockenen Umgebung und stellt sicher, dass keine unerwünschten Leckströme über den Modulrahmen oder andere leitende Strukturen auftreten, wie auf Abbildung 28 zu sehen.

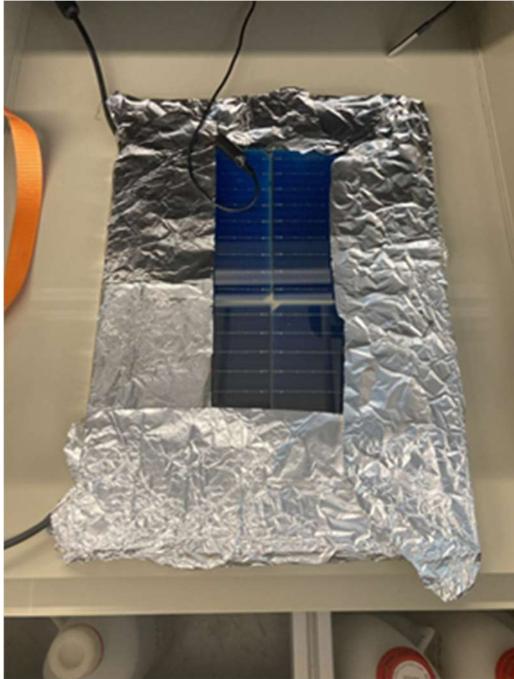


Abbildung 28: Trockentest für Isolationsprüfung
Bild: ISFH, Dr. Kevin Meyer

Versuchsablauf:

- Das Photovoltaik-Modul wird kurzgeschlossen und auf ein definiertes elektrisches Potential gelegt.
- Der Aluminiumrahmen des Moduls wird mit einem anderen elektrischen Potential beaufschlagt.
- Es wird geprüft, ob ein Kriechstrom zwischen den beiden Potentialen fließt.
- Die Prüfung erfolgt mit einer Systemspannung von 1500 V
- Zur Vorbelastung wird das Modul für 1 Minute mit 4000 V vorkonditioniert.
- Anschließend erfolgt die eigentliche Messung mit 1500 V für 2 Minuten.

Der gemessene Isolationswiderstand muss über einem festgelegten Grenzwert liegen, um den Test zu bestehen.

2.7.3 Nasstest (Isolationsprüfung unter feuchten Bedingungen)

Der Nasstest überprüft die Berührungssicherheit des Moduls unter nassen Bedingungen, z. B. nach Regen oder bei hoher Luftfeuchtigkeit. Durch diesen Test soll sichergestellt werden, dass die Isolierung auch bei Feuchtigkeit ausreichend widerstandsfähig bleibt, wie auf Abbildung 29 zu sehen.



Abbildung 29: Nasstest für Isolationsprüfung, Bild: ISFH, Dr. Kevin Meyer

Versuchsablauf:

- Das Photovoltaik-Modul wird kurzgeschlossen und auf ein definiertes elektrisches Potential gelegt.
- Anschließend wird das Modul in Salzwasser eingetaucht, um realistische Umweltbedingungen zu simulieren.
- Ein weiteres Potential wird über eine Platinbrücke im Wasser angelegt.
- Es wird geprüft, ob ein Kriechstrom zwischen den Potentialen fließt.
- Die Messung erfolgt mit 1500 V für 2 Minuten, ohne vorherige Vorkonditionierung.
- Der gemessene Isolationswiderstand muss über dem festgelegten Mindestwert liegen, um den Test zu bestehen.

2.7.4 Bedeutung der Isolationsprüfung

Diese Tests sind essenziell für die elektrische Sicherheit von Photovoltaik-Modulen. Sie gewährleisten, dass keine gefährlichen Kriechströme entstehen, die zu elektrischen Schlägen, Leistungsverlusten oder Schäden an der Anlage führen könnten. Zudem sind sie Teil der Qualitätssicherung und Normenkonformität, insbesondere im Hinblick auf internationale Sicherheitsstandards für PV-Module.

2.7.5 Ergebnisse:

Gemäß IEC 61215 muss der Isolationswiderstand unter trockenen Bedingungen einen Mindestwert von 320 M Ω überschreiten. Die Messungen ergaben für alle sechs getesteten Scheiben deutlich höhere Werte:

Gemessene Isolationswiderstände:

Testscheibe Nr.	1	2	3	4	5	6
Widerstand GΩ	23,3	24,2	25,5	34,2	35,0	29,4

Tabelle 3: Gemessene Isolationswiderstände im Trockentest

Ergebnis: Alle Module haben die Anforderungen erfüllt und zeigen eine sehr hohe elektrische Isolation.

Isolationswiderstand unter nassen Bedingungen. Auch hier muss gemäß IEC 61215 ein Isolationswiderstand von mindestens 320 MΩ überschritten werden. Die gemessenen Werte liegen deutlich über diesem Grenzwert:

Gemessene Isolationswiderstände:

Testscheibe Nr.	1	2	3	4	5	6
Widerstand GΩ	5,6	7,4	5,8	5,9	6,5	6,2

Tabelle 4: Gemessene Isolationswiderstände im Nasstest

Ergebnis: Alle sechs getesteten Scheiben erfüllen die Normvorgaben und weisen eine ausreichend hohe Isolation unter Feuchtigkeitseinfluss auf.

2.8 Recycling von Solarmodulen

2.8.1 Herausforderungen und Lösungsansätze

Die Nutzung von Photovoltaikanlagen hat in den letzten Jahrzehnten weltweit stark zugenommen. Diese Entwicklung ist ein wichtiger Beitrag zur Energiewende, da Solarmodule eine nachhaltige, emissionsfreie und erneuerbare Energiequelle darstellen. Mit dem Wachstum dieser Technologie entsteht jedoch auch eine neue Herausforderung: Was passiert mit ausgedienten Solarmodulen?

Da Solarmodule eine Lebensdauer von 20 bis 30 Jahren haben, wird das Recycling von Photovoltaik-Abfällen in den kommenden Jahren immer relevanter.

Die Internationale Organisation für erneuerbare Energien (IRENA) schätzt, dass weltweit bis 2030 mindestens 1,7 Millionen Tonnen Solarmodule entsorgt und recycelt werden müssen. Bis 2050 seien es dann wohl schon 60 Millionen Tonnen. Bei diesen Zahlen sind die Module die frühzeitig ausgemustert werden müssen noch nicht berücksichtigt.

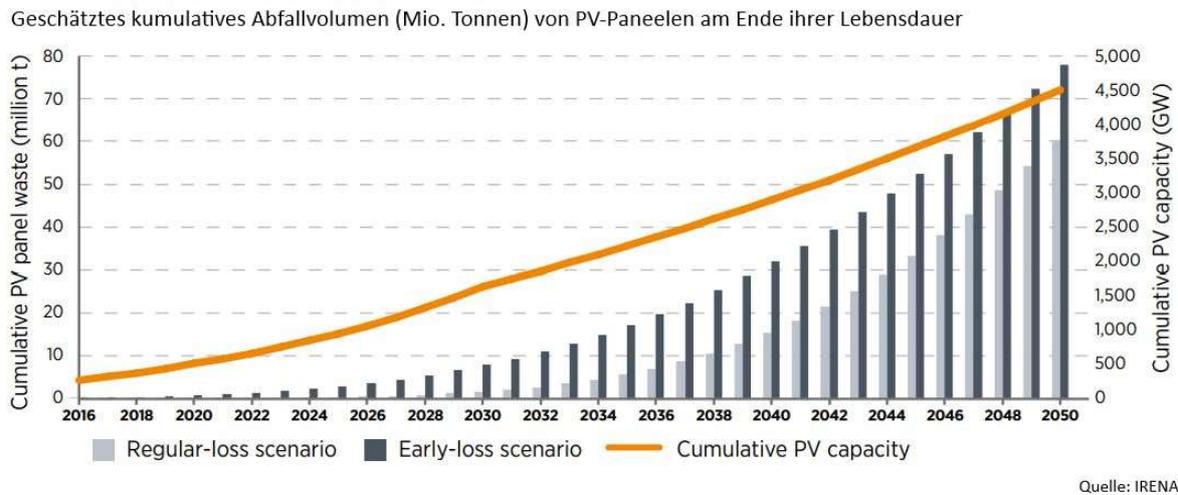


Abbildung 30: END-OF-LIFE MANAGEMENT Solar Photovoltaic Panels

Eine effiziente Wiederverwertung der wertvollen Rohstoffe in den Modulen kann nicht nur zur Ressourcenschonung beitragen, sondern auch die Umweltbelastung durch unsachgemäße Entsorgung minimieren. Dieser Text beleuchtet die Herausforderungen und Lösungsansätze im Bereich des Solarmodul-Recyclings.

2.8.2 Zusammensetzung von Solarmodulen

Ein Solarmodul besteht aus einer Vielzahl unterschiedlicher Materialien, die miteinander verbunden sind. Die wichtigsten Bestandteile sind:

- Glas (~70 % des Gesamtgewichts)
- Silizium (Halbleitermaterial in den Solarzellen)
- Aluminium (Rahmen)
- Kunststoffe (Rückseitenfolien, Verkapselungsmaterial)
- Kupfer, Silber und Zinn (Leiterbahnen und Kontakte)
- Schwermetalle wie Cadmium oder Blei (in bestimmten Modultypen)

Diese komplexe Materialzusammensetzung macht das Recycling anspruchsvoll, da eine saubere Trennung der Materialien erforderlich ist, um sie wiederzuverwenden oder umweltfreundlich zu entsorgen.

2.8.3 Technische Herausforderungen

Das Recycling von Solarmodulen erfordert spezialisierte Verfahren zur Materialtrennung und Rückgewinnung, um wertvolle Rohstoffe effizient wiederzuverwerten. Derzeit existieren drei Hauptmethoden, die jeweils spezifische Vor- und Nachteile haben:

- **Mechanische Verfahren:** Hierbei werden die Solarmodule zerkleinert, um Glas und Aluminium vom Rest zu trennen. Diese Methode ist kostengünstig und relativ einfach umzusetzen, hat jedoch den Nachteil, dass nicht alle wertvollen Materialien, insbesondere Halbleiter und Edelmetalle, effizient zurückgewonnen werden können. Zudem kann das gewonnene Glas durch Verunreinigungen in seiner Qualität beeinträchtigt sein (Downcycling).
- **Thermische Verfahren:** Durch Erhitzung auf hohe Temperaturen werden die Kunststoffe in den Modulen verdampft oder verbrannt, sodass Metalle, Glas und andere Bestandteile getrennt werden können. Während diese Methode eine effektive Materialrückgewinnung ermöglicht, ist sie sehr energieintensiv und kann schädliche Emissionen freisetzen, wenn keine geeigneten Filtersysteme eingesetzt werden.
- **Chemische Verfahren:** In diesem Ansatz werden chemische Lösungsmittel oder Säuren eingesetzt, um gezielt Metalle und Halbleitermaterialien wie Silizium, Silber oder Indium aus den Modulen zu extrahieren. Obwohl diese Methode eine besonders hohe Rückgewinnungsquote bietet, sind die Kosten für die chemische Aufbereitung hoch. Zudem kann der Einsatz von aggressiven Chemikalien problematisch für die Umwelt sein, falls keine nachhaltigen Alternativen genutzt werden.

Da jedes Verfahren Vor- und Nachteile hat, gibt es derzeit keine einheitliche Standardlösung für das Recycling von Solarmodulen.

2.8.4 Wirtschaftliche Herausforderungen

Ein weiteres Problem sind die hohen Kosten des Recyclings im Vergleich zur Herstellung neuer Solarmodule. Gründe hierfür sind:

- Der niedrige Materialwert von recyceltem Silizium und Glas
- Hohe Investitionskosten für spezialisierte Recyclinganlagen
- Der sinkende Preis neuer Photovoltaikmodule, wodurch Recycling wirtschaftlich unattraktiver wird

Da es für viele Unternehmen aktuell wirtschaftlich günstiger ist, alte Solarmodule einfach zu entsorgen, fehlt der Anreiz für ein effizientes Recycling.

2.8.5 Gesetzliche und regulatorische Rahmenbedingungen

Die gesetzlichen Vorgaben für das Recycling von Solarmodulen sind weltweit unterschiedlich geregelt:

- Europäische Union: Die WEEE-Richtlinie (Waste Electrical and Electronic Equipment) verpflichtet Hersteller zur Rücknahme und fachgerechten Entsorgung alter Solarmodule.
- USA: Es gibt keine einheitlichen nationalen Vorschriften, sondern nur einzelne Bundesstaaten mit eigenen Regelungen.
- China und Indien: Als größte Hersteller von Solarmodulen gibt es noch keine flächendeckenden Recycling-Vorschriften.

Ein internationaler Standard für das Recycling von Solarmodulen könnte dazu beitragen, Prozesse effizienter zu gestalten und die weltweite Recyclingquote zu erhöhen.

2.8.6 Mangelnde Infrastruktur und Recyclingkapazitäten

Ein weiteres Hindernis ist die unzureichende Infrastruktur für das Recycling von Solarmodulen.

- Es gibt weltweit nur wenige spezialisierte Recyclinganlagen, die sich auf die Wiederverwertung von Photovoltaikmodulen spezialisiert haben.
- Viele ausgediente Module landen immer noch auf Deponien, anstatt recycelt zu werden.
- Der Ausbau von Recyclingkapazitäten erfordert hohe Investitionen, die derzeit nur begrenzt erfolgen.

Ohne bessere Lösungen wird es schwierig sein, die steigenden Mengen an Photovoltaik-Abfällen nachhaltig zu verwerten.

2.8.7 Zukunftsperspektiven und Lösungsansätze

Um das Recycling von Solarmodulen effizienter und wirtschaftlich attraktiver zu machen, sind verschiedene Maßnahmen erforderlich:

- Innovative Recyclingtechnologien: Neue Verfahren zur besseren Trennung und Rückgewinnung von Materialien könnten die Wirtschaftlichkeit des Recyclings verbessern.
- Design for Recycling: Hersteller sollten bereits bei der Produktion darauf achten, dass Module später einfacher zu recyceln sind. Beispielsweise könnten modulare Bauweisen oder lösbare Verkapselungen eingesetzt werden.
- Wirtschaftliche Anreize: Subventionen oder Steuervorteile für Unternehmen, die in Recyclingtechnologien investieren, könnten das Wachstum der Branche fördern.
- Verbindliche Recyclingquoten: Gesetzliche Vorgaben, die Hersteller zur Verwendung recycelter Materialien verpflichten, könnten den Recyclingmarkt stärken.

2.8.8 Ergebnisse

Das Recycling von Solarmodulen ist eine komplexe Herausforderung, die sowohl technische, wirtschaftliche als auch gesetzliche Aspekte umfasst.

Damit die steigende Anzahl an ausgedienten Modulen nachhaltig entsorgt werden kann, braucht es eine Kombination aus:

- Effizienteren Recyclingverfahren
- Wirtschaftlichen Anreizen für Unternehmen
- Klare gesetzliche Vorgaben und internationale Standards

Langfristig könnte eine optimierte Kreislaufwirtschaft dazu beitragen, dass Photovoltaik-Technologie nicht nur klimafreundlich in der Nutzung, sondern auch in der Entsorgung nachhaltig wird.

2.9 Recycling des PV-Iso

2.9.1 Recyclingmöglichkeiten von Isolierglas

„Welche Möglichkeiten für das Recycling von Isolierglasscheiben gibt es bereits und was ist zusätzlich noch erforderlich um die darin befindlichen Solarzellen zu recyceln.“

2.9.2 Recycling von Glas

Weltweit werden jährlich derzeit etwa 130 Millionen Tonnen Glas produziert. Wesentliche Anteile hieran machen mit etwa 48 Prozent die Hohl- bzw. Behälterglasherstellung und 42 Prozent die Flachglasproduktion. Die Produktion von Flachglas ist energieintensiv: Während die Schmelztemperatur von Quarzglas aus reinem Siliziumdioxid (SiO₂) bei über 1700 °C liegt, kann diese für Kalk-Natron-Silikatglas durch die Beimengung sogenannter Netzwerkwandler und Eigenscherven in das Rohstoffgemenge auf nur 1.100 °C reduziert werden. Denn Glasscherben schmelzen bei geringeren Temperaturen als die ursprünglichen Rohstoffe Sand, Soda und Kalk. In Abhängigkeit vom erzielten Reinheitsgrad der Scherben aus dem Altglasrecycling lässt sich Glas beliebig oft einschmelzen und zu neuen Produkten verarbeiten. 1 kg Scherben ersetzen dabei rund 1,2 kg Rohstoffe für die Glasherstellung.

2.9.3 Flachglasproduktion

Die Anforderungen an das Recyclingmaterial in der Flachglasproduktion sind im Gegensatz zur Behälterglasproduktion deutlich höher. Produktionsscherben – auch bekannt als Eigenscherven – gelangen zurück in den Produktionskreislauf, da sie in der Regel sortenrein und frei von Verunreinigungen sind. Bei Altglas, etwa aus dem Abbruch von Gebäuden, muss die Recyclatqualität vor der Verwendung sorgfältig geprüft werden: Die meisten Glashütten akzeptieren eine Verunreinigung aus Keramik, Steinen und Porzellan der sogenannte KSP-Anteil von maximal fünf Gramm/Tonne. Daher findet Altglas in der Flachglasproduktion nur nach einer fachgerechten Aufbereitung Anwendung.

2.9.4 Alternatives Konzept: Reuse von Glas

Neben dem Einschmelzen von Flachglasabfällen rücken auch die Potenziale zur Wiederverwendung und/oder Wiederaufbereitung in den Fokus. Dabei wird unter Wiederverwendung verstanden, dass ein Produkt ohne weitere Bearbeitung mehr als einmal für seinen ursprünglichen Zweck verwendet wird. Im Gegensatz dazu meint die Wiederaufbereitung die Weiterverarbeitung gebrauchter Produkte. Bedingt durch die Tatsache, dass Glasprodukte im Bauwesen in der Regel in allen Belangen (z. B. Abmessung, Beschichtungen, Glasaufbauten, Glasarten, etc.) objektspezifisch nach Maß gefertigt werden, sind die Möglichkeiten der Wiederverwendung eingeschränkt, weshalb der Prozess der Wiederaufbereitung bislang einfacher umsetzbar ist.“

(<https://www.baunetzwissen.de/glas/fachwissen/herstellung-eigenschaften/recycling-von-glas-2445257>)

2.9.5 Hegla IG2Pieces Anlagenlösung für das automatische Isolierglastrennen

- Vollautomatisches Trennen von Isolierglas

Als Basis für das vollautomatische Auftrennen wird das Isolierglas in liegender Position systemgesteuert vermessen, wobei der gesamte Aufbau der Isolierglaseinheit erfasst wird. Durch das Trennverfahren wurde eine technische Lösung entwickelt, die eine automatisierte Zerlegung von Isolierglas in seine einzelnen Komponenten ermöglicht. Diese Methode stellt sicher, dass die Scheiben während der Separation unbeschädigt bleiben und nur minimale Rückstände der Versiegelungsmasse auf der Glasoberfläche zurückbleiben.

- Getrennte Wiederverwertung – Nachhaltige Nutzung gewonnener Rohstoffe

Sobald die einzelnen Bestandteile des Isolierglases erfolgreich voneinander getrennt wurden, eröffnen sich verschiedene Möglichkeiten zur Weiterverarbeitung und Wiederverwertung der gewonnenen Materialien. Hierbei spielen die zuvor erfassten Daten aus der Vermessung des Isolierglases eine entscheidende Rolle. Neben grundlegenden Parametern wie Länge, Breite und Dicke der Glasscheiben wird auch erfasst, ob eine spezielle Beschichtung oder eine Verbundglasstruktur vorhanden ist. Diese Informationen ermöglichen eine gezielte und effiziente Sortierung der Materialien für den nachfolgenden Verwertungsprozess.

Durch diese konsequente Trennung und Wiederverwertung wird der Wertstoffkreislauf effektiv geschlossen. Das zurückgewonnene Glas kann in der Glasindustrie erneut genutzt werden, beispielsweise indem es über die Floatwanne in die Herstellung neuer Glasprodukte einfließt. Besonders bedeutsam ist dieser Prozess auch aus ökologischer Sicht: Jedes Kilogramm Floatglas, das aus recyceltem Altglas anstelle von Primärrohstoffen hergestellt wird, reduziert den CO₂-Ausstoß um rund 0,3 kg. Dies trägt nicht nur zur Senkung der Umweltbelastung bei, sondern kann auch positive Auswirkungen auf die CO₂-Zertifizierung von Unternehmen haben, die auf nachhaltige Produktionsmethoden setzen.

- Wiederverwendung spart noch mehr Energie und Rohstoffe – Nachhaltige Nutzung hochwertiger Glasscheiben

Besonders bei großformatigen, teuren oder spezialbeschichteten Scheiben stellt die Wiederverwendung eine äußerst sinnvolle Alternative zur herkömmlichen Entsorgung oder dem Recycling dar. Die Wiederverwendung großflächiger oder hochwertiger Glasscheiben ist keineswegs ein neues Konzept, bereits seit Jahrzehnten werden seltene oder besonders teure Gläser in aufwendiger Handarbeit zurückgewonnen und wiederverwendet. Allerdings war dieser Prozess bislang stark von der Erfahrung und Fingerfertigkeit der Fachkraft abhängig, was die Wirtschaftlichkeit einschränkte. Durch den technologischen Fortschritt und innovative Trennverfahren wie IG2Pieces kann dieser Prozess nun effizienter, schneller und präziser durchgeführt werden, wodurch die Wirtschaftlichkeit erheblich steigt.

Neben der direkten Wiederverwendung in anspruchsvollen Projekten gibt es zudem die Möglichkeit, aufbereitete Gläser für weniger anspruchsvolle Anwendungen einzusetzen. So können Glasreste oder ältere Scheiben beispielsweise in Innenräumen oder für nichttragende Konstruktionen verwendet werden, wo höchste optische Perfektion nicht zwingend erforderlich ist. Auf diese Weise wird nicht nur der Wertstoffkreislauf erweitert, sondern

auch eine ressourcenschonende Lösung geschaffen, die ökologische und wirtschaftliche Vorteile miteinander vereint.

Ein analoges manuelles System existiert auch von der Firma Lisec.

2.9.6 Trennung von Glas und Solarzellen – Optimierung für Wiederverwendung und Recycling

Nachdem es bereits etablierte und effiziente Verfahren zur Wiederverwertung von Isolierglas gibt, wurde der Fokus verstärkt auf die Separierung von Glas und Solarzellen gelegt. Ziel war es, ein Verfahren zu entwickeln, das sowohl eine saubere Trennung der Materialien als auch eine wirtschaftliche und nachhaltige Weiterverarbeitung ermöglicht.

Ein zentraler Aspekt dieser Untersuchungen war die Frage, welche Methoden sich am besten eignen, um die Solarzellen vom Glas zu lösen und wie sauber das Glas nach der Trennung bleibt. Rückstände auf der Glasoberfläche könnten die Qualität der weiteren Verarbeitung beeinträchtigen sowohl bei der Wiederverwendung des Glases als auch beim Recycling. Insbesondere für das Recycling ist es vorteilhaft, wenn die Gläser möglichst frei von Kleberesten oder anderen Verunreinigungen sind.

Um eine fundierte Entscheidungsgrundlage zu erhalten, wurden Testmuster wie in Abbildung 31 angefertigt, mit denen unterschiedliche Trennmethoden erprobt wurden.



Abbildung 31: Testmuster für Ablöseversuche

Die wichtigsten getesteten Verfahren waren:

1. Trennung durch hohen Luftdruck

Ein erster Ansatz bestand darin, die Solarzellen mittels Luftdrucks von der Glasscheibe zu lösen. Dieses Verfahren zeigte sich als besonders effektiv, da der hohe Druck die Zellen sofort zerstörte und sie sich in kleinen Fragmenten von der Glasoberfläche lösten, wie man auf Abbildung 32 gut erkennen kann. Allerdings hatte diese Methode einige Herausforderungen und Nachteile:

Der hohe Druck führte dazu, dass die Solarzellen unkontrolliert durch die Umgebung geschleudert wurden, was eine geschlossene Arbeitsumgebung oder spezielle Schutzvorrichtungen erfordert.

Die Klebepunkte, mit denen die Zellen auf dem Glas fixiert waren, blieben mit Zellrückständen auf dem Glas zurück wie Abbildung 33 zeigt. Diese mussten in einem zweiten Schritt mechanisch entfernt werden, was den Prozess verlängerte.

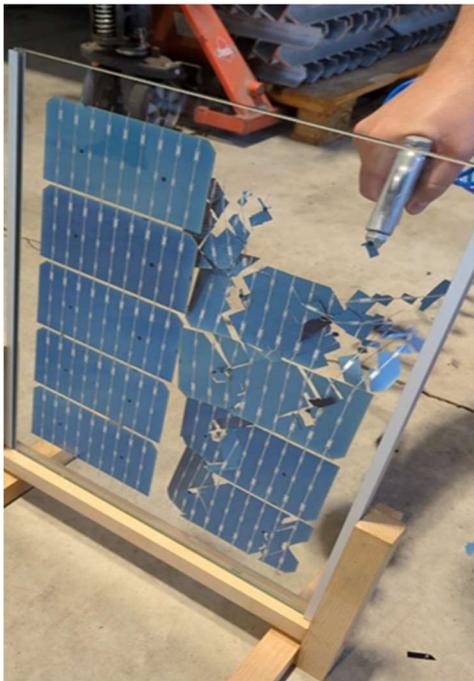


Abbildung 32: Ablöseversuch mit Luftdruck



Abbildung 33: Rückstände auf Glas nach Ablöseversuch mit Luftdruck

Die Glasscheibe wurde zwar nicht beschädigt, allerdings war eine Nachbearbeitung mit einem Glasschaber oder Spachtel notwendig, um die restlichen Klebstofffragmente sowie kleine Zellrückstände die an dem Klebstoff zurück blieben zu entfernen.

Dieses Verfahren zeigte, dass eine Kombination mit einer weiteren Reinigungstechnologie erforderlich wäre, um ein vollständig sauberes Glas zu erhalten. Zusätzlich besteht hier noch das Risiko mit dem Glasschaber Kratzer auf dem Glas zu hinterlassen.

2. Mechanische Entfernung mittels Glasschaber

Eine weitere getestete Methode war der direkte mechanische Abtrag der Solarzellen mit einem Glasschaber. Hierbei wurde versucht, die Zellen direkt von der Glasoberfläche zu lösen, ohne zuvor eine Vorbehandlung wie Luftdruck oder Hitze einzusetzen. In der Abbildung 34 zu sehen.

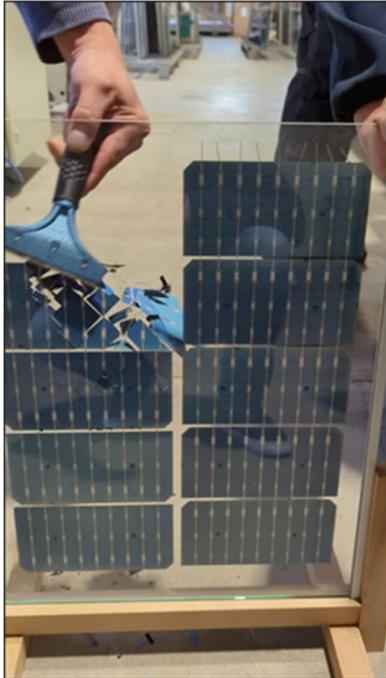


Abbildung 34: Ablöseversuch mit Glasschaber

Ergebnisse und Vorteile dieser Methode:

Die Zellen ließen sich mit gleichmäßigem Druck sehr gut abtragen, was weniger Schmutz und Rückstände auf dem Glas hinterließ.

Im Gegensatz zur Luftdruck-Methode fielen keine umherfliegenden Splitter an, was die Arbeitssicherheit und Sauberkeit der Umgebung verbesserte.

Nach der Entfernung der Solarzellen blieb das Glas weitgehend frei von Rückständen, sodass kein weiterer Reinigungsprozess notwendig war.

Herausforderungen:

Zur Anwendung dieser Methode ist eine Automatisierung erforderlich, da der Prozess langsamer verlief als die Luftdruck-Methode. Zusätzlich besteht hier noch das Risiko mit dem Glasschaber Kratzer auf dem Glas zu hinterlassen.

3. Ablösung durch Hitzeeinwirkung

Ein weiterer erfolgversprechender Ansatz war die Erwärmung der Klebeschicht mit einer Heißluftpistole. Durch die Erwärmung wurde der Klebstoff weich, wodurch sich die Solarzellen vom Klebstoff lösten und von selbst von der Glasoberfläche abfielen.

Vorteile dieser Methode:

Die Solarzellen konnten meist in einem Stück entfernt werden, wodurch keine Bruchstücke oder feine Zellreste auf der Glasoberfläche verblieben.

Die Klebepunkte wurden durch die Hitze aufgeweicht, sodass sie sich im Anschluss sehr einfach mit einem Glasschaber entfernen ließen.

Die Methode zeigte sich als sehr schonend für das Glas, da weder große mechanische Kräfte noch aggressive Chemikalien verwendet wurden.

Nachteile und Herausforderungen:

Die Erwärmung des Klebstoffs nahm etwas mehr Zeit in Anspruch als die anderen Methoden, da die Klebepunkte nicht direkt, sondern nur über die Solarzellen oder das Glas erhitzt werden können.

	Anwendung	Effizienz	Sauberkeit Glas	Beschädigung Glas	Automatisierung
Luftdruck	++	+	+	-	++
Mechanisch/Schaber	+	++	++	-	+
Hitze	++	+	+	++	++

Tabella 5: Vor- und Nachteile der getesteten Ablösemethoden

2.9.7 Ergebnisse

Nach den durchgeführten Tests zeigten sich deutliche Unterschiede in den Methoden zur Trennung der Solarzellen vom Glas. Das Erhitzen des Klebstoffs erwies sich als die schonendste und effektivste Lösung, da sie eine einfache Ablösung ohne Zellrückstände ermöglichte und die anschließende Reinigung des Glases erleichterte. Allerdings nimmt dieses Verfahren etwas mehr Zeit in Anspruch, was für eine industrielle Umsetzung berücksichtigt werden muss.

Die Luftdruck-Methode hingegen war am schnellsten, erforderte jedoch eine Nachbearbeitung zur Entfernung der Klebereste. Die mechanische Entfernung mittels Glasschaber war ebenfalls sehr effektiv, jedoch weniger effizient für eine großflächige, automatisierte Anwendung.

Es hat sich gezeigt, dass es mehrere effektive Methoden gibt, um die Solarzellen von den Glasscheiben zu trennen und somit das Recycling der PV-Isolierglasscheiben zu ermöglichen. Dabei wurden verschiedene Ansätze getestet, darunter mechanische, thermische und pneumatische Verfahren. Jede Methode hat spezifische Vor- und Nachteile hinsichtlich

Effizienz, Rückstandsbildung und Automatisierbarkeit. Entscheidend für eine nachhaltige Recyclinglösung ist nicht nur die saubere Trennung der Materialien, sondern auch die Möglichkeit, die Verfahren wirtschaftlich und im industriellen Maßstab umzusetzen. Die gewonnenen Erkenntnisse bilden eine wichtige Grundlage für die Weiterentwicklung effizienter Recyclingprozesse in der Photovoltaikbranche.

2.9.9 Entwicklung einer eigenen Recyclinglösung für PV-Iso-Scheiben aus Sicherheitsglas

PV-Iso-Scheiben bestehen aus gehärtetem Sicherheitsglas, wodurch sich besondere Herausforderungen und zugleich neue Möglichkeiten für das Recycling dieser Module ergeben. Im Rahmen der Entwicklung einer nachhaltigen Verwertungsmethode wurde dann im Projekt ein innovativer Prozess konzipiert, der gezielt die spezifischen Materialeigenschaften nutzt, um eine effiziente Trennung und Wiederverwertung der Komponenten zu ermöglichen.

Der Recyclingprozess basiert auf einer mehrstufigen Trennung der einzelnen Bestandteile des PV-Iso-Moduls. Hierzu wird das Modul zunächst auf ein speziell entwickeltes Gestell gelegt, das eine schräg geneigte Position gewährleistet. Diese Anordnung ermöglicht einen kontrollierten Ablauf des Trennverfahrens und erleichtert die Separierung der unterschiedlichen Materialien, wie man auf der Abbildung erkennen kann.

In der ersten Verarbeitungsstufe erfolgt die gezielte Zerstörung der vorderen Glasscheibe. Da es sich um gehärtetes Sicherheitsglas handelt, zerfällt die Scheibe in kleine, nicht scharfkantige Fragmente, die anschließend in einen dafür vorgesehenen Container geleitet werden. Die Trennung der Glaspartikel ermöglicht eine sortenreine Sammlung, die eine Wiederverwertung innerhalb der Glasindustrie erleichtert.

Nach der Entfernung der ersten Glasscheibe wird in der zweiten Station die aktive Schicht des Moduls, bestehend aus den Solarzellen, separiert, siehe Kapitel 2.9.6. Die Solarzellen werden in einem separaten Behälter gesammelt, um eine möglichst hohe Reinheit der Materialien zu gewährleisten.

Im dritten Schritt erfolgt die Zerstörung der zweiten, hinteren Glasscheibe, die ebenfalls in einen separaten Container fällt. Da Front- und Rückglas sich häufig unterscheiden stellt dies sicher, dass auch hier eine möglichst sortenreine Sammlung erfolgt, wodurch die Qualität des zurückgewonnenen Materials optimiert wird.

In der letzten Phase des Recyclingprozesses wird der verbleibende Isolierglasrahmen entfernt und gesondert entsorgt. Dieser Rahmen, der in der Regel aus Aluminium oder Kunststoff besteht und mit einem Trockenmittel gefüllt ist, kann dann ebenfalls dem Recycling zugeführt werden.

Durch die konsequente Trennung der einzelnen Komponenten wird eine hocheffiziente Wiederverwertung der Rohstoffe ermöglicht, wodurch nicht nur Materialverluste minimiert, sondern auch die Umweltbelastung reduziert wird. Dieser innovative Recyclingansatz trägt zur Kreislaufwirtschaft bei, indem wertvolle Ressourcen aus ausgedienten PV-Iso-Modulen zurückgewonnen und einer erneuten Nutzung zugeführt werden.

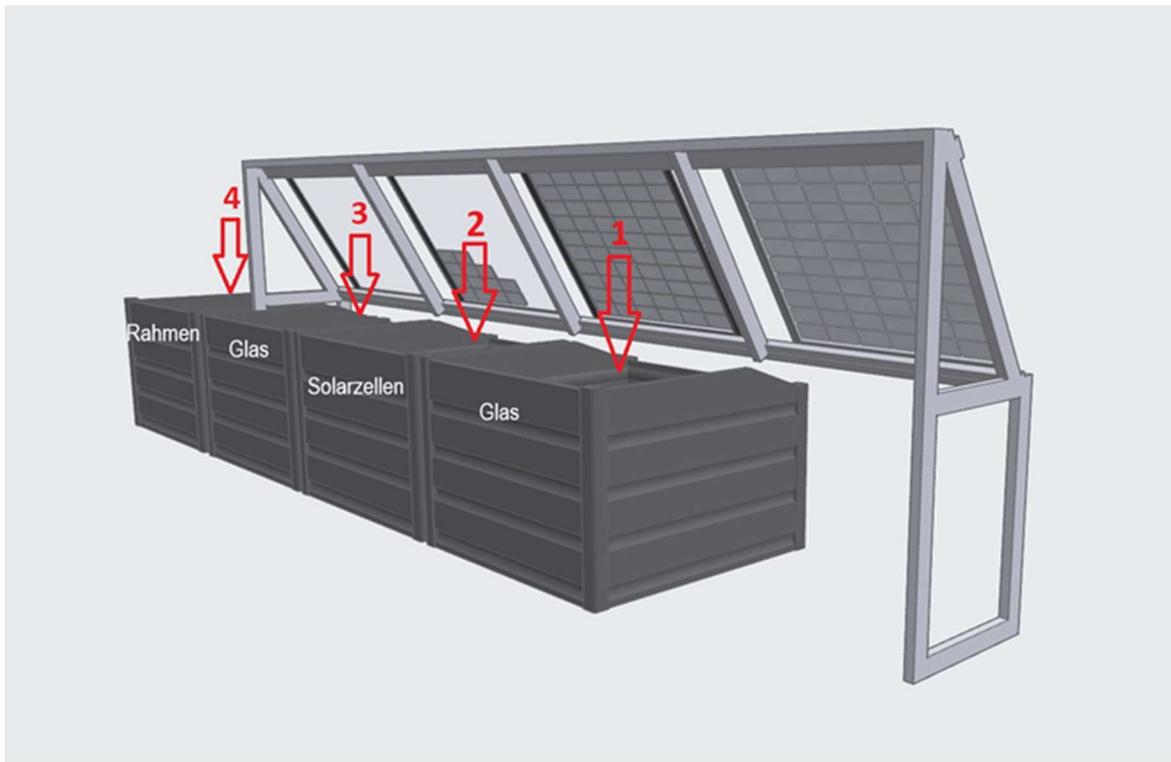


Abbildung 35: Material Trennstation für das Recycling von PV-Isolierglas

2.10 Verbreitung der Vorhabensergebnisse

Für die Verbreitung der Vorhabensergebnisse sind verschiedene Maßnahmen vorgesehen, um eine möglichst breite Öffentlichkeit und relevante Fachkreise zu erreichen.

Bereits im Januar 2025 wurde das Projekt auf der Baumesse in München präsentiert. Am Messestand des Flachglas Markenkreises konnten Besucher die PV-Isolierglasscheiben kennenlernen und sich über die technischen Innovationen informieren. Die Resonanz war vielversprechend, sodass weitere Messebesuche geplant sind, um die Projektergebnisse einem noch größeren Publikum vorzustellen.

Neben den Messeauftritten spielt auch die Veröffentlichung in Fachzeitschriften eine zentrale Rolle. Im Herbst 2025 sollen detaillierte Artikel erscheinen, die sowohl die technische Umsetzung als auch die potenziellen Anwendungsbereiche beleuchten. Ein erster Beitrag ist bereits fest für die Fachzeitschrift Glaswelt eingeplant. Weitere Publikationen sind in Vorbereitung, um die Erkenntnisse einer breiten Fachleserschaft zugänglich zu machen.

Zusätzlich wird geprüft, inwiefern die digitalen Kanäle stärker genutzt werden können, beispielsweise durch Beiträge auf branchenrelevanten Webseiten, Fachforen oder Social-Media-Plattformen. So könnten nicht nur Experten aus der Glas- und Solarbranche, sondern auch Architekten, Bauherren und Investoren gezielt angesprochen werden.

Zu Demonstrationszwecken wurden PV-Isolierglasscheiben in unserem Technikum installiert. Diese ermöglichen es, die Technologie und deren Funktionsweise unter realen Bedingungen zu beobachten. Interessierte haben die Möglichkeit, die installierten Module vor Ort zu besichtigen und sich ein genaues Bild von deren Aufbau und Leistung zu machen. Dies bietet eine praxisnahe Gelegenheit, um die Integration von Photovoltaik in Isolierglas sowie deren Potenzial für verschiedene Anwendungen besser zu verstehen.



Abbildung 36: PV-Isos auf dem Messestand Bau Messe München 2025

3. Fazit

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde ein innovatives Photovoltaik-Modul entwickelt, das von Beginn an auf eine optimierte Recyclingfähigkeit ausgelegt wurde. Die Designstrategie zielte darauf ab, eine sortenreine Trennung der verwendeten Materialien zu ermöglichen, wodurch die Wiederverwertung wertvoller Rohstoffe, wie Glas, Silizium und Silber, erheblich vereinfacht wird. Im Projekt konnte nicht nur die grundsätzliche Recyclingfähigkeit des Moduls experimentell nachgewiesen, sondern auch ein systematischer Recyclingprozess erarbeitet werden.

Die mechanische und elektrische Stabilität des Moduls wurde durch Prüfverfahren erfolgreich validiert. Durch die Integration der Solarzellen in ein Standard Isolierglas, ein jahrzehntelang erprobtes Bauprodukt, wird auch eine langfristige Funktionssicherheit gewährleistet.

Im internationalen Markt existiert derzeit kein anderes PV-Modul, das eine vergleichbare Recyclingfähigkeit bietet. Dies unterstreicht den einzigartigen Innovationscharakter der entwickelten Lösung. Die Einführung des Moduls in den Markt ist bereits im Gange, beginnend mit der Präsentation auf der Bau 2025, einer der weltweit führenden Fachmessen für Architektur, Materialien und Systeme.

Zukünftige Herausforderungen und Weiterentwicklung

Für eine erfolgreiche Industrialisierung des neuartigen Moduls sind weitere Entwicklungsmaßnahmen sinnvoll. Insbesondere sind dies die folgenden Aspekte:

Modulare elektrische Durchführung:

Die Weiterentwicklung einer modularen und standardisierten elektrischen Kontaktierung ermöglicht eine effizientere automatisierte Fertigung.

Integration in eine Isolierglas-Produktionslinie:

Die Anpassung des Moduls an bestehende Produktionsprozesse für Isolierglas ist notwendig, um eine serienfähige und wirtschaftlich skalierbare Herstellung zu realisieren.

4. Literaturverzeichnis

- [AMT12] AMTSBLATT DER EUROPÄISCHEN UNION (24.07.2012): Richtlinie 2012/19/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 4. Juli 2012 über Elektro- und Elektronik-Altgeräte. [online] Homepage: Eur-Lex.europa.eu URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0019> [PDF-Datei] [Stand 28.03.2025]
- [BS17] BENZ-ZAUNER M. und SCHAEFFER H.A.: Glastechnik – Flachglas Band 3, 2. Edition 2017
- [BUN15] BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ SOWIE DES BUNDESAMTES FÜR JUSTIZ (20.10.2015): Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten (Elektro- und Elektronikgerätegesetz - ElektroG). [online] Homepage: Gesetze im Internet URL: https://www.gesetze-im-internet.de/elektrog_2015/ElektroG.pdf [PDF-Datei] [Stand 28.03.2025]
- [FLA25] FLACHGLAS MARKENKREIS GMBH: Glashandbuch Online 2025. [online] Homepage: Flachglas Markenkreis URL: <https://flachglas-markenkreis.de/glasservice/info-material/glashandbuch-online/> [Stand 28.03.2025]
- [KAV25] KAVERMANN Y.: Klimabelastungen bei Isolierglasscheiben. [online] Homepage: Baunetz Wissen URL: <https://www.baunetzwissen.de/glas/fachwissen/sicherheit-tragfaehigkeit/klimabelastungen-bei-isolierglasscheiben-159324> [Stand 28.03.2025]
- [KAV25] KAVERMANN Y.: Isolierglas. [online] Homepage: Baunetz Wissen URL: <https://www.baunetzwissen.de/glas/fachwissen/funktionsglaeser/isolierglas-159107> [Stand 28.03.2025]
- [KAV25] KAVERMANN Y.: Recycling von Glas. [online] Homepage: Baunetz Wissen URL: <https://www.baunetzwissen.de/glas/fachwissen/herstellung-eigenschaften/recycling-von-glas-2445257> [Stand 28.03.2025]
- [KOC24] KOCH C. (25.06.2024): Finanzieller Mehrwert und CO2-Sparen durch automatisches Isolierglastrennen. [online] Homepage: Hegla URL: <https://www.hegla.com/de/news/hegla-news/finanzieller-mehrwert-und-co2-sparen-durch-automatisches-isolierglastrennen/> [Stand 28.03.2025]
- [MG16] MARTENS H. und GOLDMANN D.: Recyclingtechnik: Fachbuch für Lehre und Praxis. Springer Vieweg, 2. Auflage, 2016
- [SL20] SCHAEFFER H.A. und LANGFELD R.: Werkstoff Glas Alter Werkstoff mit großer Zukunft. Springer Verlag GmbH, 2020

- [WUC25] WUCHTER J.: IGD-A/MANUAL EINFACHES, SICHERES ZERLEGEN VON ISOLIERGLÄSERN. [online] Homepage: Lisec URL: <https://www.lisec.com/de/loesungen/individuelle-einzelmaschinen/detail/kreislaufwirtschaft/igd-amanual> [Stand 28.03.2025]
- [WWH16) WECKEND S., WADE A. und HEATH G. (2016): IRENA and IEA-PVPS End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels. [online] Homepage: IRENA URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_IEAPVPS_End-of-Life_Solar_PV_Panels_2016.pdf [PDF-Datei] [Stand 28.03.2025]