



VOLLSTÄNDIGE SORTENREINE AUFBEREITUNG VON PHOTOVOLTAIKMODULEN

DIE AUFGABE

Angetrieben vom Wunsch nach emissionsarmer, umweltfreundlicher und dezentraler Energieerzeugung sind Photovoltaikmodule ein zentraler Baustein erneuerbarer Energiepolitik und –realität. Im selben Maß, wie die installierte Leistung exponentiell steigt, erhöht sich die Menge der zu entsorgenden Photovoltaikmodule. Nicht nur aus Umweltschutzgründen sind Aufbereitung und Wiederverwertung erforderlich, auch aus wirtschaftlicher Sicht ist sortenreines Recycling sinnvoll, denn vor allem das hochsaubere Frontglas ist ein wertvolles Produkt. Zudem können die in den Modulen enthaltenen seltenen Werkstoffe/Materialien wie Kupfer, Indium und Selen direkt wieder in den europäischen Markt gebracht werden, was Einfuhr- und Bereitstellungsrisiken minimiert.

Die bisherige Methode des mechanischen Schredderns und Einschmelzens der Module erlaubt zwar eine Nachnutzung, wegen Verunreinigungen und Schaumbildung jedoch nur in Form minderwertiger Folgeprodukte wie Flaschenglas. Alternative Verfahren auf chemischer oder thermischer Basis sind zeitlich oder im Hinblick auf erforderliche Energie unverträglich. Für eine vollständige und sortenreine Aufbereitung von wertvoller Frontglasabdeckung, enthaltenen Metallen, Kunststoffolie sowie Rückglas ist eine zerstörungsfreie Technologie zum Öffnen des Verbundglassystems erforderlich.

Das Entwickeln einer großflächentauglichen Lösung, die ein schädigungsarmes Öffnen des photovoltaischen Mehrlagenverbundes und damit ein 100 prozentiges Recycling zu hochwertigen Folgeprodukten ermöglicht, hat sich das Fraunhofer IWS Dresden zur Aufgabe gemacht.

UNSERE LÖSUNG

Photovoltaikmodule liegen als flächiges Verbundglassystem vor. Zwischen hochwertigem Front- und stabilem Rückglas sind die stromerzeugenden metallisch-halbleitenden Schichten witterungsstabil gekapselt. Die dauerhafte Verbindung beider Glasscheiben wird durch eine vollflächige Verklebung mit Kunststoffolie gewährleistet. Der Verbund ist äußerst stabil und stellt beim Recycling eine große Herausforderung dar.

Um ein flächiges Verbundsystem so zu schwächen, daß sich Front- und Rückglas ohne größeren mechanischen Kraftaufwand und zerstörungsfrei voneinander lösen, ist das Einbringen einer definierten Schwächungszone erforderlich. Die entscheidende Idee dazu liegt in der punktgenauen Schwächung des Haftverbundes durch Laserbestrahlung. Um sowohl Prozesssicherheit als auch wirtschaftlich interessante Flächenleistungen zu erzielen, wurde ein laseroptisch-mechanisches Hybridverfahren entwickelt, das eine hohe Bearbeitungsgeschwindigkeit gewährleistet und eine On-the-fly-Bearbeitung ermöglicht.

ERGEBNISSE

Die laserbasierte Lösung erfordert sowohl eine ausreichend hohe Transparenz von Front- oder Rückglas (je nach Bearbeitungsstrategie) als auch eine ausreichend hohe Absorption im Inneren. Deshalb wurden im nahen Infrarot strahlende Lasersysteme ausgewählt. Deren Wellenlänge durchdringt das Glas ohne größere Verluste und wird an der metallischen oder halbleitenden Funktionsschicht vollständig absorbiert. Damit ist die grundsätzliche Bereitstellung der erforderlichen Energie an der richtigen Stelle im Mehrlagenverbund gegeben.



2

Um den Haftverbund gleichmäßig zu schwächen und eine lokale Überbeanspruchung des Materials zu vermeiden, besteht die weitaus größere Herausforderung in der Abstimmung von eingesetzter Lasersystemtechnik und Bearbeitungsregime. Um thermisch induzierte Risse im Flachglas und die damit unweigerliche Zerstörung auszuschließen, wird im gepulsten statt im kontinuierlichen Betrieb gearbeitet. Pulsdauern im Bereich einiger zehn Nanosekunden und ein angepasster Strahlvorschub mit Geschwindigkeiten bis zu 3 m s^{-1} minimieren die Wahrscheinlichkeit lokaler Überhitzungen. Durch das explosionsartige Verdampfen der metallisch-halbleitenden Funktionsschicht mit einem deutlich über den Brennfleck hinausreichenden Wirkdurchmesser wurde sogar bei nicht vollflächiger Bearbeitung eine ausreichend bemessene Schwächung für das nachfolgende Öffnen erzielt.

Mit geschickter Abstimmung lasersystemtechnischer Kenngrößen (wie z. B. Brennweite und Pulsfolgefrequenz) sowie bearbeitungsstrategischer Parameter (z. B. linienförmiger Vorschub des fokussierten Laserstrahls, Abstand der einzelnen Linien zueinander sowie Art und Stärke der Krafterbringung) wurden für typische Solarmodultypen Verfahrensvarianten erarbeitet, die eine laserinduzierte Schwächung mit paralleler mechanischer Öffnung ermöglichen.

Die konsequente Ausrichtung des Hybridverfahrens auf eine On-the-fly-Bearbeitung gewährleistet, dass die Photovoltaikmodule in einem kontinuierlichen Durchlaufverfahren zerstörungsfrei laserbehandelt und parallel mechanisch in Front- und Rückglas getrennt werden können. Die metallisch-halbleitenden Schichten sowie die Kunststoffolie sind nun für die anschließenden chemischen Verfahrensschritte zugänglich. Technologisch herausfordernd ist die Behandlung von Sonderbereichen wie den Randzonen, in denen die photovoltaische aktive Schicht und damit ein effektiver Laserstrahlabsorber fehlen. Hier wurden Lösungen sowohl zum Bestrahlen mit angepassten Wellenlängen als auch alternative mechanische Bearbeitungsvarianten entwickelt.

Der für ein sortenreines und wirtschaftlich sinnvolles Recycling großer Mengen an Photovoltaikschrott erforderliche erste und entscheidende Schritt – das schädigungsfreie Öffnen des Verbundglassystems – wurde mit einem laserbasierten Hybridverfahren erfolgreich realisiert. Es wurden bereits Flächenleistungen bis $0,75 \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$ erreicht; das Verfahren ist aufskalierbar.

Durch das laserbasierte Verfahren entstehen hochwertige Recycling-Zwischenprodukte, die als Ausgangsmaterialien für Nachfolgeprodukte mit hoher Wertschöpfung bereitstehen. Damit wird auch ein signifikanter Beitrag zur lokalen Bereitstellung seltener Rohstoffe geleistet. Das Verfahren bietet sich grundsätzlich auch für das Recycling weiterer Formen flächiger Verbundsysteme an.

Die Entwicklungen wurden vom Sächsischen Staatsministerium für Wirtschaft und Arbeit durch den Projektträger Sächsische Aufbaubank SAB gefördert (FKZ: 100192199/2936).

- 1 *Solarwafer-Schrott (Produktionsabfall)*
- 2 *Öffnung von Photovoltaikmodulen durch laserinduzierte Schwächung*

KONTAKT

Dipl.-Ing. (FH) Thomas Kuntze

+49 351 83391-3227

thomas.kuntze@iws.fraunhofer.de

