Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

HIGHLINE

HighLine Technology GmbH / Tullastraße 87B / 79108 Freiburg

Geschäftsführung
Dr. Maximilian Pospischil
Marian Breitenbücher

Tullastraße 87B / 79108 Freiburg

Abschlussbericht zum Teilvorhaben:

Entwicklung eines Dispensdruckkopfsystems für die Niedertemperatur-Metallisierung des Projektes PrEsto

Teilvorhabenbeschreibung HighLine Technology GmbH

Vorgelegt von Dr. Maximilian Pospischil

Fördernummer: 03EE 1 086E

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

_____

Dr. Maximilian Pospischil

Vorhabensbezeichnung

Verbundvorhaben: PrEsto – Perovskit-Silizium-Tandemsolarzellen: Entwicklung skalierbarer Prozesstechnologien

Laufzeit 01.02.2021 – 31.01.2024

Abschlussbericht zum Teilvorhaben: Entwicklung eines Dispensdruckkopfsystems für die Niedertemperatur-Metallisierung des Projektes PrEsto

1. Einleitung

Im Rahmen des Projekts wurde ein innovatives Dispensdruckkopfsystem für die Niedertemperatur-Metallisierung von Solarzellen entwickelt. Die fortschreitende globale Erwärmung und die damit einhergehende Notwendigkeit für nachhaltige Energielösungen haben die Forschung in diesem Bereich angetrieben. Angesichts der zunehmenden Nachfrage nach effizienteren und umweltfreundlicheren Produktionsmethoden war es entscheidend, Technologien zu erforschen, die sowohl die Effizienz als auch die Qualität der Produktion verbesserten. Die Hauptzielsetzung war es, ein System zu schaffen, das den industriellen Anforderungen entspricht und gleichzeitig die Lebensdauer und Zuverlässigkeit der Druckvorgänge erhöht. Diese Entwicklungen sind nicht nur für die Solarindustrie von Bedeutung, sondern auch für die gesamte Energiewirtschaft, da sie zur Reduzierung der Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen beitragen können. Ein weiterer Aspekt war die Berücksichtigung der wirtschaftlichen Faktoren, die mit der Implementierung neuer Technologien verbunden sind, um sicherzustellen, dass sie sowohl technisch als auch finanziell tragfähig sind.

2. Projektbeschreibung

Die Forschungsarbeiten umfassten die Konstruktion und Optimierung von Nozzle-Kits, die eine zentrale Rolle im Paralleldispensprozess spielten. Diese Kits beinhalteten spezifische Kombinationen aus Düsen und Filterelementen, die für die Stabilität und Effizienz des Druckvorgangs entscheidend waren. Zu Beginn des Projekts wurden verschiedene Designansätze evaluiert, um die besten Materialkombinationen zu identifizieren. Ein besonderes Augenmerk lag auf der Analyse der Strömungsdynamik innerhalb der Düsen, um sicherzustellen, dass die Druckverteilung optimal war. Eine besondere Herausforderung stellte die Verstopfung der Düsen dar, die durch Nylongewebe als Filtermaterial verursacht wurde. Dies führte nicht nur zu einem hohen Druckverlust, sondern auch zu einer erhöhten Ausfallrate der Systeme. Um diese Herausforderungen zu bewältigen, wurde beschlossen, alternative Filtermaterialien zu evaluieren, die eine höhere Stabilität und geringeren Druckverlust

versprachen. Die kontinuierliche Überwachung und Anpassung der Prozesse war ein zentraler Bestandteil der Projektarbeit.

3. Ergebnisse

3.1. Drittes und viertes Quartal 2021

Im dritten und vierten Quartal 2021 lag der Schwerpunkt auf der Konstruktion und Optimierung von Nozzle-Kits, die für den Paralleldispensprozess von zentraler Bedeutung sind. Zu Beginn dieser Phase wurde eine umfassende Analyse bestehender Systeme durchgeführt, um Schwachstellen zu identifizieren. Die Konstruktion der Nozzle-Kits umfasste eine spezifische Kombination aus Düsen und Filterelementen, die für die Stabilität und Effizienz des Druckvorgangs entscheidend waren.

Ein zentrales Ergebnis dieser Phase war die erfolgreiche Steigerung der Zyklenzahl auf 17.000. Dies wurde durch die Implementierung verbesserter Materialien und Konstruktionen erreicht. Tests im PVTEC Labor zeigten, dass die neu entwickelten Filtermaterialien eine höhere Haltbarkeit aufwiesen und die Stabilität des Druckprozesses verbesserten. Allerdings traten auch Herausforderungen auf, insbesondere die Verstopfung der Düsen. Diese Problematik wurde als kritisch identifiziert, da sie zu einem hohen Druckverlust im System führte und die Zuverlässigkeit der Druckvorgänge beeinträchtigte.

Um diese Herausforderungen anzugehen, wurden alternative Filtermaterialien evaluiert. Tests mit verschiedenen Materialien zeigten, dass bestimmte Kombinationen eine signifikante Verbesserung der Druckstabilität ermöglichten. Diese Erkenntnisse legten den Grundstein für die folgenden Entwicklungsphasen und halfen, die Richtung für zukünftige Innovationen festzulegen.

3.2. Erstes und zweites Quartal 2022

Im ersten und zweiten Quartal 2022 konnte das Projektteam die erzielten Ergebnisse weiter ausbauen. Die Zyklenzahl wurde auf über 23.000 erhöht, was einen signifikanten Fortschritt darstellt. Diese Verbesserung war das Ergebnis gezielter Maßnahmen zur Identifikation und Behebung von Düsenausfällen, die in der vorherigen Phase als Hauptursache für Produktionsunterbrechungen identifiziert wurden.

Ein zentraler Fokus in dieser Phase lag auf dem Einsatz neuer Filtermaterialien und Dichtungen. Diese neuen Materialien zeigten eine erheblich verbesserte mechanische Stabilität und Dichtheit, was zu einer signifikanten Minimierung des Druckverlustes führte. Intensive Tests zur Stabilität der neuen Materialien wurden unter realistischen Produktionsbedingungen durchgeführt. Diese Tests umfassten sowohl

Dauerlaufversuche als auch Belastungstests, um die Auswirkungen von Druckstößen und dynamischen Belastungen auf die Filtermaterialien zu analysieren.

Die erfolgreiche Steigerung der Zyklenzahl und die Verbesserung der Systemstabilität führten zu einer positiven Resonanz innerhalb der Fachgemeinschaft. Die Ergebnisse dieser Phase wurden auf verschiedenen Fachkonferenzen präsentiert, was das Interesse an der entwickelten Technologie weiter steigerte.

3.3. Drittes und viertes Quartal 2022

Im dritten und vierten Quartal 2022 erreichte das Projektteam einen weiteren Meilenstein, indem die Lebensdauer der Druckkopfsysteme auf beeindruckende 65.000 Zyklen gesteigert wurde. Diese Verbesserung wurde durch kontinuierliche Optimierungen in der Konstruktion und den verwendeten Materialien erreicht. Insbesondere die Verwendung von Edelstahlgeweben anstelle von Nylongeweben als Filterelemente erwies sich als entscheidend für die Verbesserung der Lebensdauer. Die Edelstahlgewebe boten eine höhere mechanische Stabilität und reduzierten den Druckverlust signifikant.

Zusätzlich wurde die Konstruktion der Dichtungen optimiert, um das Risiko von Leckagen und Materialausfällen zu minimieren. Umfangreiche Tests wurden durchgeführt, um die Leistung der neuen Systeme unter verschiedenen Bedingungen zu evaluieren. Diese Tests umfassten sowohl industrielle Dauerlaufversuche als auch Laboruntersuchungen, um die Effektivität der neuen Technologien zu validieren.

Die gesammelten Daten führten zu einem deutlichen Anstieg des Interesses an der Technologie aus der Industrie und schufen eine solide Grundlage für die kommenden Entwicklungsphasen. Eine enge Zusammenarbeit mit Industriepartnern wurde etabliert, um die praktische Anwendbarkeit der Technologie zu gewährleisten.

3.4. Erstes und zweites Quartal 2023

Im ersten und zweiten Quartal 2023 konzentrierte sich das Projektteam auf die Evaluation von ultraniedertemperierten Pasten, die für die erfolgreiche Anwendung der neu entwickelten Technologien auf verschiedene Zelltypen entscheidend sind. Die Lebensdauer der Düsen-Filter-Kits wurde auf über 65.000 Zyklen optimiert, was die Robustheit der Technologie unterstrich (Abbildung 1).

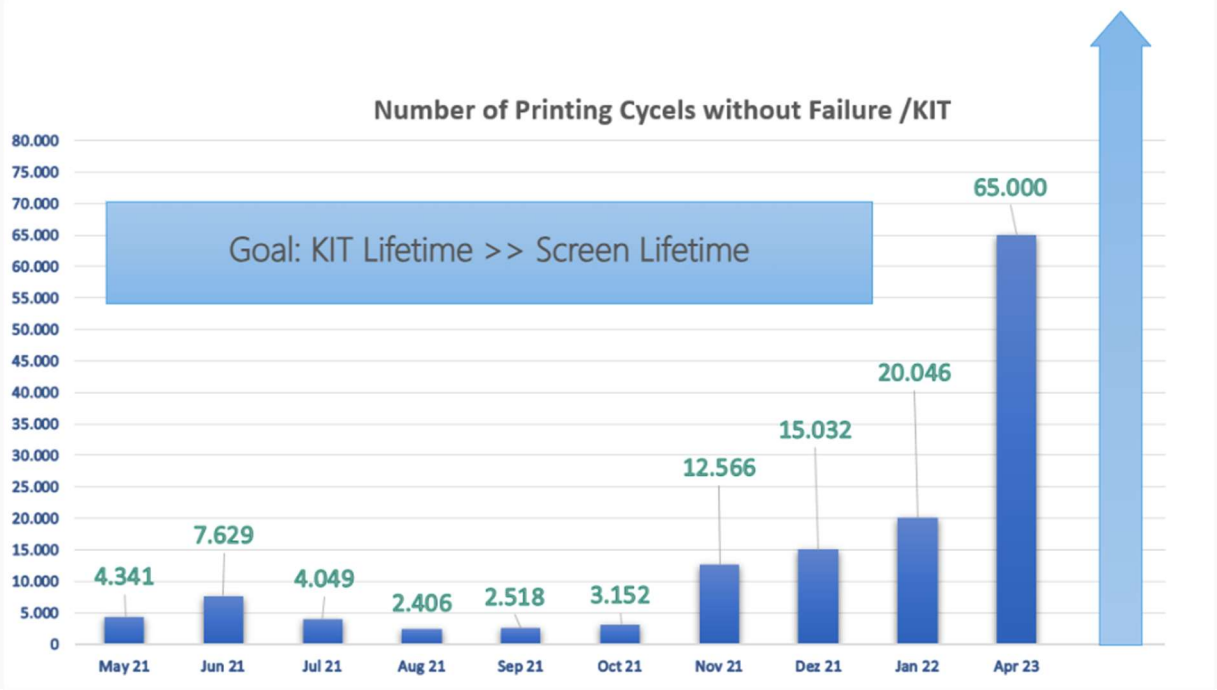

Abbildung 1 Verlauf der Belastungstests inkl. Der Entwicklung der Erreichten Lebensdauern der Nozzle Kits im Verlauf des Projektes. Maßgeblich für das Erreichen der Lebensdauer war der Aufbau von Verständnis für das Zusammenspiel von Paste und Filtrierungsergebnissen.

Intensive Tests zeigten, dass die neuen Filtermaterialien eine signifikante Erhöhung der Lebensdauer ermöglichten, während gleichzeitig die Druckverluste minimiert wurden. Diese Fortschritte trugen zur Prozesssicherheit und Effizienz bei, was für die industrielle Anwendung von entscheidender Bedeutung war. Ein wichtiger Teil dieser Entwicklungsphase war die Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen den neuen Pasten und den verwendeten Materialien. Diese Studien halfen, potenzielle Probleme frühzeitig zu identifizieren und Lösungen zu entwickeln, um die Leistung der Drucksysteme weiter zu optimieren.

Die gesammelten Erkenntnisse aus dieser Phase führten zu einer positiven Resonanz innerhalb der Fachgemeinschaft und stärkten das Vertrauen in die Robustheit und Effizienz der entwickelten Systeme. Einige der daraus resultierenden detaillierten Ergebnisse und ihre wissenschaftliche Relevanz sind in der Publikation unter https://doi.org/10.1016/j.solmat.2023.112685 dokumentiert

3.5. Drittes und viertes Quartal 2023

Im dritten und vierten Quartal 2023 lag der Fokus auf der Anwendung der entwickelten Technologien auf Perowskit-Solarzellen, die eine vielversprechende Technologie für die zukünftige Solarproduktion darstellen. Die Evaluation nanopartikelbasierter Pasten zeigte vielversprechende Ergebnisse, insbesondere eine signifikante Silber-Ersparnis von 30% bei gleichbleibenden Zellwirkungsgraden.

Trotz der positiven Ergebnisse traten Herausforderungen hinsichtlich der Homogenität der Paste auf, die zu inkonsistenten Druckergebnissen führten. Das

Team bemühte sich, diese Probleme zu beheben, um die Druckqualität weiter zu verbessern. Intensive Tests und Anpassungen an den Prozessparametern waren notwendig, um die gewünschte Konsistenz zu erreichen.

Die fortlaufende Zusammenarbeit mit Forschungseinrichtungen und Partnerunternehmen spielte eine entscheidende Rolle bei der Lösung dieser Herausforderungen. Die Entwicklung neuer Materialien und Verfahren zur Verbesserung der Druckqualität blieb ein zentrales Ziel, um die Technologie für die breite Anwendung zu optimieren. Die gesammelten Daten und Ergebnisse aus dieser Phase lieferten wertvolle Erkenntnisse für zukünftige Entwicklungen und stärkten das Vertrauen in die Anwendung der Technologie auf neue Zelltypen.

4. Diskussion

Die gesammelten Erkenntnisse aus den verschiedenen Phasen des Projekts zeigten nicht nur die Schwächen der bisherigen Systeme auf, sondern auch die Richtung für zukünftige Innovationen. Intensive Tests zur Stabilität neuer Materialien und deren Verhalten unter realistischen Produktionsbedingungen waren entscheidend. Die Herausforderungen, insbesondere die Verstopfung der Düsen, wurden systematisch analysiert, und die resultierenden Daten ermöglichten eine gezielte Optimierung der Konstruktion. Zusätzlich wurden verschiedene Testmethoden eingesetzt, um die Auswirkungen von Druckstößen und dynamischen Belastungen auf die neuen Filtermaterialien zu analysieren. Die detaillierten Analysen ermöglichten es, die Materialien gezielt zu optimieren, was zu einem Anstieg der Zyklenzahl führte. Die Rückmeldungen aus der Industrie und von Forschungspartnern waren ebenfalls wertvoll und halfen, die Perspektive auf die praktischen Anwendungen der entwickelten Technologien zu erweitern.

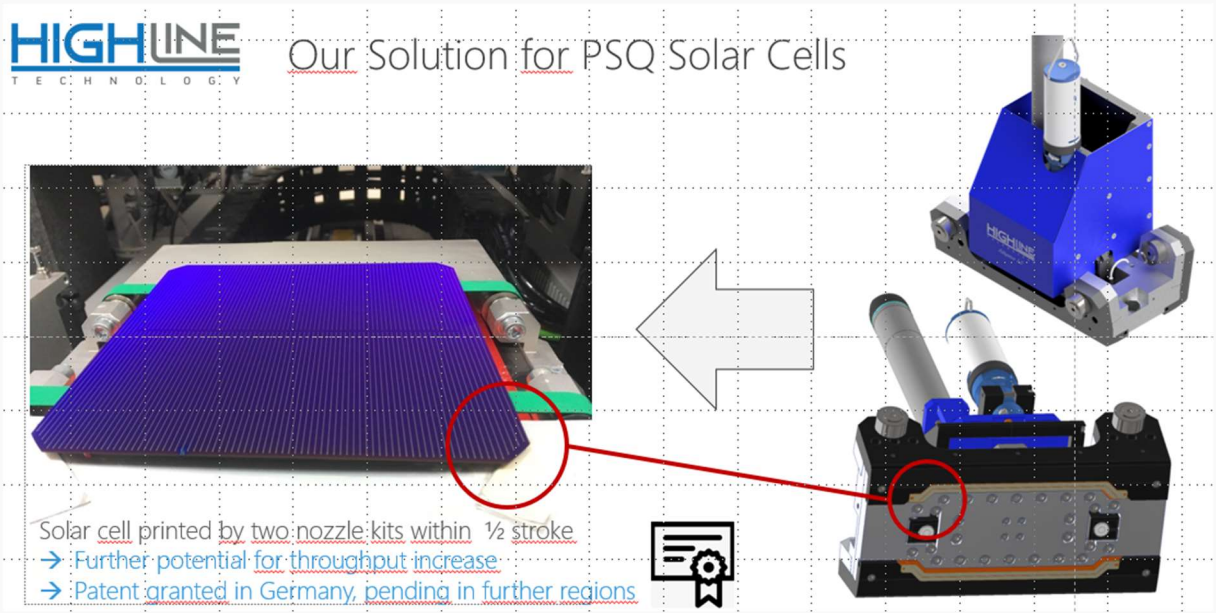

Abbildung 2 gedruckte Solarzelle mit Einsatz eines Nozzle Kits mit nachgebildeten PSQ Ecken auf der Unterseite des Druckkopfes.

5. Vergleich mit der ursprünglichen Planung

Bei der Planung des Projekts wurden spezifische Ziele festgelegt, die sowohl technische als auch wirtschaftliche Aspekte umfassten. Die ursprüngliche Planung sah vor, die Zyklenzahl der Dispensdruckkopfsysteme innerhalb der Projektlaufzeit auf 50.000 zu erhöhen und gleichzeitig die Stabilität des Druckprozesses zu optimieren. Darüber hinaus wurde angestrebt, innovative Filtermaterialien zu entwickeln, die eine signifikante Reduktion des Druckverlustes ermöglichen sollten.

Im Verlauf des Projekts zeigte sich, dass die tatsächlich erreichten Zyklenzahlen (65.000) die ursprünglichen Ziele übertrafen. Auch die Verbesserungen in der Stabilität und Zuverlässigkeit waren über die Erwartungen hinausgehend. Die Evaluierung alternativer Filtermaterialien führte zu unerwarteten Fortschritten, die nicht nur die Haltbarkeit, sondern auch die Effizienz des gesamten Systems steigerten.

Ein weiterer positiver Aspekt war die Zusammenarbeit mit Industriepartnern, die sich schneller und effektiver entwickelte als ursprünglich angenommen. Dies führte zu einem frühzeitigen Austausch von Erkenntnissen und half, die Markteinführung der Technologie zu beschleunigen. Dennoch traten einige Herausforderungen auf, wie etwa die Homogenität der Pasten, die nicht im vollen Umfang vorhergesehen wurde und zusätzlichen Forschungsbedarf aufzeigte.

6. Zielerreichung und Ausblick

Die Zielerreichung des Projekts kann als durchweg positiv bewertet werden. Die Hauptziele, die Zyklenzahl signifikant zu erhöhen und die Stabilität des Druckprozesses zu verbessern, wurden nicht nur erfüllt, sondern übertroffen. Die entwickelten Technologien bieten nun eine robuste Grundlage für die Metallisierung von Solarzellen und stellen eine vielversprechende Lösung für die Industrie dar.

In Anbetracht der positiven Ergebnisse sind die nächsten Schritte klar umrissen. Zukünftige Entwicklungen sollten sich auf die Optimierung der ultraniedertemperierten Pasten und deren Anwendungstechnik konzentrieren. Eine vertiefte Analyse der Wechselwirkungen zwischen den neuen Materialien und den Pasten ist erforderlich, um potenzielle Probleme frühzeitig zu identifizieren und Lösungen zu entwickeln.

Langfristig könnte die Technologie auch auf andere Anwendungen in der Solarindustrie ausgeweitet werden, was zusätzliche Forschung und Entwicklung erfordert. Die enge Zusammenarbeit mit Forschungseinrichtungen und Industriepartnern wird weiterhin von zentraler Bedeutung sein, um die Innovationskraft zu gewährleisten und die Technologie in der Praxis zu etablieren. Die gesammelten Erkenntnisse und Technologien bieten eine solide Grundlage für künftige Forschungs- und Entwicklungsprojekte.

7. Verwertungsplan

Die Evaluation ultraniedertemperierter Pasten war entscheidend für die erfolgreiche Anwendung der neu entwickelten Technologien auf verschiedene Zelltypen, insbesondere auf Perowskit-Solarzellen. Die Lebensdauer der Düsen-Filter-Kits wurde auf über 65.000 Zyklen optimiert, was die Robustheit der Technologie unterstrich. Die Stabilität und Dichtheit der Filterelemente wurden durch innovative Designs und Materialien weiter verbessert. Intensive Tests zeigten, dass die neuen Filtermaterialien eine signifikante Erhöhung der Lebensdauer ermöglichten, während gleichzeitig die Druckverluste minimiert wurden. Ein zentraler Bestandteil des Verwertungsplans ist die Zusammenarbeit mit Industriepartnern, um die Ergebnisse in die Praxis umzusetzen. Der Austausch von Erkenntnissen zwischen den Projekten Bussard und Presto zeigte, dass komplementäre Ansätze zur Effizienzsteigerung der Solarzellenproduktion beitragen können. Diese Kooperationen könnten nicht nur die Markteinführung beschleunigen, sondern auch dazu beitragen, die Technologie weiter zu verfeinern.

8. Fazit

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass das Projekt bedeutende Fortschritte in der Entwicklung von Dispensdruckkopfsystemen erzielte. Die kontinuierliche Verbesserung der Materialien und Prozesse führte zu einer hohen Lebensdauer und Stabilität der Systeme. Zukünftige Entwicklungen sollten sich auf die Optimierung der Paste und deren Anwendungstechnik konzentrieren, um den vollen Nutzen der entwickelten Technologien zu realisieren. Die Herausforderungen, die während des Projekts auftraten, wurden erfolgreich adressiert, und die erzielten Ergebnisse bieten eine solide Grundlage für die weitere Forschung und Entwicklung in diesem Bereich. Diese Fortschritte sind nicht nur für die Wissenschaft von Bedeutung, sondern haben auch das Potenzial, die gesamte Solarindustrie nachhaltig zu beeinflussen.