

Abschlussbericht zum FuE-Projekt

Verbundprojekt: GutenMorgen - Große Wafer und geteilte Zellen - optimierte Prozesse zur Messung, Vereinzelung, Passivierung und Verschaltung von Teil-Zellen

Teilprojekt: Entwicklung der Kantenpassivierung für Teil-Zellen im Industrie-Maßstab

Förderprogramm: Anwendungsorientierte nichtnukleare FuE im 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung – Förderbereich: Photovoltaik

Förderkennzeichen: 03EE1101F

Durchgeführt von: PLASMA ELECTRONIC GMBH
Otto-Lilienthal-Str. 2
79395 Neuenburg am Rhein

Projektlaufzeit: 01.05.2021 – 31.10.2025

Projektleiter: Dr. Jürgen Geng

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWE) unter dem Förderkennzeichen 03EE1101F gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung trägt der Autor.

Autor(en):

Dr. Jürgen Geng, PLASMA ELECTRONIC GMBH

Inhaltsverzeichnis

1. Kurzdarstellung	4
1.1. Aufgabenstellung	4
1.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	5
1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens	5
1.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	6
1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	8
2. Ausführlicher Bericht	9
2.1. Ergebnisse des Projekts	9
2.2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	42
2.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	42
2.4. Voraussichtlicher Nutzen/Verwertbarkeit der Ergebnisse	43
2.4.1. Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende.....	43
2.4.2. Wissenschaftliche und / oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende	44
2.4.3. Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit	44
2.5. Bekannte Ergebnisse anderer Stellen während der Laufzeit des Vorhabens	44
2.6. Veröffentlichung der Ergebnisse	45
3. Literaturverzeichnis	46

1. Kurzdarstellung

1.1. Aufgabenstellung

Ausgangspunkt des Vorhabens war die zunehmende Größe der Waferformate, was einerseits zur Folge hat, dass produktionstechnische Lösungen für die Herstellung und Modulintegration von Solarzellen mit einer Kantenlänge bis 210 mm gefunden werden müssen und andererseits zu erwarten war, dass die Solarzellen für eine verlustarme Modulintegration mehrfach geteilt werden müssen. Letzteres hat zur Folge, dass die Qualität der Kante immer wichtiger wird und industrielle Ansätze zur Kantenpassivierung immer mehr in den Fokus geraten.

Im vorliegenden Teilvorhaben wurde genau dieser Punkt adressiert. Eine von Plasma Electronic bereits entwickelte ALD-Anlage sollte hierzu in die Entwicklungs-Umgebung des Fraunhofer ISE eingebracht und gemeinsam in Betrieb genommen werden. Mit dieser Demoanlage sollte der Prozess für die Kantenpassivierung von Zell-Modulen für Wafer-Formate bis M12 industrietauglich ausgearbeitet werden. Neben der eigentlichen Plasma-beschichtung im ALD-Verfahren stand die Prozessoptimierung für eine verlustarme thermische Nachbehandlung im Fokus. Mit diesen im Projekt ausgearbeiteten Prozess und Anlagenkonzept sollten Schichtdicken von 10 – 20 nm mit Durchsätzen bis 500 Stk. in 20 min realisiert werden können. Das Erreichen einer hohen flächenbezogenen Modulleistung, v. a. für Anwendungen im Bereich der integrierten Photovoltaik, stand dabei im Mittelpunkt der Arbeiten. Plasma Electronic deckte hierzu die Expertise im Bereich funktioneller Plasmabeschichtung ab. Zentral waren die Optimierung von Teilehalterungen und Prozessführung. Die Einordnung des Teilvorhabens innerhalb der Prozesskette kann der folgenden Abbildung entnommen werden.

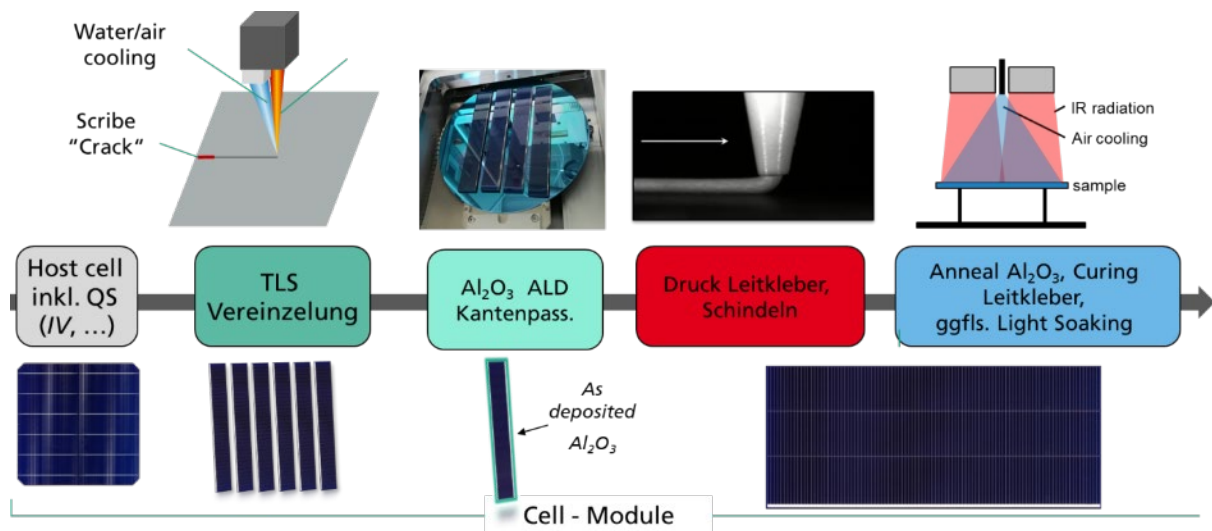


Abbildung 1: „Guten Morgen“-Prozessfluss basierend auf der Schindeltechnologie (QS: Qualitätssicherung, IV: Strom-Spannung, TLS: *Thermal Laser Separation*, Al₂O₃: Aluminiumoxid, IR: Infrarot).

Des Weiteren sollte eine leistungsfähige und robuste Prozessüberwachung ausgearbeitet und integriert werden (Selbsttest und Online-Überwachung). Dafür bot sich die OES an, die in kontinuierlichen Plasmaprozessen gut erprobt ist und im Projekt für gepulste PEALD-Prozesse ertüchtigt werden sollte. Dabei ist speziell die Sensitivität der OES für Wasserstoff von Vorteil. Wasserstoff steht im Verdacht, Schichtdefekte in Form von Bläschen („Blistering“) hervorzurufen [25].

1.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Wichtige Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens waren die Zusammenarbeit im Verbund, insbesondere dem Fraunhofer ISE, sowie die eigenen Vorarbeiten und Erfahrungen im Bereich der Plasmaprozesse. Zudem wurde die Durchführung erst durch die finanzielle Förderung der Arbeiten im Rahmen des vorliegenden Projektes ermöglicht.

1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Arbeiten wurden wie geplant gestartet. Im Verlauf des Projektes kam es zu Verzögerungen bei der Beschaffung benötigter Anlagenkomponenten des Partners ISE. Infolgedessen wurde eine Verlängerung der Projektlaufzeit beantragt und bewilligt. Im Rahmen der Verlängerung konnten das Teilprojekt sowie das Verbundvorhaben erfolgreich abgeschlossen und die Projektziele vollständig erreicht werden.

1.4. **Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde**

Der Markt wurde von Wafern der Formate M2 (Kantenlänge 156,75 mm) bis M6 (Kantenlänge 166 mm) dominiert, wobei es eine klare abnehmende Tendenz bei M2 und eine deutlich zunehmende bei M6 gab. Anlagen und Prozesse in heutigen Produktionslinien sind nach wie vor zumeist bis max. Format M6 ausgelegt.

Das Konzept des Schindelns, dem Reihenverschalten durch Überlapp von benachbarten Solarzellen, wurde erstmals in einem Patent von 1956 vorgeschlagen [1] und eignet sich hervorragend für große Waferformate hinsichtlich einer verlustarmen Modulintegration. Dabei wird der Vorderseitenbusbar einer Zelle mit dem rückseitigen Busbar einer benachbarten Zelle in Überlapp gebracht und durch eine Klebung permanent fixiert. Dieser Ansatz führt zu einer dichteren Packung von Solarzellen und demnach zu einer höheren Leistungsdichte im Modul sowie durch das Verschwinden von Verschaltungselementen zu einer homogeneren Erscheinung, geringeren Abschattungsverlusten und zu einer deutlichen Reduzierung der ohmschen Verluste im Modul. Das „Schindelns“ von Solarzellen spielte in der Vergangenheit hauptsächlich bei Nischenanwendungen eine Rolle, beispielsweise bei Satelliten [2], bei portablen Anwendungen [3] oder bei Orten mit begrenzten Flächen [4]. Im Jahr 2002 wurden am Fraunhofer ISE kleinflächige Schindelmodule entwickelt, die für den Einsatz in elektronischen Geräten Anwendungen fanden [5, 6]. In der kommerziellen Photovoltaik-Industrie waren Halbzellenkonzepte bereits in Modulen weit verbreitet [7, 8]. Ein Hauptvorteil der Vereinzelung von Zellen aus einem Hostwafer ist die Verringerung der elektrischen Verluste im Modul infolge der kleineren Zellgrößen. Das Interesse von Seiten der Industrie an der Technologie des Schindelns zeigte die Zunahme von Patenten [9, 10] und kommerziell erhältlichen Modulen [11–15] in der jüngeren Vergangenheit. In 2017 konnte mit Schindelminimodulen ein Leistungsvorteil im Vergleich zu konventionell verschalteten Referenzmodulen gezeigt werden [16]. In einem Ansatz wurde leitfähiger Kleber (ECA) verwendet, um monofaziale PERC-Zellen miteinander zu verbinden [17, 18]. Die Ergebnisse zeigten eine Leistungssteigerung von 10 % im Vergleich zu einem konventionell verschalteten Modul mit 60 Zellen.

Die Vereinzelung in eine Schindelzelle erfolgt normalerweise nach Fertigstellen des sogenannten Hostwafers. Dieser Wafer entspricht dem fertigen Zellprodukt und unterscheidet sich i. d. R. nur durch einen an das Schindellayout angepasstes Metallisierungslayout. Die Trennung von Zellen führt jedoch zur Bildung neu formierter „nicht passivierter“ Zellkanten mit Randdefekten, die als Kantenrekombination bezeichnet werden, was zu einer Senkung der Zelleffizienz führt [19–21]. Die Kantenrekombination skaliert proportional mit dem Verhältnis von Umfang zu Fläche. Dieser zusätzliche Verlustkanal wird umso bedeutender, je höher das Effizienzpotential der Ausgangszelle ist. Auf Zellebene kann die Kantenrekombination

reduziert werden durch: (i) die Abschirmung von Ladungsträgern einer Art von der Kante und / oder (ii) die Verringerung der Defektdichte an der Kante. Die bisher von Dritten veröffentlichten verfügbaren Verfahren [20,22-24] erfordern mehrere Prozessschritte vor der Metallisierung oder herausfordernde Nach-Metallisierungs-Prozessschritte, die eine Industrialisierung erschweren.

Bezüglich der Qualitäts- und Prozesskontrolle können die Zellen im Hostwafer vor der Vereinzelung etwa mittels *IV*-Messungen (*IV*: Strom-Spannung) analysiert werden, was jedoch keine spezifische Aussage über einzelne Schindeln des Hostwafers zulässt und den Prozess der Vereinzelung und dabei entstehende Defekte außer Acht lässt. Geeignete Kontaktierungen sind erforderlich, um bei asymmetrischem Metallisierungslayout gleiche Betriebsbedingungen auf der ganzen Zelle realisieren zu können. Bei einer *IV*-Messung der einzelnen Schindelzellen nach der Vereinzelung ist der Durchsatz eine große Herausforderung, weshalb sich diese Messung insbesondere im F&E-Bereich anbietet. Geeignete hochdurchsatzfähige Lösungen zur 100%-inline-Prozesskontrolle der Vereinzelung waren nicht bekannt.

Hinsichtlich der angestrebten Beschichtungs-Technologie ist die Atomlagenabscheidung (ALD) eine etablierte Technik, um Substrate mit dünnen Schichten zu versehen. Die Beschichtung wird dabei Atomlage für Atomlage aufgebaut, so dass chemische Zusammensetzung und die Schichtdicke genau festgelegt werden können (vgl. Abbildung 2).

Die zu beschichtende Oberfläche muss vorbehandelt werden, um sie chemisch zu aktivieren. Das Substrat wird in eine Vakuumkammer gelegt und dort geheizt. Wenn die erforderliche Temperatur erreicht ist, wird eine bestimmte Menge an Beschichtungsgas in die Kammer eingelassen. In einem definierten Temperaturfenster reagieren die Moleküle des Beschichtungsgases mit der Oberfläche des Substrats. Aus chemischen Gründen kann auf diese Weise nur exakt eine Moleküllage an die Oberfläche gebunden werden. Im nächsten Prozessschritt wird das Gas in der Kammer mit einem anderen Gas ausgetauscht und die beschichtete Lage chemisch aktiviert. Anschließend wird das Gas in der Kammer erneut getauscht, um eine weitere Moleküllage abzuscheiden. Durch Wiederholung des Aktivierungs- und des Beschichtungsschritts wird eine ALD-Schicht erzeugt.

Da die klassische ALD Temperaturen von mehreren 100 °C benötigt, kann sie jedoch nicht für die Beschichtung temperaturempfindlicher Materialien wie Kunststoffen verwendet werden. Um die Prozesstemperatur niedrig zu halten, wird bei der PEALD die Aktivierungsenergie für die chemischen Reaktionen über ein Plasma statt thermisch zugeführt. Die Vorteile zur klassischen ALD sind:

- Das Temperaturfenster für die mögliche Abscheidung beginnt deutlich unter 100 °C

- Eine separate Vorbehandlung ist nicht erforderlich, denn es wird eine kurze Plasma-Aktivierung durchgeführt

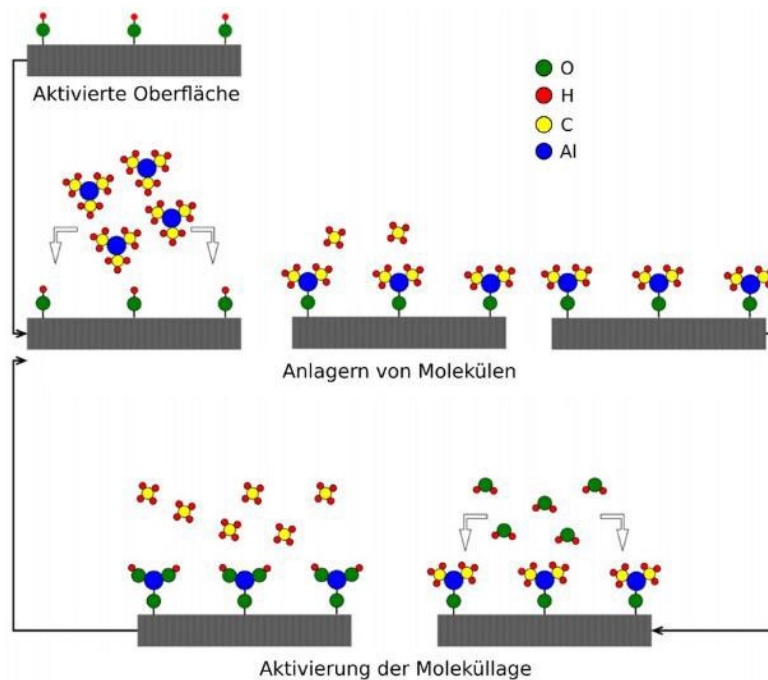


Abbildung 2: Prinzip der ALD-Plasmabeschichtung.

1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Vorhaben wurde in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern Fraunhofer ISE, M10 Industries AG, AxSun Solar GmbH & Co. KG, ASYS Automatisierungssysteme GmbH, WAVELABS Solar Metrology Systems GmbH, HighLine Technology GmbH, DELO Industrie Klebstoffe und InnoLas Solutions GmbH durchgeführt. Es erfolgte keine Zusammenarbeit mit Dritten außerhalb des Verbundes.

2. Ausführlicher Bericht

2.1. Ergebnisse des Projekts

AP 1.5: Anschaffung ALD-Anlage zur Kantenpassivierung

Konzeption und Konstruktion

Aufbauend auf den Erfahrungen mit der PEALD-Technikumsanlage LINEA wurde eine Anlage konzipiert, die für die Prozessierung von Wafern-Formaten bis M12 (Kantenlänge 210 mm) geeignet war. Anlagenseitig wurde parallel dazu in AP 3.1 die Teilehalterung und Prozessführung ausgearbeitet. Für eine Prozessierung von bis zu 500 Wafern müssen diese dabei gestapelt in der Prozesskammer positioniert werden können. Für diese Anforderung wurde die Konstruktionsbasis entsprechend konzipiert. Das Ergebnis dieser Arbeiten zeigt Abbildung 3. Für den Einsatz der Anlage unter industriellen Bedingungen wurde zusätzlich eine doppelwandige Ausführung der Kammer für die Umsetzung von Temperierkonzepten ausgearbeitet. Somit kann das Einsatzfenster der Anlage über den reinen Betrieb bei Raumtemperatur hinaus erweitert werden.

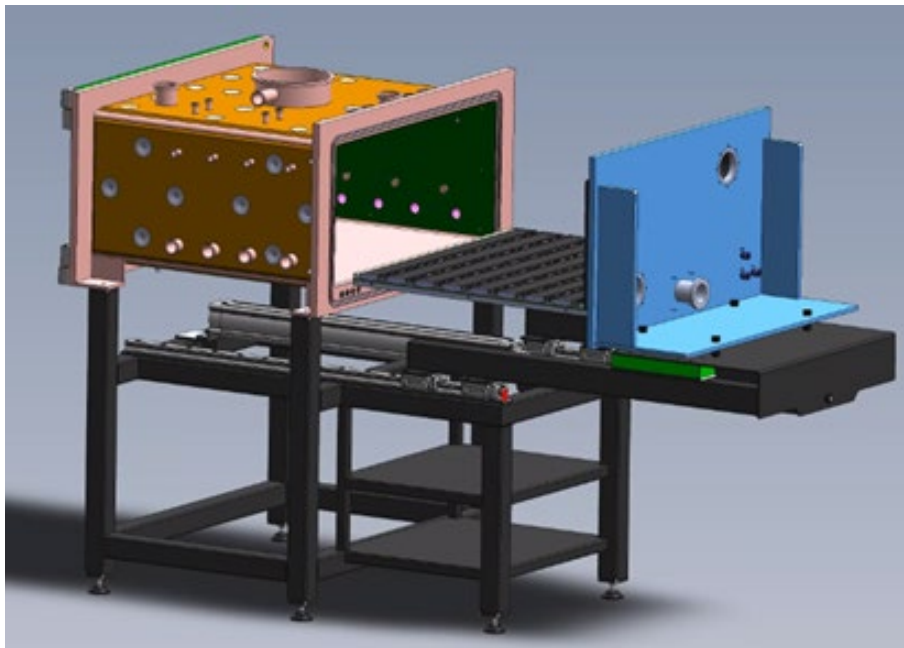


Abbildung 3: Konstruktion PEALD-Anlage mit integriertem Wartungs-Konzept.

Zusätzlich wurde ein Konzept zur Integration der Anlage in eine Reinraumumgebung erstellt (s. Abbildung 4).

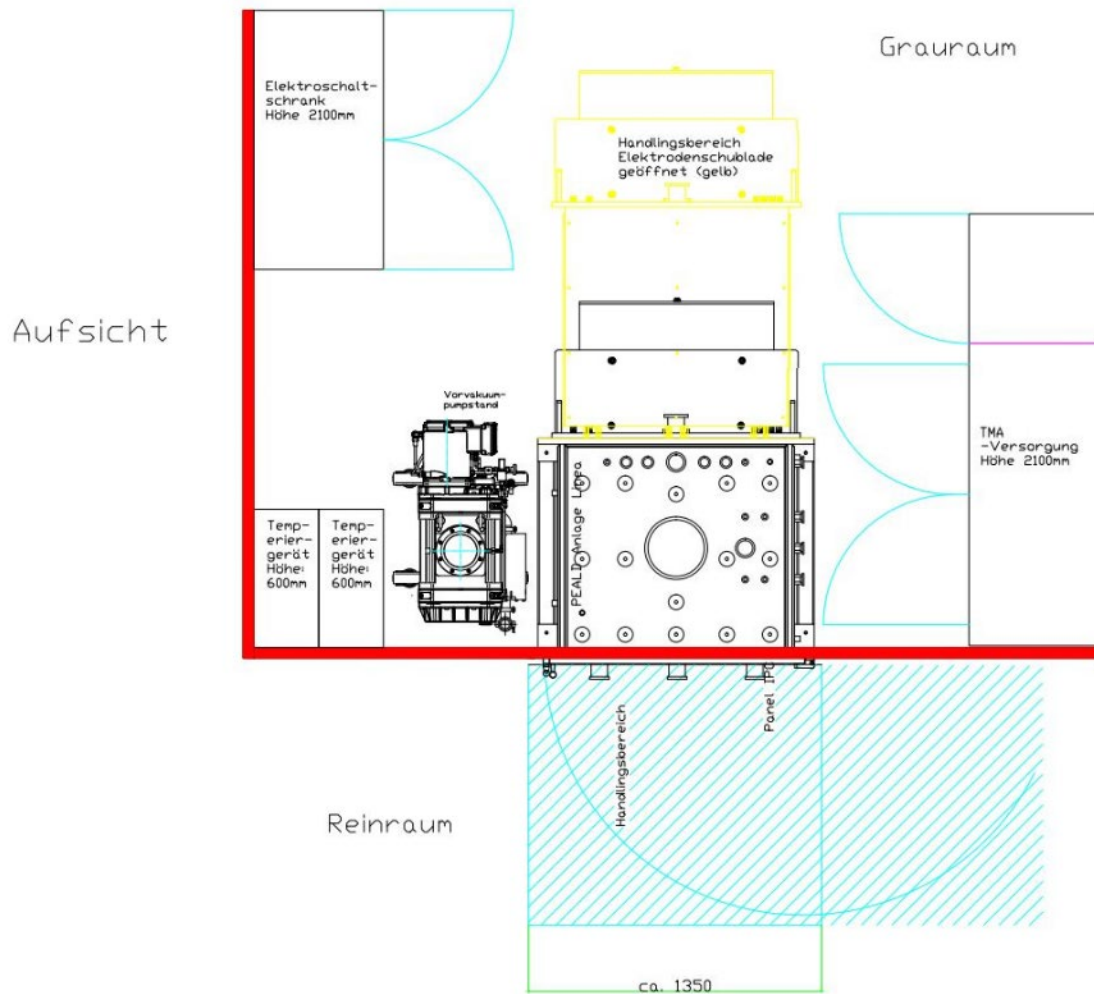


Abbildung 4: Konzept Aufstellungsplan für Reinraumanwendungen.

Mit dem Aufbau der Anlage (Konstruktionszeichnung in Abbildung 5) wurde begonnen.

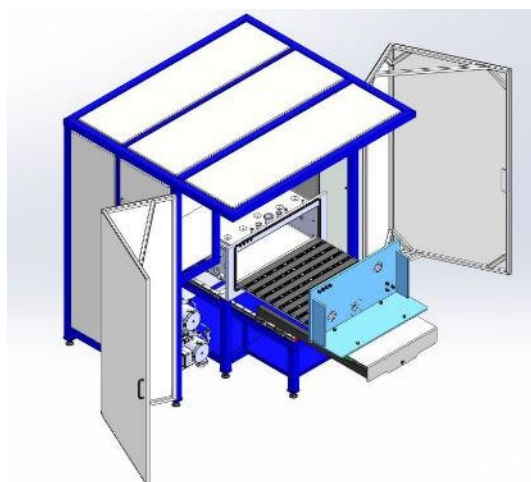


Abbildung 5: Konstruktionszeichnung (links) ISE-Anlage.

Dabei wurden unter anderem die Vakuumkammer und der Rahmen verbunden und die Gasversorgung aufgebaut (Konzeption siehe Abbildung 6).

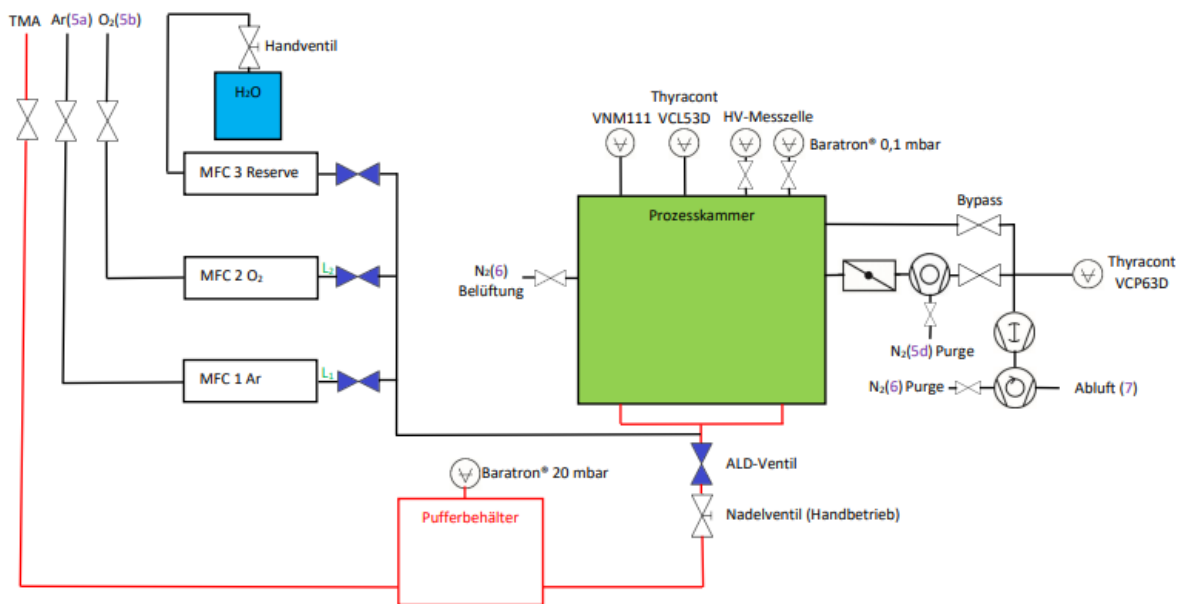


Abbildung 6: Gasversorgung PEALD-LINEA.

Der Aufbau der Anlage wurde erfolgreich abgeschlossen (Abbildung 7). Nach einer gründlichen auf das Projekt angepassten Charakterisierung und Anpassung der Anlage auf die im Projektverlauf erzielten Projektergebnisse (z. B. notwendige Druckanpassung über eine Blende: Abbildung 8) wurde die Anlage an das ISE geliefert.

Erste Al_2O_3 -Schichten mit einer Zielschichtdicke von 6 nm wurden per Ellipsometrie mit $(5,9 \pm 1,0)$ nm über die gesamte Werkstückträgerfläche vermessen.



Abbildung 7: Aufbau ISE-Anlage.

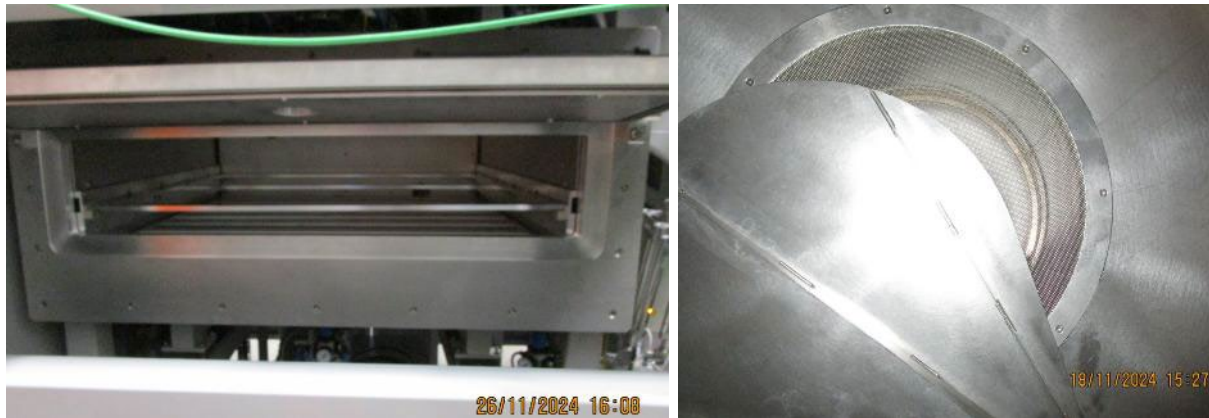


Abbildung 8: Innenansicht bei geöffneter Reinraumklappe und Pumpleistungsreduktion.

Daraufhin erfolgte die Einbringung in die Reinraumumgebung. Die Anlage wurde in Zusammenarbeit beider Partner erfolgreich in Betrieb genommen und optimiert.

Die gemeinsame Prozessübertragung verlief erfolgreich, es wurde ein geeigneter Prozess beim ISE etabliert und Versuche zur Kantenpassivierung wurden erfolgreich durchgeführt. Details zu den Ergebnissen sind dem Bericht des Partners ISE zu entnehmen.

Des Weiteren wurde die notwendige Dokumentation erstellt. Dazu zählen Medienversorgung, Gefahrenanalyse, Risikobeurteilung und Explosionsschutzdokument.

Einbringung

Für die Einbringung der Anlage beim ISE war die Anbindung an die dortige Medien-Versorgung entscheidend. Dafür wurde ein sogenannter Medienstempel erstellt.

Software-Anpassung

Die Technikumsanlage LINEA kann sowohl im sogenannten Plasma-Modus als auch im ALD-Modus betrieben werden. Eine Kombination der beiden Modi war jedoch bislang nicht vorgesehen. Die Anhaftung der vormals thermischen ALD-Schichten an das Si-Substrat wurde bislang vom ISE über die Temperatur-unterstützte Chemisorption von Wasserdampf sichergestellt. Da dies im PEALD-Verfahren nicht möglich ist, war ein definierter Plasma-Vorbehandlungsschritt entscheidend. Die Anlagensteuerung wurde deshalb dahingehend verändert, dass Kombinationen aus reinen Plasma-Schritten und ALD-Schritten nun möglich sind. Die entsprechende Umsetzung der Prozessverknüpfung und Eingabemasken ist in Abbildung 9 - Abbildung 11 dargestellt.



Abbildung 9: Prozessverknüpfung.

The ALD Block configuration screen includes the following parameters:

- ALD Ventil: Beginn (0 ms), Puls (0 ms), Pause (0 ms), Anzahl (X 0)
- MFC 1 Ventil: Beginn (0 ms), Puls (0 ms), Pause (0 ms), Anzahl (X 0), Wert (0 sccm)
- MFC 2 Ventil: Beginn (0 ms), Puls (0 ms), Pause (0 ms), Anzahl (X 0), Wert (0 sccm)
- MFC 3 Ventil: Beginn (0 ms), Puls (0 ms), Pause (0 ms), Anzahl (X 0), Wert (0 sccm)
- Spulgas Ventil: Beginn (0 ms), Puls (0 ms), Pause (0 ms), Anzahl (X 0)
- RF ein: Beginn (0 ms), Puls (0 ms), Pause (0 ms), Anzahl (X 0), Wert (0 Watt)
- Nachlauf: 0 ms, Anzahl (X 0), Istwert (0)

System settings include: Spulgas Sollwert (0 sccm), Basisdruck (0,00 Pascal), Heizung Sollwert (0 °C), and Maximaler Temperatur ALD Block (Abschaltung) (0 °C).

Abbildung 10: ALD-Eingabemaske.

The Plasma input mask features a table for ramp parameters:

	Zeit 1	Rampe 1	Wert 1	Zeit 2	Rampe 2	Wert 2	Zeit 3	Rampe 3	Wert 3	Zeit 4	Rampe 4	Wert 4	Zeit 5	Rampe 5	Wert 5	Zeit 6	Rampe 6	Wert 6	Zeit 7
MFC 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MFC 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MFC 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Additional fields include: Basisdruck (0,0 Pa), MFC 1, 2, 3, and a red 'EL-PRESS 0,00 Pa Soll' indicator. Timing fields: Abfangzeit (0), Neue Startzeit (0), Schleifen (0). Process time: Prozesszeit (0 s), Startzeit (0 s), Restzeit (815 s).

Abbildung 11: Plasma-Eingabemaske.

Im ersten Schritt wurde dabei eine vorübergehende Datenbank-Basis verwendet. Für eine industrielle Anwendung war eine stabilere Lösung erforderlich mit separaten Datenbanken für

ALD-, Plasma- und übergeordnete Prozesse. Diese Lösung ist auch in Hinblick auf die Anbindung an Kundennetzwerke und die dortige Datenverarbeitung entscheidend und wurde entsprechend umgesetzt. Dabei sollte es überdies möglich sein, Prozessschritte wie Anpumpen, Temperierungen und Belüften beliebig anzuordnen und abzurufen (Abbildung 12).

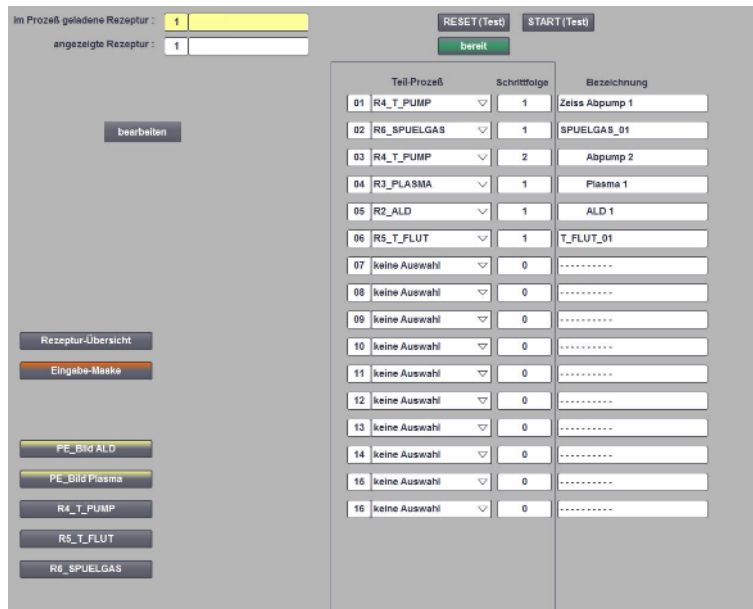


Abbildung 12: Prozesseingabe.

Untergeordnete Einzelprozesse werden in separaten Untermenüs definiert (Abbildung 13).

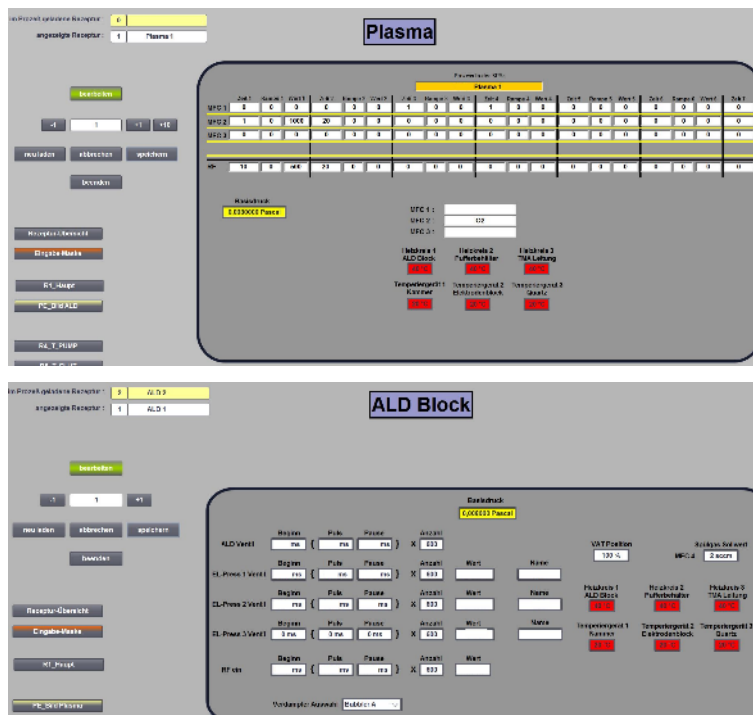


Abbildung 13: Unterprozesse am Beispiel Plasma-Aktivierung und PEALD.

Die Arbeiten im weiteren Verlauf zeigten, dass eine frei wählbare Abfolge von Plasma und PEALD-Prozessschritten nicht notwendig ist. Die Passivierungsergebnisse mit lediglich einer einmaligen Aktivierung und dann folgenden Al₂O₃-Beschichtung sind sehr gut (siehe AP 3). Aus diesem Grund wurde das zu Beginn favorisierte Konzept zur komplexen Prozessführung wieder verworfen. Abbildung 14 zeigt einen Screenshot der aktualisierten und vereinfachten Prozess-Eingabemaske. Die für die industrielle Umsetzung notwendige Prozessdatenbank und Datenaufzeichnung blieben davon unberührt.

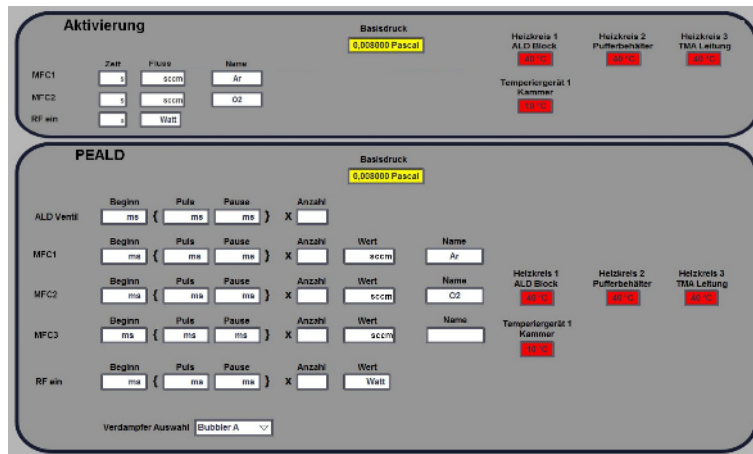


Abbildung 14: Vereinfachte Prozesseingabemaske mit Plasma-Aktivierung und PEALD.

Die neu aufzubauende LINEA wurde final für das Projekt ertüchtigt, frei wählbare Kombinationen aus Plasma- und PEALD-Prozessschritten auszuführen.

Weitere Softwareanpassungen erfolgten, um die Anlage für den zuvor im Projekt optimierten Prozessablauf zu ertüchtigen (Abbildung 15).

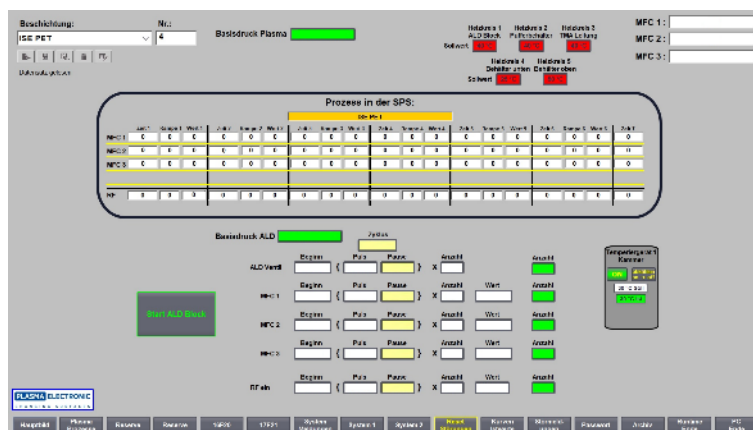


Abbildung 15: Finale Prozesseingabemaske.

Auch in der HMI-Schnittstelle waren Anpassungen gegenüber Standard-Anlagen notwendig. Dies betrifft in erster Linie die zahlreichen Heizkreise, die Temperierung und das Heizgebläse.

1. Geringe Prozesszeiten,
2. Geringere Prozesstemperaturen und dadurch weniger Aufheizzeiten und
3. Wegfall bzw. Verkürzung von Spülzeiten.

Da im Verlauf der Arbeiten die erzielten Ergebnisse durch Kantenpassivierung mittels ALD- Al_2O_3 auch mit nur 6 nm nomineller Dicke sehr erfolgversprechend waren, wurde diese Lösung weiter optimiert. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf folgende Punkte gelegt:

1. Erhöhung der Beladung
2. Weitere Reduktion der Prozesszeit
3. Anpassung des Aktivierungsschrittes

Beschichtungsversuche

In einem ersten Schritt wurde ein Standardprozess mit angepasster Schichtdicke auf vorprozessierten Test-Waferstücken des ISE bei Raumtemperatur appliziert und vermessen (s. Abbildung 17).

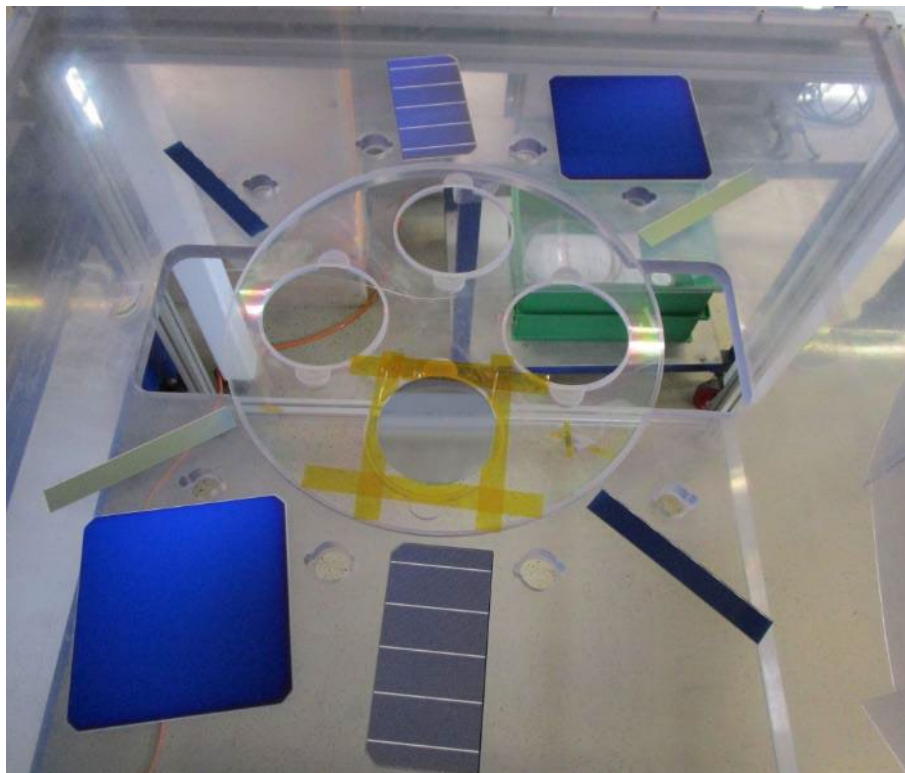


Abbildung 17: Vorversuch.

Dabei wurden die angestrebten Schichtdicken von 14 nm mittels Reflektometrie und Tastschnitt bestimmt (s. Abbildung 18 und Abbildung 19). Dabei zeigte sich, dass die Schichtdickenbestimmung durch Reflektometrie sehr genau möglich ist, was auch mit einer Ellipsometermessung bestätigt werden konnte.

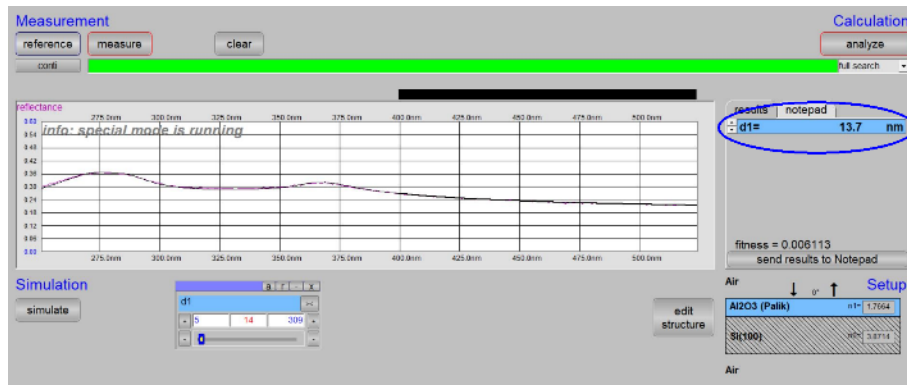


Abbildung 18: Beispielhaftes Schichtdickenergebnis mittels Reflektometrie – 14 nm.

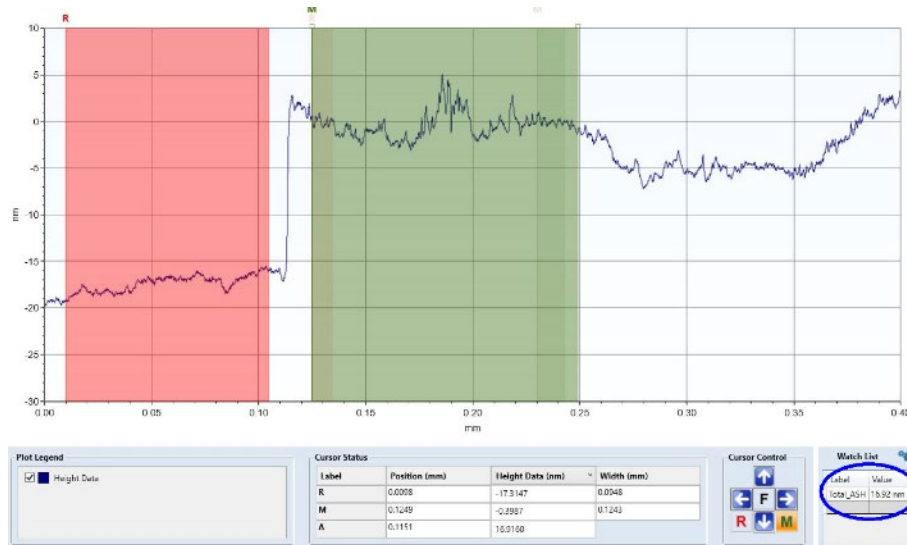


Abbildung 19: Beispielhaftes Schichtdickenergebnis mittels Tastschnitt – 17 nm.

Für weitere Versuche bei teilweise erhöhter Prozesstemperatur wurde die Anlage mit einem Temperiergerät ausgestattet und über den sonst gekühlten Elektrodenblock passiv geheizt (s. Abbildung 20).



Abbildung 20: Elektrodenblock-Temperierung.

Die Probenfixierung erfolgte auf einem dafür angepassten Werkstückträger aus Polycarbonat. Die Befestigung wurde stehend mittels Polyimidband umgesetzt (s. Abbildung 21).

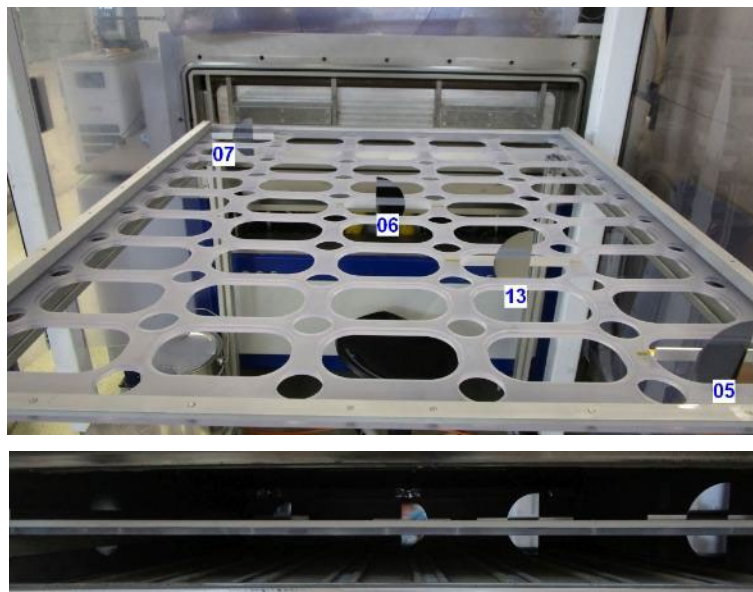


Abbildung 21: Probenposition auf angepasstem Werkstückträger (oben: außerhalb der Vakuumkammer; unten: in der Prozesskammer).

Eine vertikale Ausrichtung der Si-Wafer wurde gewählt, um die gewünschten Durchsätze im Produktionsverfahren über diese Maximierung der Anzahl der Wafer pro Charge zu erzielen. Mit dieser Anordnung wurden mehrere Versuche mit unterschiedlichen Schichtdicken (14 und 28 nm) und Prozessvariationen (z. B. längere Ruhepause zwischen zwei ALD-Zyklen) unternommen und durch das ISE analysiert. Die Ergebnisse dazu sind dem Bericht des Fraunhofer ISE zu entnehmen.

In weiteren Versuchen wurden die Ergebnisse für 14 nm nominell erfolgreich reproduziert sowie geringere Schichtdicken von nominell 6 und 3 nm erzeugt und untersucht. Dabei wurden auch unterschiedliche Prozesstemperaturen von 30 °C, 60 °C und 80 °C untersucht (siehe hierzu Abbildung 45).

Die angestrebten Schichtdicken wurden dabei mittels Schwingquarz (in situ) und Reflektometrie (ex situ) bzw. Ellipsometrie untersucht. Die ex situ Methoden bestätigten weitestgehend die nominellen Schichtdicken und es konnte von einem GPC (Growth Per Cycle) von etwa 1,5 Å/cycle ausgegangen werden. Dieser Wert stand allerdings im Widerspruch zu den Schichtdickenmessungen am ISE, bei denen eher ein Wert von 1,9 Å/cycle gefunden wurde (siehe ISE-Bericht). Eine Referenzmessung hat hier Klarheit gebracht (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Referenzmessvergleich bei Plasma Electronic und Fraunhofer ISE.

Probe	Messmethode	d / nm	GPC (Å/cycle)	n @ 633nm
1902 (FD)	PE Ellipsometrie	105,6	1,8	1,63
	PE Reflektometrie	105,9	1,8	1,64
	ISE Ellipsometrie	107,9	1,8	1,63
1903 (FU)	PE Ellipsometrie	104,1	1,7	1,62
	PE Reflektometrie	104,9	1,7	1,63
	ISE Ellipsometrie	106,3	1,8	1,62

Zusätzlich waren beide Werte deutlich höher als die aus der Literatur erwarteten 1,2 Å/cycle für thermische ALD-Prozesse. Dies könnte Folge gegenüber thermischer ALD veränderten Wachstumsmechanismen sein, bei denen pro Zyklus mindestens zwei Wachstumsschritte betrachtet werden müssen. Diese These stützt sich plausibel auf weitere Druckkurven und Schwingquarzergebnisse (s. u.). Auch waren vereinzelt Literaturhinweise dazu zu finden. Um Kontaminationseffekte auszuschließen, erfolgte die Probenfixierung, wie bereits erwähnt, rein unter Verwendung von Aluminium-Profilen (s. Abbildung 22 und Abbildung 23). Dabei wurde auch weiter auf die Verwendung von Polyimid-Band zur Fixierung verzichtet. Des Weiteren wurde nur noch hochreines (electronic grade) TMAI für die Versuche verwendet. Unter anderem dadurch konnten die Ergebnisse weitestgehend reproduziert werden.

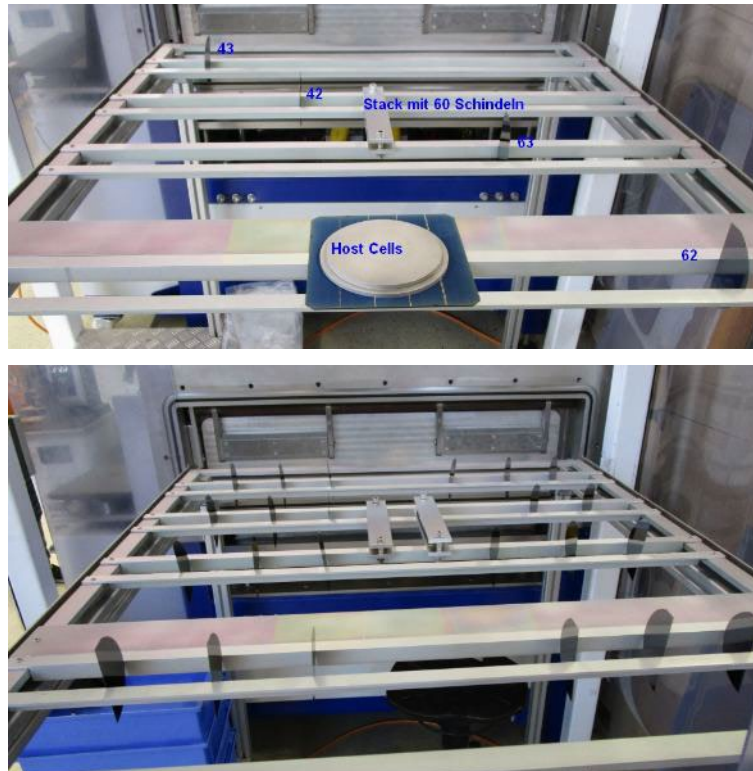


Abbildung 22: Probenposition auf angepasstem Werkstückträger.



Abbildung 23: Präparation von Stacks mit bis zu 70 gestapelten Wafern.

Dabei wurden neben den aufrecht stehenden Flow-Zone-Wafern auch prozessierte Solarzellen (Host Cells) und Stacks mit bis zu 70 Einzel-Schindeln untersucht. Die vertikal ausgerichteten Si-Wafer wurden mit Kombinationen von geringeren Schichtdicken (14 nm, 6 nm und 3 nm) bei unterschiedlichen Temperaturen (30 °C, 60 °C, 80 °C) prozessiert und durch das Fraunhofer ISE analysiert. Die Ergebnisse dazu sind dem Bericht des Fraunhofer ISE zu entnehmen.

Um weitere Erkenntnisse für verschiedene Anordnungen, Annealing-Methoden und Waferzellen zu gewinnen, wurden darauffolgende Versuche mit einer größeren Anzahl von Wafern und Schindelstacks durchgeführt (Abbildung 24).

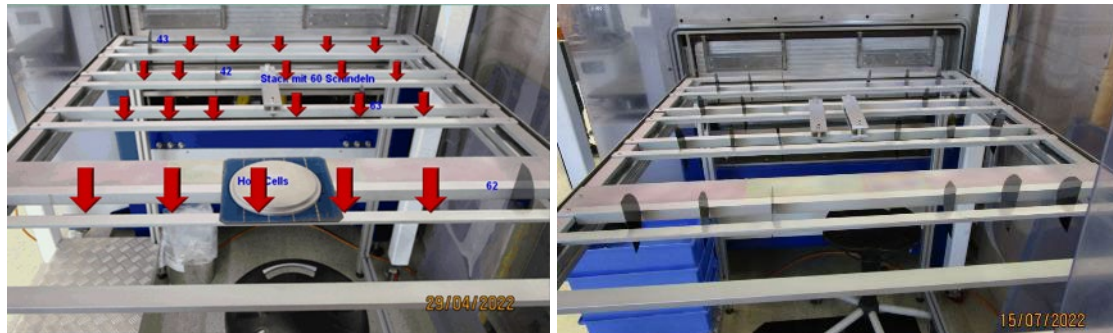


Abbildung 24: Vorgabe und Umsetzung der Beschichtung auf größeren Mustermengen.

Dabei wurde aufbauend auf den vorhergehenden Versuchen wieder bei 60 °C und 80 °C beschichtet. Bei 60 °C wurden dabei vergleichbare Ergebnisse zum Standard bei 80 °C erzielt (Abbildung 25), was für die Passivierung von Zellen unterschiedlichsten Typs einen deutlichen Vorteil darstellt.

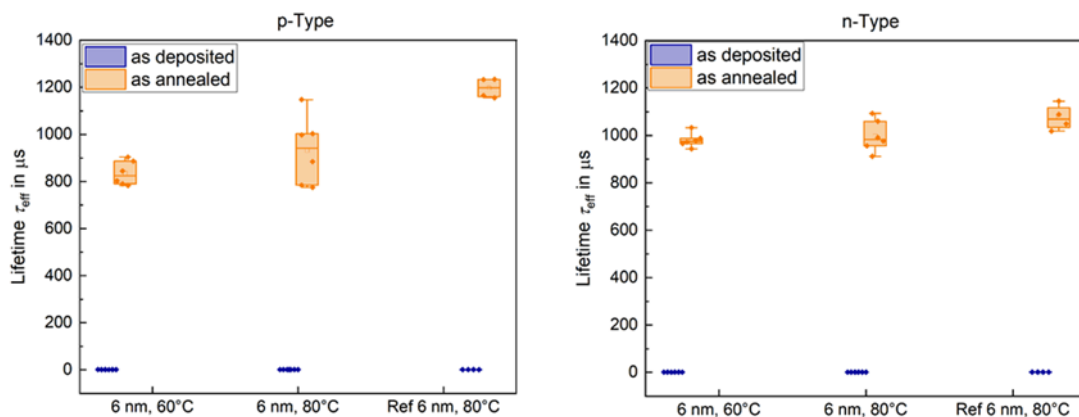


Abbildung 25: Ergebnisse der Lebensdauerexperimente am ISE.

Dabei wurden mit der *in situ* QCM – Methode (siehe unten) deutliche Unterschiede in der Wachstumsdynamik festgestellt (Abbildung 26).

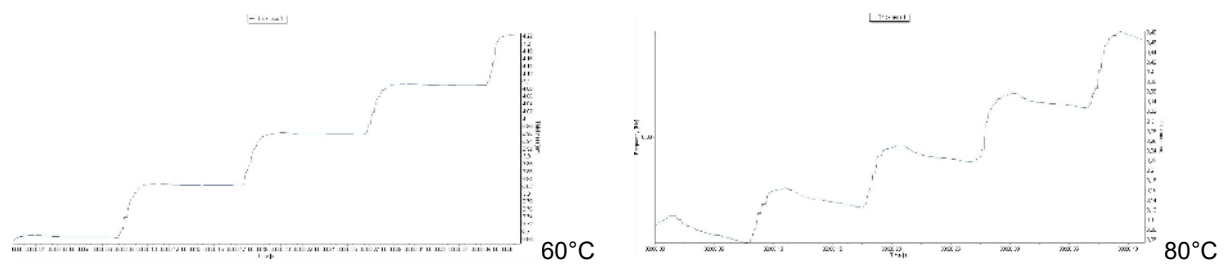


Abbildung 26: QCM bei 60 °C (links) und 80 °C (rechts).

Die gegenüber der Literatur erhöhte Abscheiderate könnte auch durch PECVD-Anteile und dem unerwünschten Einbau von Kohlenwasserstoff aus den Liganden des TMAI verursacht sein. Deshalb wurden folgende weitere Versuche durchgeführt:

1. 80 °C, wie oben gezeigt

2. 80 °C, mit längerem Purge nach der TMAI-Phase
3. 80 °C, mit längerem Auspumpen nach O₂-Phase

Die Untersuchungen zu diesen Versuchen erfolgten am ISE. Alle Ergebnisse zu den Lebensdaueruntersuchungen sowie Ergebnisse zu unterschiedlichen Annealing-Methoden sind dem Bericht des Fraunhofer ISE zu entnehmen.

In einer Reihe von Versuchen wurden verschiedene Abstände der Testwafer untersucht, um die Beladungsdichte zu optimieren.

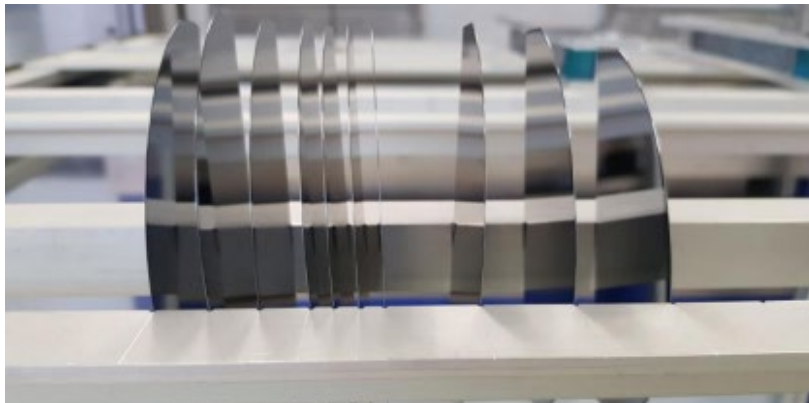
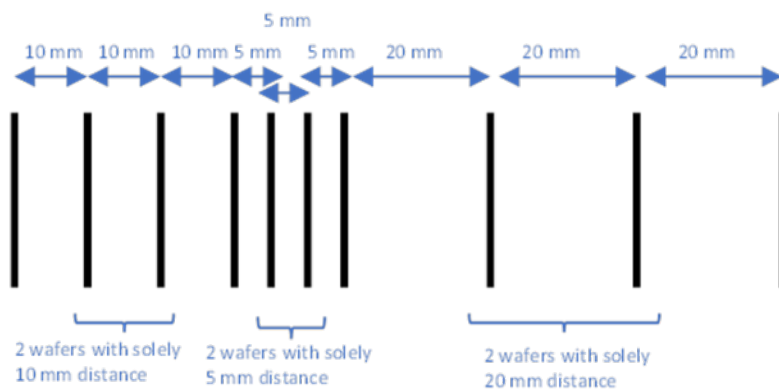


Abbildung 27: Konzeption und Aufbau Versuche zum Abstand.

Des Weiteren wurden Versuche an verschiedenen Zelltypen mit größerer Anzahl an Schindeln durchgeführt (Abbildung 28).

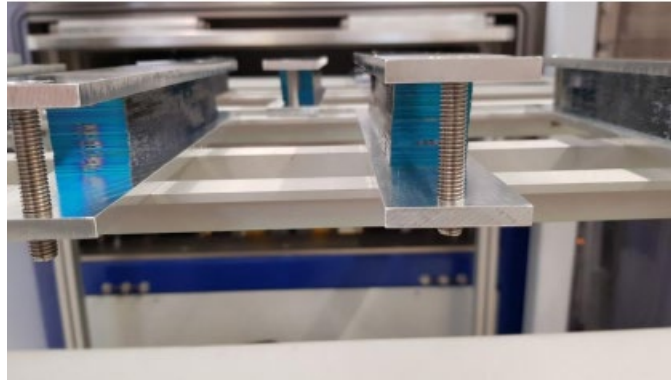


Abbildung 28: Präparation von Stacks mit bis zu 70 gestapelten Wafern.

Um weitere Erkenntnisse für verschiedene Anordnungen, Annealing-Methoden und Waferzellen zu gewinnen, wurden darauffolgende Versuche mit einer größeren Anzahl von Wafern und Schindelstacks durchgeführt (Abbildung 29).

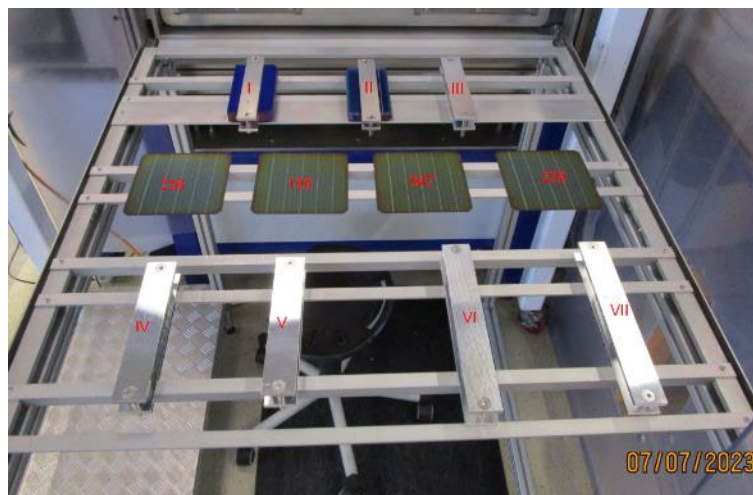


Abbildung 29: Beschichtung auf größeren Mustermengen.

Die Auswertung der Lebensdauerversuche sowie der Annealing-Methoden konnte abgeschlossen werden. Es konnten keine wesentlichen Verbesserungen von Abscheiderate und Lebensdauer durch Variation der Purge- und Auspump-Phasen erzielt werden.

Zusammen mit dem Fraunhofer ISE wurden weitere Versuche zur Optimierung und Anpassung an verschiedene Solarzellentypen mit größeren Schindelstapelmengen durchgeführt. Dabei wurden zwei Versuche mit 6 nm bei 80 °C und ein Versuch mit 12 nm nomineller Schichtdicke durchgeführt.

Nachdem es Hinweise auf einen signifikanten Einfluss des Aktivierungsprozesses auf die Lebensdauerergebnisse gab, wurden zudem weitere Optimierungsversuche gefahren (Tabelle 2: Versuche V19-V23).

Tabelle 2: Optimierungsversuche zu Aktivierung und Annealing.

AlOx-V-Nr.	Proben-Nummern	Prozess	Annealing
V19	425, 429, 434	Referenz	ohne
V20	446, 447, 448	Aktivierung mit 3-facher Leistung	ohne
V21	441, 442, 445	Aktivierung mit doppelter Zeit	ohne
V22	435, 437, 438	Aktivierung mit doppelter Zeit + 3-facher Leistung	ohne
V23	433, 436, 440	Aktivierung mit Alternativgas	ohne
V19	428	Referenz	5min bei 200°C ... 300°C
V19	432	Referenz	5min bei 300°C ... 400°C
V19	430	Referenz	2min bei 250°C ... 350°C

Insofern wurden die Lebensdauerversuche fortgeführt, da sich das Konsortium noch signifikante Verbesserungen erhoffte.

Ebenso wurde eine weitere Nachbehandlungsmethode etabliert und untersucht, um diese in ein Anlagengesamtkonzept zu integrieren weiter zu optimieren. Hierzu wurde ein neuer Aufbau zur schnellen thermischen Nachbehandlung ausgearbeitet und aufgebaut. Dabei wurden kommerziell erhältliche Infrarot-Zwillingsstrahler mit einer mittleren Heizfadentemperatur 2400 °K im Abstand wenigen mm vor die beschichteten Waferproben gestellt. Ein Leistungstransformator dient dabei zur Regelung.

**Abbildung 30: Testaufbau IR-Annealing.**

Für verschiedene Temper-Zeiten und Temperaturen wurden Proben aus V19 verwendet (Tabelle 2).



Abbildung 31: Schichtdicken und Lebensdauerergebnisse des ISE an den Proben aus Tabelle 2.

Die Lebensdauerergebnisse des ISE an den Proben aus Tabelle 2 sind in Abbildung 31 zusammengefasst. Für detailliertere Informationen sei auf den Bericht des ISE verwiesen. Sowohl die Ergebnisse für die verschiedenen Aktivierungsschritte als auch für die neue Nachbehandlungsmethode waren vielversprechend. Es zeigten sich dabei Hinweise, dass es eine für die Lebensdauer optimale Aktivierungsenergie gibt.

Aus diesem Grund wurde der Parameterraum sowohl für die Aktivierung (Zeit, Leistung) als auch für die Nachbehandlung (Zeit, Temperatur) nochmals erweitert.

Tabelle 3: Parametervariationen Aktivierung und thermische Nachbehandlung.

Versuch #	Proben #	Aktivierung
27	502, 503, 504	6nm Standard ALD Prozess, ohne Aktivierung
28	508, 505, 506	6nm Standard ALD Prozess, Aktivierung mit 3x Leistung
29	507, 515, 509	6nm Standard ALD Prozess, Aktivierung mit 6x Leistung
30	511, 510, 512	6nm Standard ALD Prozess, Aktivierung mit 4x Zeit
31	516, 606, 623 624*, 607*, 621*, 622*, 619*, 620*, 514*, 618*, 614*, 605*, 608*, 610*, 609*, 612*, 616*	6nm Standard ALD Prozess, Standardaktivierung *für Annealing
32	617, 604, 603	Nur Aktivierung (3x Leistung, 4x Zeit)

Annealing Wafer ID	Annealing Temperatur	Annealing Zeit
607 + 624	Not annealed	Not annealed
621 + 622	150 °C	2,5 min
614 + 620	250 °C	2,5 min
609 + 610	250 °C	5 min
605 + 619	200 °C	5 min
608 + 612	160 °C	5 min
616	130 °C	5 min
618	140 °C	5 min

Aufgrund der vielversprechenden Lebensdauerergebnisse mit der neuen Nachbehandlungsmethode wurde diese weiter optimiert. Dabei wurde auch ein weiterer Infrarot-Zwillingsstrahler integriert, um auch größere Waferformate zugänglich zu machen.



Abbildung 32: Optimierter Testaufbau IR-Annealing.

Für die Variation der Nachbehandlungstemperaturen gab es weitere vielversprechende Ergebnisse, die in Abbildung 33 dargestellt sind.

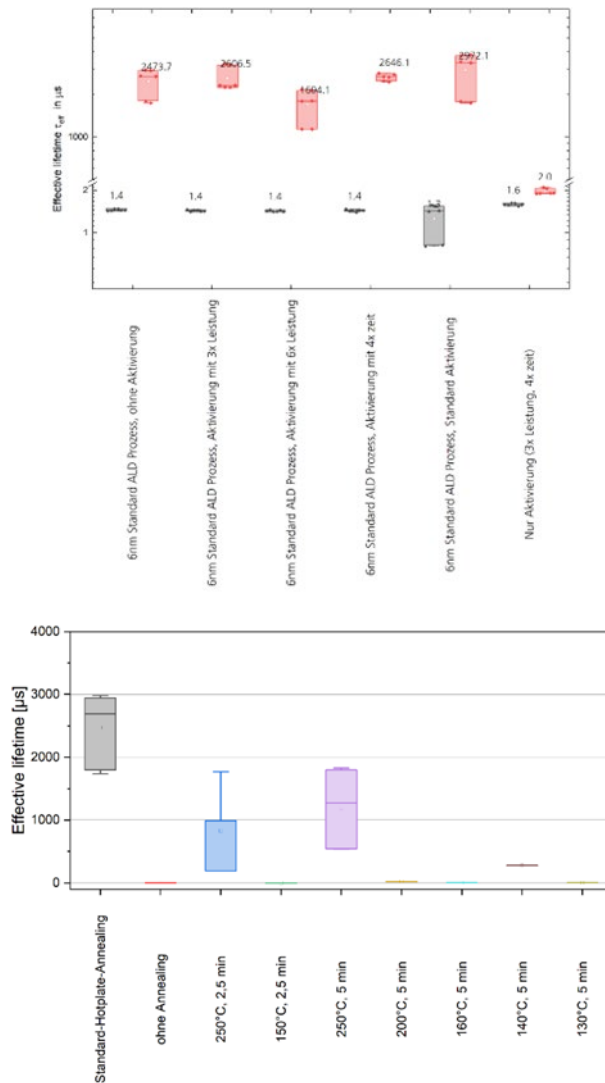


Abbildung 33: Ergebnisse für verschiedene Nachbehandlungsschritte.

Das Hotplate-annealing bei ISE ermöglichte hier die längsten Lebensdauern. Auch das Annealing bei 250 °C bei Plasma Electronic erreichte sehr gute Werte.

Zur weiteren Optimierung des Nachbehandlungsschrittes wurde der Testaufbau weiter optimiert und verschiedene Temperaturprofile wurden gefahren.

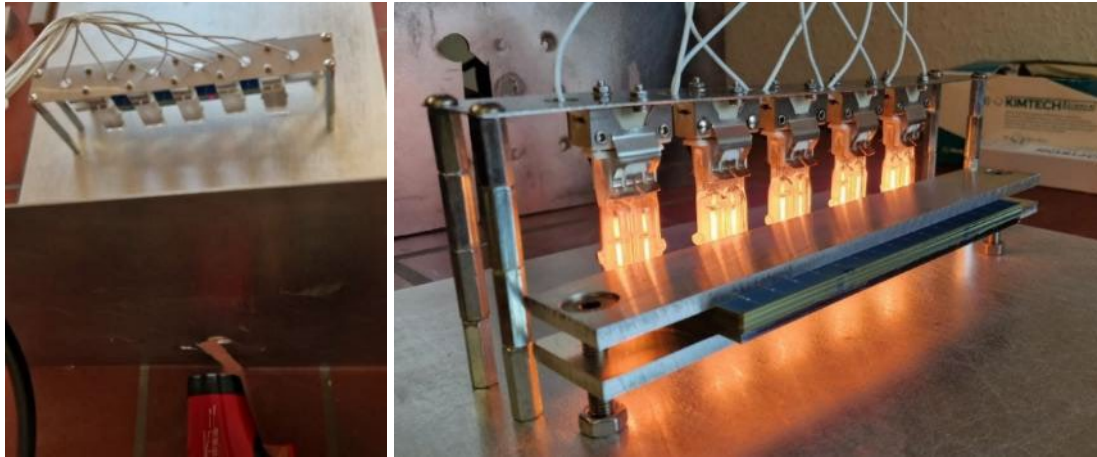


Abbildung 34: Optimierter Testaufbau IR-Annealing.

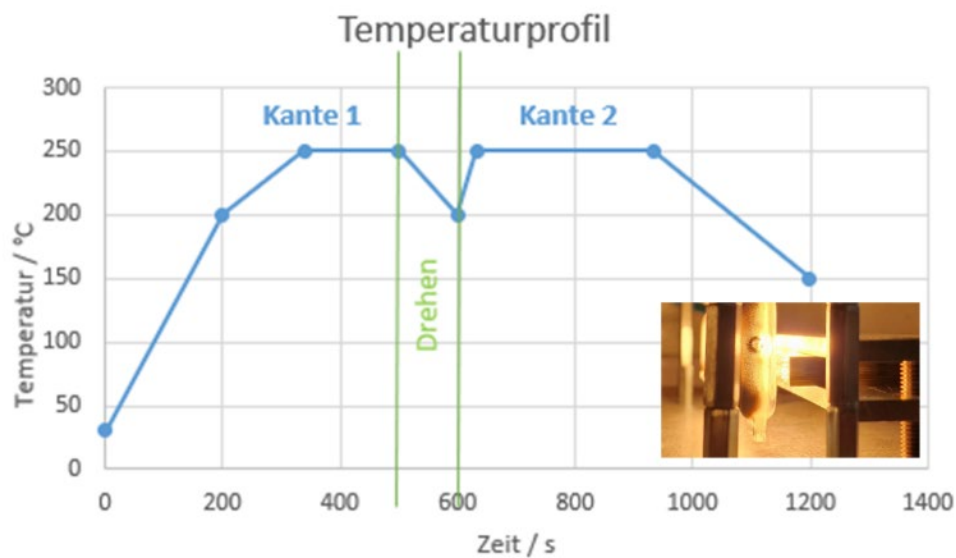


Abbildung 35: Temperaturprofil.

Versuche mit Industrie Halter

Ziel dieser Versuche war es, neue Halter der Fa. M10 (Abbildung 36) mit unterschiedlichen Abständen für die Stacks zu testen und zu versuchen, herauszufinden, ob es bei der RF-Einkopplung irgendwelche Überraschungen gibt. Außerdem wurde die Homogenität bei unterschiedlichen Abständen untersucht.

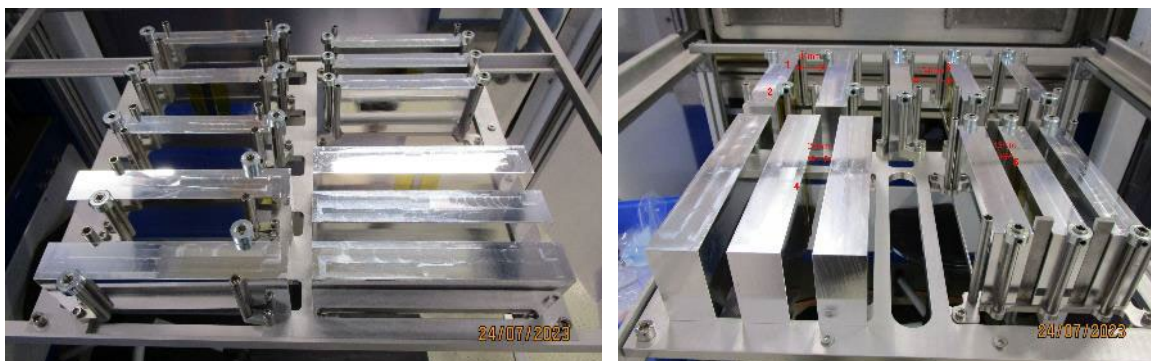


Abbildung 36: Neu M10 Industrie Halter (links) und Probenpositionen mit Abstand (rechts).

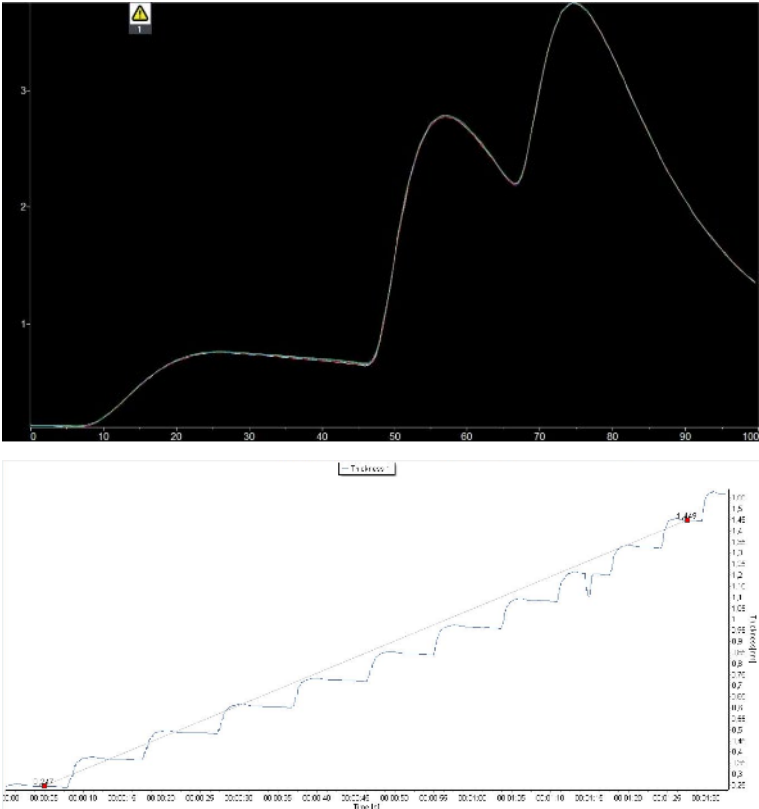


Abbildung 37: Druckkurve und QCM Messungen.



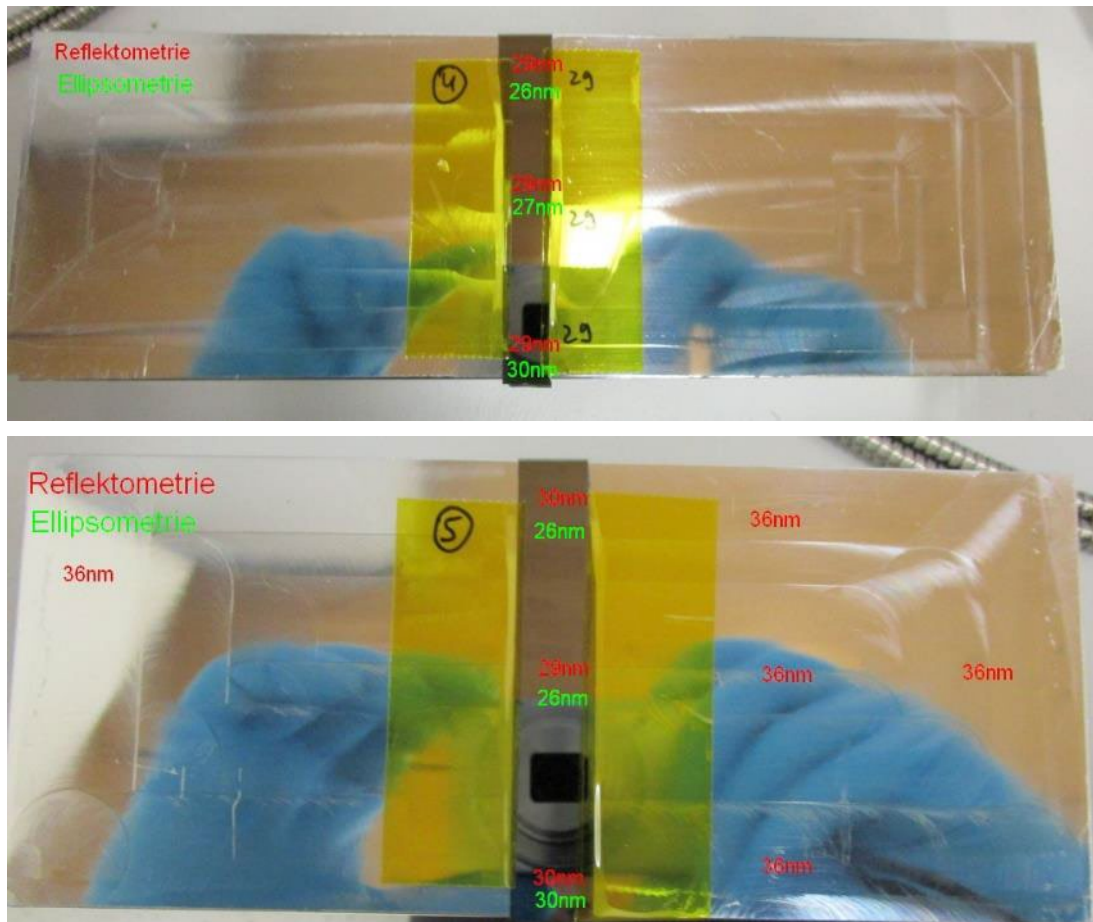


Abbildung 38: Schichtdicke gemessen mit Ellipsometrie und Reflektometrie.

Die Reflektometrie-Messungen führten zu folgendem Fazit:

- Reflektometrie ist sowohl auf dem Si als auch auf dem frisch im Plasma gereinigten Aluminium möglich
- Auf dem Al sind die Werte etwas höher (evtl. auf Grund der nativen Oxidschicht)
- Bei den verwendeten Abständen von 13 bis 54 mm gibt es keine signifikanten Unterschiede in der Schichtdicke (Genauigkeit der Messung bei ca. ± 5 nm)
- Auch auf der Probe 2 (direkt hinter der runden Haltestange) kein Gradient zu erkennen (Messfleck < 1 mm)

Die Ellipsometrie-Messungen führten zu folgendem Fazit:

- Bei den verwendeten Abständen von 13 bis 54 mm gibt es keine signifikanten Unterschiede in der Schichtdicke (Genauigkeit der Messung ca. ± 2 nm)
- Auch mit Ellipsometrie gibt es keinen belastbaren Hinweis auf niedrigere Schichtdicken hinter der Haltestange
- Es gibt eine Tendenz zu etwas höherer Schichtdicke nahe zur Elektrode
- Eine schlechtere Passivierungswirkung kann *nicht* auf eine geringere Schichtdicke im Zwischenraum zurückgeführt werden.

Die Versuche mit dem industriellen Halter wurden somit abgeschlossen. Erfreulicherweise gab es keinen nennenswerten Einfluss des Beschichtungshalters oder der Beladung auf das Schichtergebnis.

Beschichtungsversuche und Aufskalierung auf industriellen Schindelhalter und große Mengen

Um eine Aufskalierung des Prozesses zu demonstrieren, wurden weitere Versuche mit verschiedenen Halterkonzepten und großen Beladungen durchgeführt. Erfreulicherweise gab es auch hier keinen nennenswerten Einfluss der Beschichtungshalters oder der Beladung auf Schichtdicke oder Brechungsindex.



Abbildung 39: Industrielle Schindelhalter (oben) und hohe Beladungsdichten (unten).

Prozessüberwachung

Neben den oben erwähnten Methoden (OES und QCM) wurde die Anlage mit einer schnellen Drucküberwachung ausgestattet. Diese Drucküberwachung ist in der Lage, den Druckverlauf während eines ALD-Zyklus aufzunehmen. In Abbildung 40 ist beispielhaft der Vergleich der Druckkurven ohne und mit Plasma-Leistung gezeigt.

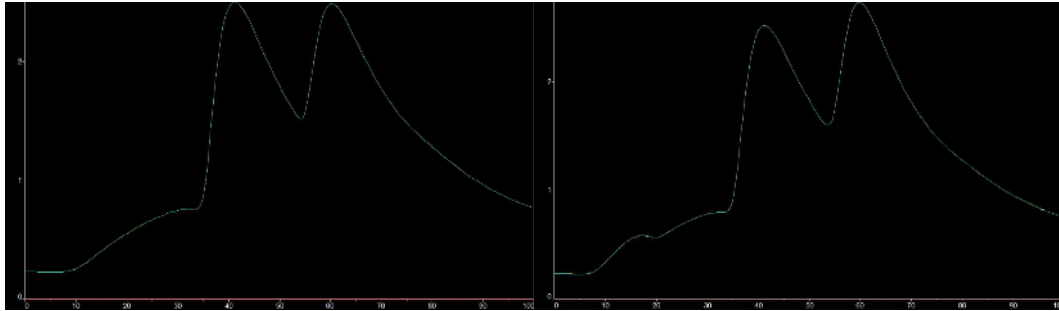


Abbildung 40: Druckkurve ohne (links) und mit Plasma (rechts).

Aus diesem und weiteren Versuchen (z. B. Abbildung 41) ließ sich die Arbeitshypothese ableiten, dass der Plasma-ALD-Prozess aus zwei Teilschritten besteht, wobei die Umsetzung des Trimethylaluminium (TMAI) beim ersten Schritt mittels Sauerstoffradikalen unter Bildung von Wasser, beim zweiten mittels des dann chemisorbierten Wassers zu Methan erfolgt.

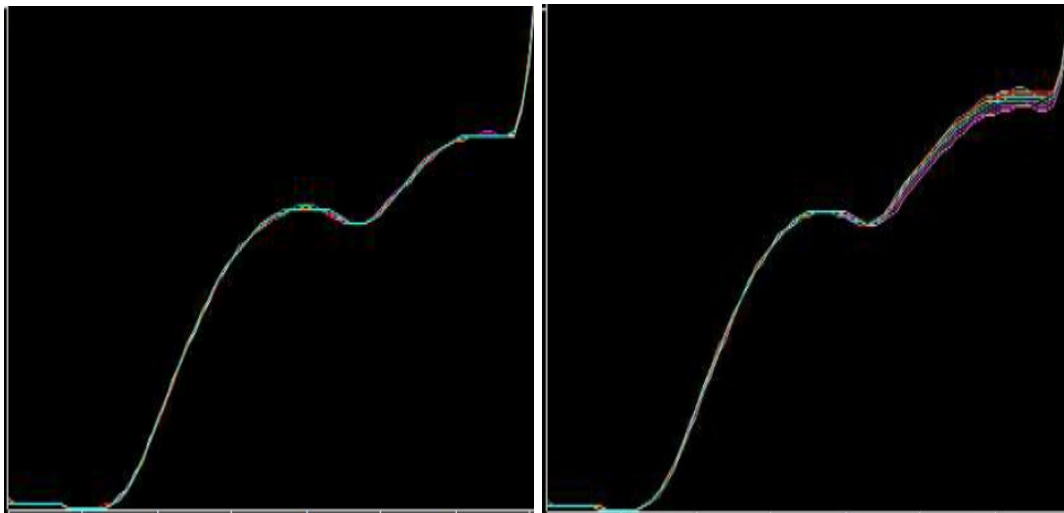


Abbildung 41: Druckkurven bei verschiedenen TMAI-Temperaturen 21 °C und 25 °C).

Dies erklärt auch die erhöhte Beschichtungsrate bei der Plasma-ALD gegenüber thermischer ALD.

Zur Aufklärung dieses Sachverhaltes und zur Prozessüberwachung wurde eine QCM-Einrichtung installiert. Dieser sogenannte Schwingquarz erlaubt die zeitaufgelöste Darstellung kleinster Masseänderungen (vgl. Abbildung 42). Der Einfluss der Substrattemperatur auf den Beschichtungsvorgang konnte so eindeutig gezeigt werden. Die Ergebnisse stärken zudem die oben erwähnte Arbeitshypothese zum zweistufigen Wachstumsmechanismus.

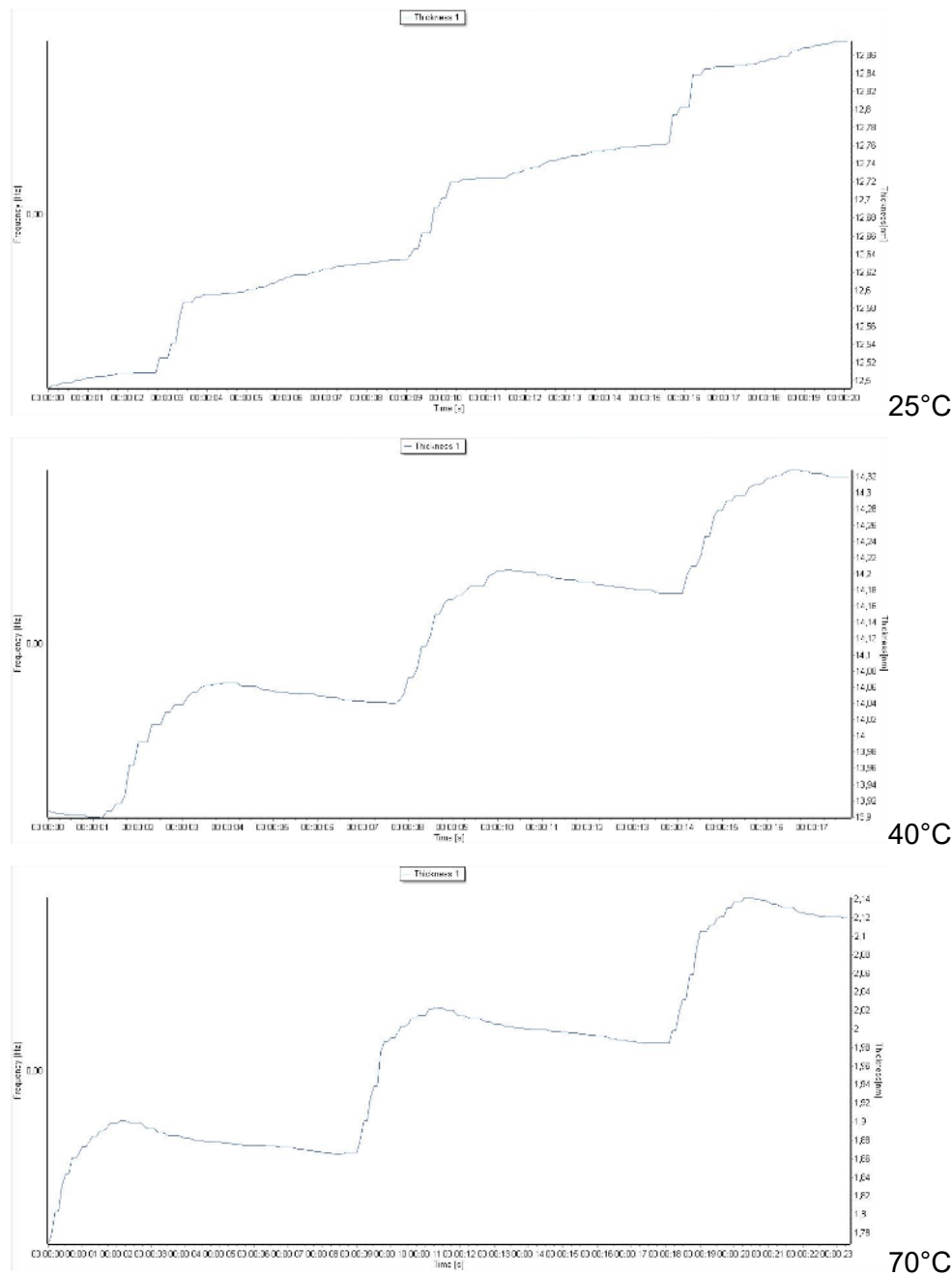


Abbildung 42: Zeitaufgelöste Massendeposition (QCM) bei unterschiedlichen Substrattemperaturen.

Mit den Erkenntnissen aus den Untersuchungen des Fraunhofer ISE wurde eine neue Versuchsreihe gefahren. Folgende Änderungen wurden vorgenommen:

Konstruktion und Fertigung eines neuen Warenträgers, der keine Kunststoffe enthält. Zudem ist kein Polyimidband zur Befestigung notwendig (vgl. Abbildung 43). Mit diesem Werkstückträger können zukünftig auch viele Wafer mit kleinem Abstand prozessiert werden, um eine dichtere Beladung zu simulieren.

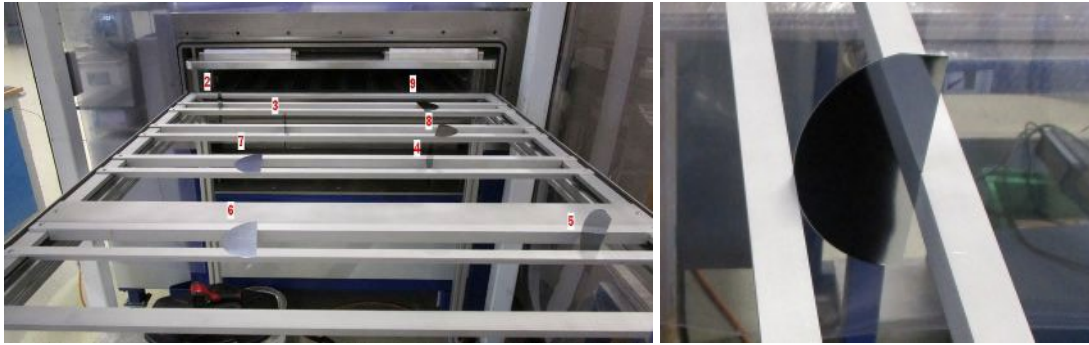


Abbildung 43: Neuer Werkstückträger (links) und Detailbild (rechts).

Zusätzlich wurde statt des bisher verwendeten *ALD-Grade-TMAI* ein Material mit höherer Reinheit verwendet (*Electronic Grade*). Wir erhofften uns dadurch weniger Störstellen und bessere Passivierungsergebnisse.

Um die Homogenität der Beschichtung zu verbessern, wurde zusätzlich ein Prozess mit höherer TMAI-Beladung aber gleicher Schichtdicke gefahren (vgl. Abbildung 44).

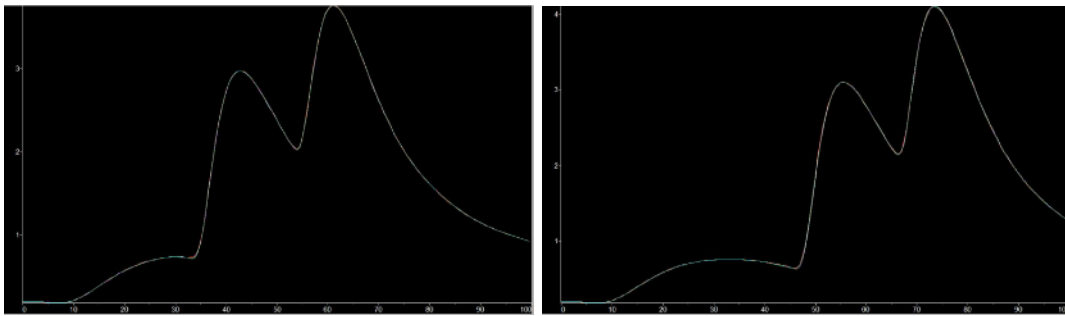
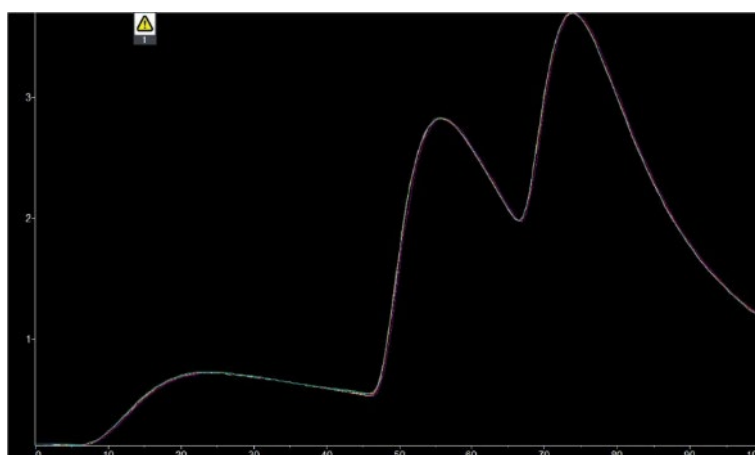


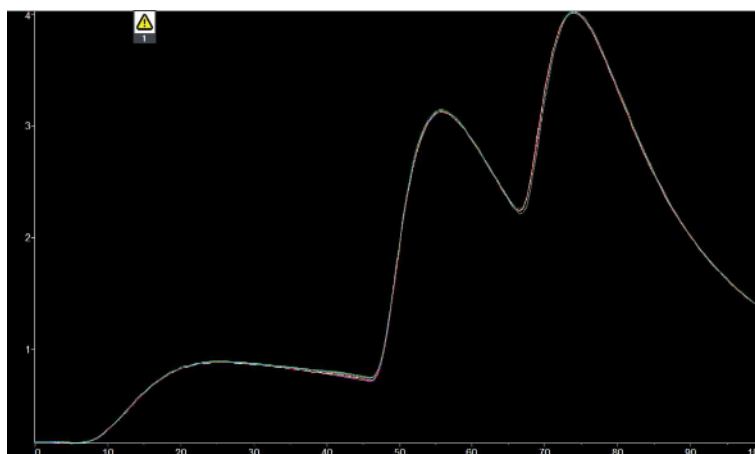
Abbildung 44: Druckkurven mit einfacher und doppelter TMAI-Beladezeit.

Druck

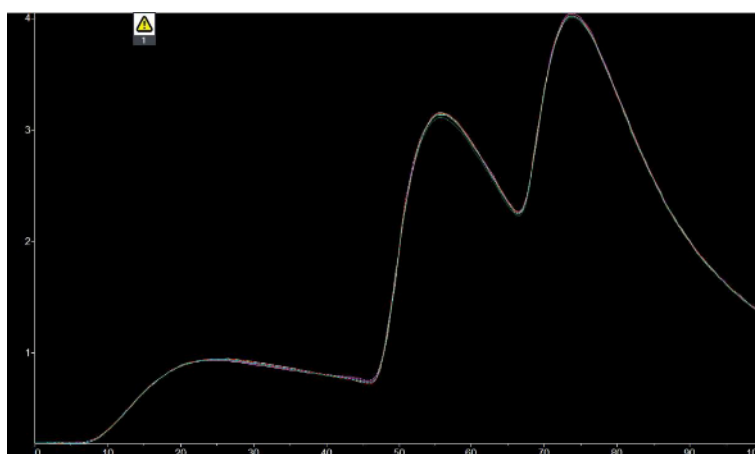
In Abbildung 45 sind Druckkurven bei unterschiedlichen Prozesstemperaturen dargestellt.



30 °C



60 °C



80 °C

Abbildung 45: Druckkurven bei unterschiedlichen Prozesstemperaturen.

Bei genauerer Analyse zeigt sich, dass der Druckanstieg zu Beginn eines Zyklus bei 60 °C und 80 °C etwas stärker ausfällt als bei 30 °C.

QCM

Zum besseren Verständnis der Wachstumsdynamik und zur Prozessüberwachung wurden weitere QCM-Analysen durchgeführt. Der Einfluss der Substrattemperatur auf den Beschichtungsvorgang konnte somit bestätigt werden (vgl. Abbildung 46).

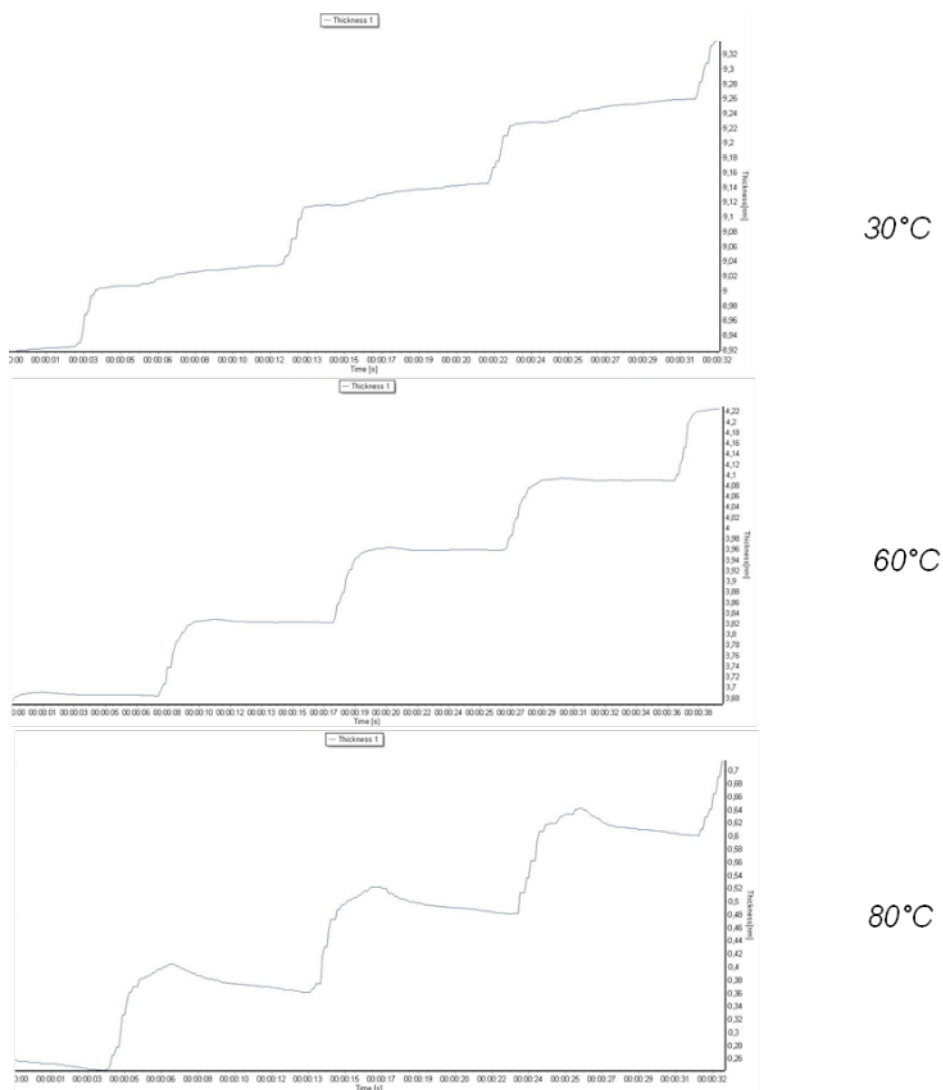


Abbildung 46: Zeitaufgelöste Massendeposition (QCM) bei unterschiedlichen Substrattemperaturen.

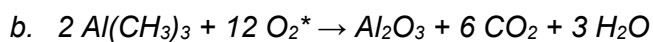
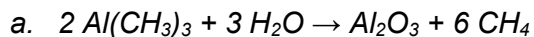
Wie schon bei den vorhergehenden Versuchen ist eine je nach Kammertemperatur unterschiedliche Wachstumsdynamik deutlich zu erkennen. Bei höheren Temperaturen kommt es zu Beginn jedes Zyklus zu einer deutlich ausgeprägteren Massenzunahme. Diese Massenzunahme wird dann aber während der Plasmaphase wieder egalisiert.

Eine mögliche Erklärung ist, dass durch das aus dem Vorzyklus während der Plasma-Phase erzeugte und ggfs. adsorbierte Wasser (siehe Formel 1 b) in Verbindung mit der erhöhten Temperatur mehr TMAI zunächst in einer Art thermischer ALD umgesetzt wird. Dabei reicht die Temperatur allerdings nicht für eine vollständige Umsetzung und es verbleibt ein

Ligandenrest, der dann im Plasma wieder abgebaut wird. Bei niedriger Temperatur dieser Effekt durch die Umsetzung von Sauerstoffradikalen deutlich reduziert.

Da die chemischen Reaktionen vergleichsweise schnell ablaufen, müssten sich also zu Beginn Methan oder andere Kohlenwasserstoffgase bilden (siehe Formel 1 a). Diese bzw. Plasma-Reaktionsprodukte davon müssten mittels OES identifizierbar sein.

Formel 1: Reaktionsgleichungen der vollständigen Umsetzung von TMAI in Aluminiumoxid.



OES

Für die OES wurde ein handelsübliches Spektrometer EMICON SA mit entsprechender Software der Fa. Plasus verwendet (s. Abbildung 47).



Abbildung 47: EMICON SA OES-Spektrometer mit abgewinkeltem Kopf inkl. Beschichtungsschutz.

Durch das Pulsen des Plasmas ist die Integrationszeit nicht beliebig hoch wählbar. Dennoch war es möglich, Spektren des durch das Plasma ausgesandten Lichts aufzunehmen. Dabei wurde das Plasma mit und ohne vorherige TMAI-Zugabe verglichen (s. Abbildung 48). Durch TMAI-Zugabe zeigt sich dabei eine charakteristische Zunahme praktisch aller relevanter Linien, die sämtlich mit der Bildung von Kohlenwasserstoffen, Kohlenmonoxid und Wasserstoff in Verbindung gebracht werden können.

Zur Prozessüberwachung eignen sich sogenannte Monitor-Tracks (integrierte optische Linien), die während des Prozesses aufgezeichnet werden (vgl. Abbildung 49 und Abbildung 50). Deutlich ist auch hier die Zunahme praktisch aller relevanter Linien mit Ausnahme der Sauerstoff-Linien. Letzteres kann einfach durch die Abnahme der Sauerstoffkonzentration im Plasma durch chemische Reaktionen erklärt werden. Besonders prominent ist die Zunahme der CO und OH-Linien, was auch so aus Formel 1 b erwartet werden kann. Aber auch die Wasserstofflinien Ha/b zeigen eine deutliche Erhöhung, was sowohl auf die Bildung von Wasser als auch CH₄ hindeuten könnte.

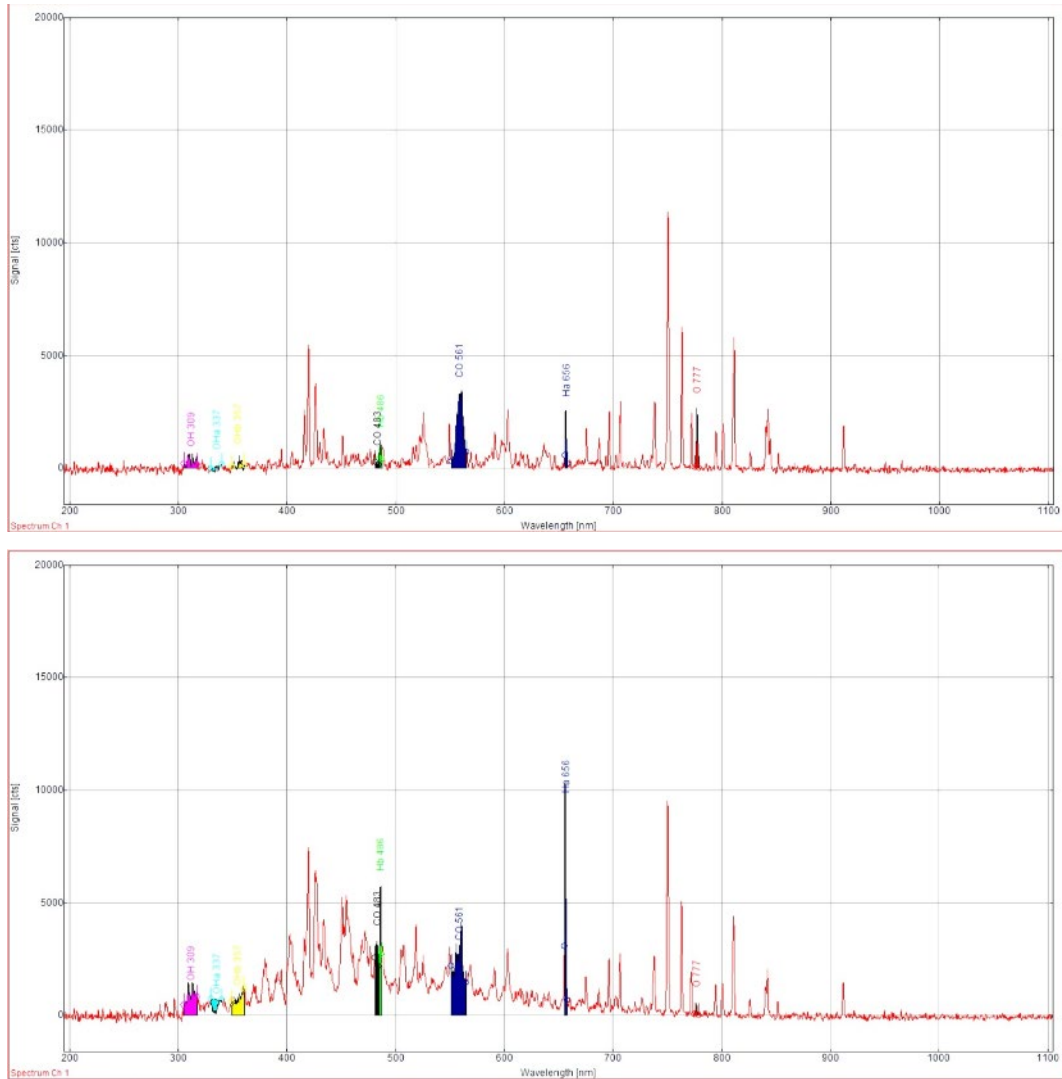


Abbildung 48: OES-Spektrum ohne (oben) und mit TMAI-Zugabe (unten).

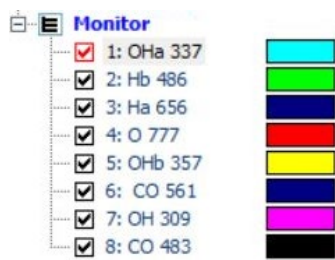


Abbildung 49: OES Monitor - Tracks Farbkodierung.

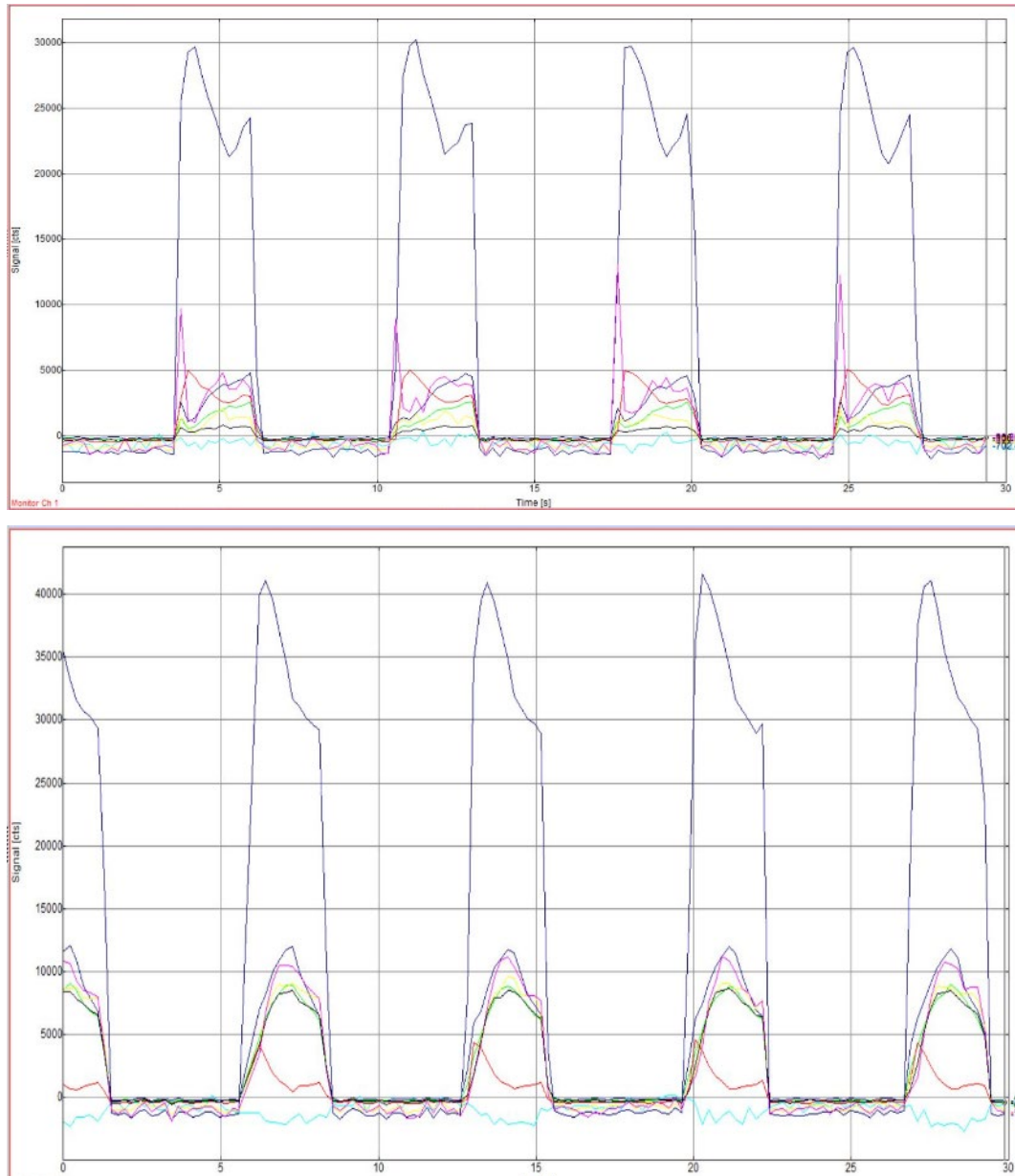


Abbildung 50: OES Monitor-Tracks Zeitverlauf ohne (oben) und mit TMAI-Zugabe (unten).

Zusammenfassung und Fazit

Das Vorhaben wurde erfolgreich abgeschlossen und die Projektziele wurden erreicht. Die Versuchsanlage des ISE konnte erfolgreich aufgebaut und in Betrieb genommen werden. Es wurden geeignete Prozesse für die Kantenpassivierung und eine Nachbehandlung ermittelt und umgesetzt. Auch eine geeignete Prozessüberwachung konnte erfolgreich ausgearbeitet und realisiert werden.

Folgende Meilensteine und Projektziele wurden erreicht:

Meilenstein	Titel	Status
Bezeichnung		
MS1-15c	PEALD-Anlage für Kantenpassivierung M12-Wafer in Betrieb genommen	Wurde mit Verzögerung erfüllt
MS3-24	Kanten-Passivierungsprozess auf Industrieanlage erreicht vergleichbares Niveau wie Referenzprozess auf Laboranlage	Abgeschlossen
MS3-30	Verlustarmer Prozess zur thermischen Nachbehandlung der Kantenpassivierung ausgearbeitet	Abgeschlossen
MS3-36	Alternative Ansätze zur Kantenpassivierung evaluiert und Bewertung im Vergleich zu ALD-Prozess durchgeführt	Abgeschlossen

2.2. **Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

Die Bearbeitung des Teilprojektes erforderte insbesondere hohe Personalaufwände für Durchführung der umfangreichen Arbeiten. Wichtigste Kostenposition sind somit Personalkosten. Weiterhin fielen Materialkosten für die Durchführung der Versuche sowie in geringem Umfang sonstige Kosten an.

2.3. **Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Die Notwendigkeit der Arbeiten folgte aus der Bedeutung der Kantenpassivierung von Zell-Modulen für die verlustarme Modulintegration von Solarzellen. Die Ausarbeitung der Kantenpassivierung für Teil-Zellen im Industrie-Maßstab im Rahmen des Teilprojektes erfordert umfangreiche Untersuchungen und Arbeitsaufwände, da zuvor keine entsprechenden Technologien verfügbar oder bekannt waren. Die Arbeiten wurden auf den nötigen Umfang begrenzt.

2.4. Voraussichtlicher Nutzen/Verwertbarkeit der Ergebnisse

PLASMA ELECTRONIC plant die Verwertung der Projektergebnisse durch Vermarktung des erarbeiteten Prozesses und der Anlagen für die Kantenpassivierung, insbesondere im Bereich der Solarzellen.

2.4.1. Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Bezeichnung	Zeithorizont	Verwertung
Sicherung von Arbeitsplätzen	Während Laufzeit Nach Projektlaufzeit	Beim Partner Plasma Electronic wurden durch die Finanzierung des Projektes Arbeitsplätze gesichert und Kompetenzen aufgebaut, welche auch nach der Projektlaufzeit für weitere Industriekunden sowie für Produkte und Märkte über die Photovoltaik hinaus interessant sind.
Verbesserung der Wettbewerbssituation	bis 5 Jahre nach Projektlaufzeit	Mit den erzielten Ergebnissen wird der Partner Plasma Electronic in die Lage versetzt, produktionstechnologische Lösungen für ein neues Marktsegment anzubieten. Dadurch kann die Wettbewerbsposition nachhaltig verbessert werden.
Nachhaltigeres Wirtschaften	5 bis 20 Jahre nach Projektlaufzeit	Durch die erreichten Forschungsergebnisse lässt sich für den Partner Plasma Electronic eine führende Rolle für die Plasmabeschichtung von Solarzellen in einem starken Wachstumsmarkt im Sinne eines nachhaltigen Wirtschaftens etablieren.
Nutzen für andere Anwender	3 bis 5 Jahre nach Projektlaufzeit	Wesentliche Projektergebnisse sollen veröffentlicht werden. Damit stehen die Ergebnisse anderen Anwendern zur Verfügung.

2.4.2. *Wissenschaftliche und / oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende*

Bezeichnung	Zeithorizont	Verwertung
Schaffung von Wissen zur Kompetenzerhaltung	Während der Laufzeit	Die zu erwartenden Projektergebnisse ermöglichen dem Partner Plasma Electronic den gezielten Ausbau seiner Fachkompetenz.
Erschließung neuer FuE-Themen	bis zu 3 Jahre nach Laufzeitende	Neue Themengebiete für zukünftige F&E Projekte werden basierend auf den Projektergebnissen erschlossen.
Verbesserte Zusammenarbeit mit Firmen, Netzwerken oder Forschungsstellen	Während Laufzeit	Intensivierung der Kontakte zu bekannten Kooperationspartnern und Erweiterung der Zusammenarbeit mit neuen Projektpartnern.

2.4.3. *Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit*

Bezeichnung	Zeithorizont	Verwertung
Folgeprojekte	Nach Laufzeitende	Folgeprojekte erscheinen heute wahrscheinlich.
Schaffung und Kooperation zur Verbreitung des Wissens	Während Laufzeit	Auf Konferenzen im In- und Ausland werden die Ergebnisse des Projektes vorgestellt.
Kontaktaufnahme mit potenziellen Verwertern/Nutzern für die weitere Umsetzung der Ergebnisse	Nach Laufzeitende	Potenzielle Verwerter/Nutzer für die weitere Umsetzung der Ergebnisse von „Guten Morgen“ identifiziert.

2.5. **Bekannte Ergebnisse anderer Stellen während der Laufzeit des Vorhabens**

Es wurden keine Ergebnisse anderer Stellen bekannt, die für die Arbeiten relevant gewesen wären.

2.6. Veröffentlichung der Ergebnisse

1. Lohmüller, E.; Kohn, N.; Maischner, F.; Hashemi, H.; Göbel, A.; Huyeng, J. D.; Saint-Cast, P.; Beladiya, V.; Somasundaram, S.; Preu, R. Low-Loss Singulation of TOPCon Half Solar Cells by TLS and Al₂O₃ Edge Passivation. *SiliconPV Conf Proc* **2025**, vol. 3.
2. Lohmüller, E.; Baliozian, P.; Gutmann L.; Kniffki L.; Beladiya V.; Geng J.; Wang L.; Dunbar R.; Lepert A.; Hofmann M.; Richter A.; Huyeng J.D. Thermal laser separation and high-throughput layer deposition for edge passivation for TOPCon shingle solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells* **2023**, vol. 258, 112419.

3. Literaturverzeichnis

- [1] J.D.C. Dickson, "Photo-voltaic semiconductor apparatus or the like," US Patent 2,938,938, May 31, 1960.
- [2] C. Z. Leinkram and W. D. Oaks, "Shingled Array of Solar Cells," U.S. Patent 3,769,091, vol. Oct. 30, 1973, 1973.
- [3] J. H. Myer, "Photovoltaic Generator," 3,369,939, Feb 20, 1968.
- [4] J. Zhao et al. "20 000 PERL silicon cells for the '1996 World Solar Challenge' solar car race," Prog. Photovolt: Res. Appl., vol. 5, no. 4, pp. 269–276, 1997.
- [5] S. W. Glunz et al., "High-efficiency silicon solar cells for low-illumination applications," 29th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, New Orleans, 2002, pp. 450–453.
- [6] M. Hermle et al., "Analysis of Edge Recombination for High-Efficiency Solar Cells at Low Illumination Densities," 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, pp. 1009–1012, 2003.
- [7] J. Schneider, S. Schoenfelder, S. Dietrich, M. Turek, "Solar Module with Half Size Solar Cells," 29th EUPVSEC Amsterdam, The Netherlands, pp. 185–189, 2014.
- [8] Hanwha Q CELLS, Q.PEAK Duo-G5 315-330. [Online] Available: <https://www.qcells.de/produkte/solarmodule/qpeak-duo-g5.html>. Accessed on: Oct. 07 2019.
- [9] P. Zajac, "System and method for curing conductive paste using induction heating," US10115856B2, Oct. 30. 2018.
- [10] B. Yang, P. Nguyen, J. B. Heng, A. Reddy, Z. Xu, "High Efficiency Solar Panel," US 14/563,867, Apr 2, 2015.
- [11] The Solaria Corporation, Solaria PowerXT, Solaria PowerXT1 400C-BX. [Online] Available: <http://www.solaria.com/rooftops-utility/>. Accessed on: Jul. 15 2020.
- [12] CanadianSolarInc, High Density Shingle PERC Module (Mono). [Online] Available: <https://www.canadiansolar.com/module/>. Accessed on: Jul. 15 2020.
- [13] TWSolar, PV Modules. [Online] Available: <http://www.tw-solar.com/en/Products/PVModules/>.
- [14] Seraphim, Eclipse Series Shingled Solar Module. [Online] Available: <https://www.seraphim-energy.com/eclipse-series/>. Accessed on: Jul. 14 2020.

- [15] SunPower Corporation SunPower Introduces New Solar Panel: The Performance Series. [Online] Available: <https://us.sunpower.com/solar-panels-technology/p-series-solarpanels>. Accessed on: May 21 2020.
- [16] D. Rudolph et al., "Cell Design Optimization for Shingled Modules," 33rd EUPVSEC, Amsterdam, The Netherlands.
- [17] D. Tonini, et al., "Shingling Technology for Cell Interconnection: Technological Aspects and Process Integration," 33rd EUPVSEC, Amsterdam, The Netherlands, 2017.
- [18] D. Tonini, et al. "Shingling Technology For Cell Interconnection: Technological Aspects And Process Integration," Energy Procedia, pp. 36–43, 2018.
- [19] A. G. Aberle, et al., "Limiting loss mechanisms in 23% efficient silicon solar cells," Journal of Applied Physics, vol. 77, no. 7, pp. 3491–3504, 1995.
- [20] P. P. Altermatt, et al. "Numerical quantification and minimization of perimeter losses in high-efficiency silicon solar cells," Prog. Photovolt: Res. Appl., pp. 355–367, 1996.
- [21] R. Kühn, P. Fath, E. Bucher, Effects of pn-junctions bordering on surfaces investigated by means of 2D-modeling: 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference. Piscataway, NJ: IEEE, 2000.
- [22] J. Dicker, Analyse und Simulation von hocheffizienten Silizium-Solarzellenstrukturen für industrielle Fertigungstechniken. Dissertation, Fakultät für Physik, Universität Konstanz, 2003.
- [23] K. Ruhle et al., "Impact of Edge Recombination in Small-Area Solar Cells with Emitter Windows," IEEE J. Photovoltaics, vol. 5, no. 4, pp. 1067–1073, 2015.
- [24] W. P. Mulligan et al., "Development of chip-size silicon solar cells," 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pp. 158–163.
- [25] J. Epser, Untersuchung von dielektrischer Passivierung für EFG-Solarzellen. Diplomarbeit, Fakultät für Physik, Universität Konstanz, 2010.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel	
Verbundvorhaben: Guten-Morgen - Große Wafer und geteilte Zellen - optimierte Prozesse zur Messung, Vereinzelung, Passivierung und Verschaltung von Teil-Zellen Teilprojekt: Entwicklung der Kantenpassivierung für Teil-Zellen im Industrie-Maßstab	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.10.2025
Dr. Jürgen Geng	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
PLASMA ELECTRONIC GMBH Otto-Lilienthal-Str. 2 79395 Neuenburg am Rhein	10. Förderkennzeichen 03EE1101F
	11. Seitenzahl 47
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)	13. Literaturangaben 25
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) 10100 Berlin	14. Tabellen 3
	15. Abbildungen 50
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung	
<p>Gegenstand des Projektes war die Ausarbeitung eines industrietauglichen Prozesses für die Kantenpassivierung von Zell-Modulen für Wafer-Formate bis M12.</p> <p>Im Projekt wurde eine Anlage konzipiert, die für die Prozessierung von Wafern-Formaten bis M12 (Kantenlänge 210 mm) geeignet war. Es erfolgten die Einbringung der Anlage beim ISE mit Anbindung an die dortige Medien-Versorgung sowie Softwareanpassungen.</p> <p>Der Kanten-Passivierschritt mittels ALD wurde ausgearbeitet und anhand umfangreicher Beschichtungsversuche optimiert. Auch die Aufskalierung auf einen industriellen Schindelhalter und große Mengen wurden erfolgreich umgesetzt.</p> <p>Zudem wurde eine geeignete Prozessüberwachung realisiert.</p> <p>Das Vorhaben wurde erfolgreich abgeschlossen und die Projektziele wurden erreicht.</p>	
19. Schlagwörter Kantenpassivierung, PEALD, M12 Wafer, Photovoltaik, Modulintegration, Plasmabeschichtung	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final report
3. title Joint Project: GutenMorgen – Large wafers and shingling – optimized processes for measurement, separation, passivation and interconnection of splitted solar cells Partial Project: Development of edge passivation for sub-cells on an industrial scale	
4. author(s) (family name, first name(s)) Dr. Jürgen Geng	5. end of project 31.10.2025
	6. publication date
	7. form of publication
8. performing organization(s) (name, address) PLASMA ELECTRONIC GMBH Otto-Lilienthal-Str. 2 79395 Neuenburg am Rhein	9. originator's report no.
	10. reference no. 03EE1101F
	11. no. of pages 47
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) 10100 Berlin	13. no. of references 25
	14. no. of tables 3
	15. no. of figures 50
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	
18. abstract The project focused on developing an industrially viable process for the edge passivation of cell modules for wafer formats up to M12. As part of the project, a system was designed that was suitable for processing wafer formats up to M12 (edge length 210 mm). The system was installed at ISE, including connection to the local media supply, and software adaptations were implemented. The ALD-based edge passivation step was developed and optimized through extensive coating trials. Scaling up to an industrial shingle carrier and high-volume processing was also successfully implemented. In addition, suitable process monitoring was realized. The project was successfully completed and the project objectives were achieved.	
19. keywords edge passivation, plasma-enhanced atomic layer deposition (PEALD), M12 wafer, photovoltaics, module integration, plasma coating	
20. publisher	21. price