

Abschlussbericht des Forschungsvorhabens

Einführung einer Feinlinienmetallisierung und einer beidseitigen Passivierung für c-Si-Solarzellen (FeinPass) – Teilvorhaben: Passivierung und Feinliniendruck am Fraunhofer ISE

Akronym **FeinPass**

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme

Förderkennzeichen: **13N11622**
Projektlaufzeit: **01.05.2011 – 30.04.2014**
Zuwendungsempfänger: **Fraunhofer ISE**

Projektleiter: **Dr. Marc Hofmann**
Fraunhofer Institut Solare Energiesysteme (ISE)
Heidenhofstraße 2, D-79110 Freiburg
Tel.: 0761/4588-5051, Email: marc.hofmann@ise.fraunhofer.de

Berichterstattung: Sebastian Binder, Marc Hofmann

Mitarbeit am Bericht: Norbert Kohn, Johannes Seiffe, Pierre Saint-Cast

Freiburg, Dezember 2014

Inhaltsverzeichnis

I.	Kurze Darstellung	3
1	Aufgabenstellung	3
2	Voraussetzungen, unter denen das Projekt durchgeführt wurde...	4
3	Planung und Ablauf des Vorhabens	4
4	Wissenschaftlich-technischer Stand zu Beginn des Vorhabens	5
5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	7
II.	Eingehende Darstellung	8
1	Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	8
1.1	Teilvorhaben Feinliniendruck.....	8
1.2	Teilvorhaben PECVD-Passivierung.....	23
1.3	Teilvorhaben Laserablation	59
2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	67
3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	67
4	Voraussichtlicher Nutzen / Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	68
5	Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	70
6	Veröffentlichung der Ergebnisse	71
7	Literaturverzeichnis	72

I. Kurze Darstellung

1 Aufgabenstellung

Teilvorhaben Feinliniendruck:

Die Motivation des Teilvorhabens bestand darin, eine Drucktechnik zu erforschen, mit der es möglich ist, dünne Metalllinien $<30 \mu\text{m}$ berührungslos auf Solarzellen abzuscheiden. Der Anspruch berührungslos zu drucken ergibt sich aus der Tendenz, dass die zu kontaktierenden Solarzellen immer dünner und daher empfindlicher gegen mechanische Belastung werden. Weiterhin soll es damit möglich sein, Emitter, mit einem höheren Wirkungsgradpotential, zu kontaktieren, so dass alle Vorteile, die eine neue Passivierung mit sich bringt, auch genutzt werden können. Die Aerosoldrucktechnik verfügt anders als alle anderen bekannten Drucktechniken über das Potential, schmale Kontaktfinger, bei vergleichsweise geringem technischem Aufwand, zu realisieren. Ziel des Vorhabens war es, die Aerosoltechnologie grundlegend zu verstehen und in eine Demonstratoranlage zu überführen.

Teilvorhaben PECVD-Passivierung:

Parallel hierzu sollte die Passivier- und Antireflexschicht in ihrer optischen und elektrischen Leistungsfähigkeit erforscht und optimiert, sowie eine entsprechende Beschichtungsanlage entwickelt werden, welche eine größtmögliche Reduktion der spezifischen Herstellungskosten ermöglicht. Auf der Rückseite der Solarzelle sollte ebenfalls eine Passivierschicht eingeführt werden, welche mit der gleichen Maschine hergestellt werden sollte. Das Equipment sollte eine optimale Integration in eine Solarzellenfertigungslinie ermöglichen und dadurch Stillstandszeiten reduzieren. Auch verschiedene Anlagen-Reinigungsmethoden wurden untersucht und erforscht. Hier sollte eine möglichst kosteneffiziente und gleichzeitig umweltschonende Lösung gefunden werden.

Teilvorhaben Laserablation

Im Laufe des Projekts wurde im Einvernehmen der Projektpartner und des Fördermittelgebers das Thema Feinliniendruck nicht weitergeführt. Stattdessen wurde ein Fokus auf die Entwicklung eines Laserablationsprozesses für die Solarzellenrückseite gelegt. Hier ging es um die lokale Ablation des dünnen dielektrischen Passivierungsschichtsystems an der Solarzellenrückseite. Es ist dabei wichtig, die Ablation an den bearbeiteten Bereichen möglichst vollständig durchzuführen und an den Rändern der ablatierten Bereiche die verbliebene Passivierung nicht zu beschädigen. Es sollte ein Lasertechnologie verwendet werden, die eine hohe Anlagenverfügbarkeit und einen hohen Durchsatz verspricht.

2 Voraussetzungen, unter denen das Projekt durchgeführt wurde

Der Weltmarkt für Photovoltaikmodule wurde in den vergangenen Jahren mehr und mehr durch asiatische, vor allem chinesische, Solarzell- und Modulhersteller dominiert, die mit enormem Wachstumstempo und sehr niedrigen Verkaufspreisen ihrer Produkte die internationale Konkurrenz, auch die europäische bzw. deutsche, mehr und mehr verdrängen. Noch halten deutsche PV-Produktionsanlagenhersteller einen großen Anteil am Weltmarkt, der aber in Gefahr ist, da auch in diesem Bereich die asiatische Konkurrenz aufholt.

Vor allem in chinesischen PV-Zell- und Modulproduktionsstätten stand in den letzten wenigen Jahren ein Überangebot an Produktionsmöglichkeiten im Vergleich zur Weltmarktgröße bereit. Dies führte zu einem Verfall der Modulpreise und zu einem Einbruch bei der Nachfrage nach PV-Produktionsequipment. Gleichzeitig entstand ein Modernisierungstau der Produktionslinien.

Durch den Kostendruck und eine beginnende Erholung des Weltmarkts wurde gegen Ende des Projekts am Weltmarkt eine Tendenz hin zu höhereffizienten Solarzellen und -modulen beobachtet, die in einen Bedarf an neuen Beschichtungstechnologien, wie sie in FeinPass entwickelt wurden, mündet.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt wurde im Rahmen der Innovationsallianz Photovoltaik durch die ursprünglichen Projektpartner Manz, Manz Coating, Schott Solar und Fraunhofer ISE beantragt und zum 1.5.2011 begonnen.

Durch die Entscheidung der Fa. Schott, die Aktivitäten im Photovoltaik-Bereich einzustellen, musste auch die Teilnahme von Schott Solar an FeinPass während der Projektlaufzeit beendet werden. Als Ersatz konnte als assoziierter Partner SolarWorld Innovations gewonnen werden.

Die bearbeiteten Themen umfassten zu Beginn des Vorhabens die PECVD-Oberflächenpassivierung und die Feinlinienmetallisierung auf der Basis des Aerosoldrucks. Während der Projektlaufzeit wurde entschieden, die Feinlinienmetallisierungsaktivitäten zugunsten des neuen Projektthemas Laserablation dielektrischer Schichten einzustellen, da man so den veränderten Marktbedingungen Genüge tun wollte. Es wurde eine zunehmende Nachfrage nach Beschichtungsanlagen und schnellen kostengünstigen Technologien zur lokalen Öffnung dünner Dielektrika erwartet. Dies bestätigt sich heute in der zunehmenden weltweiten Produktion höhereffizienter kristalliner Silicium-Solarzellen mit der PERC-Struktur (Passivated Emitter and Rear Cell).

4 Wissenschaftlich-technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

Teilvorhaben Feinliniendruck:

Am Fraunhofer ISE wurden mehrere Prozesse zur Metallisierung von Solarzellen erforscht, mit dem Ziel, Ressourcen zu schonen und gleichzeitig die Effizienz von Solarzellen zu steigern [Met07]. Das Interesse liegt dabei auf sog. zweistufige Prozesse, bei denen zunächst eine Saatschicht, welche einen hochwertigen Kontakt zum Halbleiter ausbilden soll, und in einem zweiten Schritt eine hochleitfähige Schicht, verantwortlich für den Stromtransport, aufgebracht wird. Eine sehr vielversprechende Kombination stellt der Aerosoldruck, als Saatschichtdrucker, mit einer nachfolgenden galvanischen Verstärkung der Kontakte, dar. Im Vergleich zum konventionellen Siebdruckverfahren führt dies zu einem signifikanten Anstieg des Wirkungsgrades [Hör09]. Es konnte auch auf Modulebene experimentell nachgewiesen werden, dass dieser Prozess schmalere Finger erlaubt als der konventionelle Siebdruckprozess [Woe08].

Dieser zweistufige Prozess hat signifikante Vorteile gegenüber dem Siebdruck: es ist möglich, den Aerosoldruck im ersten Prozessschritt ausschließlich auf einen guten elektrischen Kontakt zum Emitter zu optimieren, während der Abscheideprozess im zweiten Schritt ausschließlich auf einen geringen Leitungswiderstand bei geringst möglichem Materialeinsatz hin optimiert werden kann. Auch die vorgeschlagene Metallisierung des kompletten Fingers mittels Aerosoldruck kann als zweistufiger Prozess ausgeführt werden – ebenfalls mit den beschriebenen Vorteilen. Aktuelle Untersuchungen von Zellen, deren Finger komplett mit dem Aerosolverfahren gedruckt wurden, zeigen im Vergleich zu Siebdruckzellen eine Erhöhung des Kurzschlussstroms bei einem exzellenten Höhen-/Breitenverhältnis der Finger [Moh10].

Teilvorhaben PECVD-Passivierung:

Eine heutige Silizium-Solarzelle besitzt auf der Vorder- und Rückseite des Wafers passivierende Elemente. Die Vorderseite wird mit einer Siliciumnitridschicht beschichtet, die gleichzeitig Antireflexwirkung hat [Abe99]. Der in der Siliciumnitridschicht enthaltene Wasserstoff reduziert bei multikristallinen Zellen darüber hinaus Defekte an Korngrenzen und verbessert so die elektronischen Eigenschaften [Mac01]. Auf der Rückseite der Zelle entsteht durch einen aufgedruckten Aluminium-Rückkontakt nach dem Feuer-Prozess das sog. Back-Surface-Field (BSF), welches ebenfalls passivierende Wirkung hat [Goe97]. Für Hocheffizienz-Zellen sind diese Maßnahmen jedoch noch nicht ausreichend. Zum einen bedarf es einer verbesserten Oberflächenpassivierung auf der Rückseite, zum anderen würden starke Verbiegungen des Wafers durch den Kontaktierungsprozess bei Verwendung von dünnen Wafern Probleme in der Fertigung bereiten [Abe99, Hus05].

Auf der Zellvorderseite können mehrlagige Schichtsysteme die Passivierung hochohmiger Emitter verbessern sowie die Dichtigkeit gegenüber nachfolgenden Metallisierungsschritten wie Galvanik-Prozessen gewährleisten. Effektive Rückseitenpassivierungen für zukünftige industrielle Hocheffizienz-Zellkonzepte wurden mittels dielektrischer Schichtsysteme demonstriert [Glu07].

Ein weiterer Aspekt für das Anlagenkonzept ist der Materialfluss im Gesamtprozess. Aktuelle PECVD-Anlagen arbeiten mit großen Batches. Dies ist nachteilig für den Materialfluss, da Puffer

benötigt werden und starke Schwankungen der Wafer-Historie entstehen. Das anvisierte Anlagenkonzept soll eine kontinuierliche Zell-Fertigung ermöglichen.

Eine parallele Abscheidung auf beiden Seiten der Plasmaquelle ist vorgesehen, die eine verbesserte Plasmaquellennutzung, reduzierten Prozessgasverbrauch und damit geringere Prozesskosten ermöglicht.

Teilvorhaben Laserablation:

Am Fraunhofer ISE wurde vor Beginn des Teilvorhabens „Laserablation“ in FeinPass umfangreiche Untersuchungen zur Auslegung der lokalen Kontaktstruktur an der Rückseite von PERC Solarzellen durchgeführt. Exemplarisch seien hier die beiden Diagramme in Abbildung 1 aufgeführt. Im linken Diagramm wurde der Zusammenhang aus Kontaktgeometrie (Linie vs. Punkte) mit resultierendem Serienwiderstandsbeitrag sowie der effektiven Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeit sowohl experimentell als auch simulatorisch ermittelt. Basierend auf solchen Diagrammen kann der Wirkungsgradeinfluss einer bestimmten Kontaktgeometrie und Kontaktflächenabdeckung auf der Rückseite bestimmt und eingeschätzt werden. Im rechten Diagramm in Abbildung 1 ist ein typischer Optimierungsgraph zur Festlegung des bestmöglichen Kontaktabstandes auf der Rückseite einer PERC Solarzelle dargestellt. Dieser bestimmt sich im Wesentlichen aus der Kontaktgröße, dem Basiswiderstand des Ausgangsmaterials (und somit der Querleitfähigkeit im Material) sowie dem Kontaktwiderstand Al-Si. Am ISE wurden zu diesem Zwecke in der Vergangenheit einfache analytische Berechnungstools entwickelt.

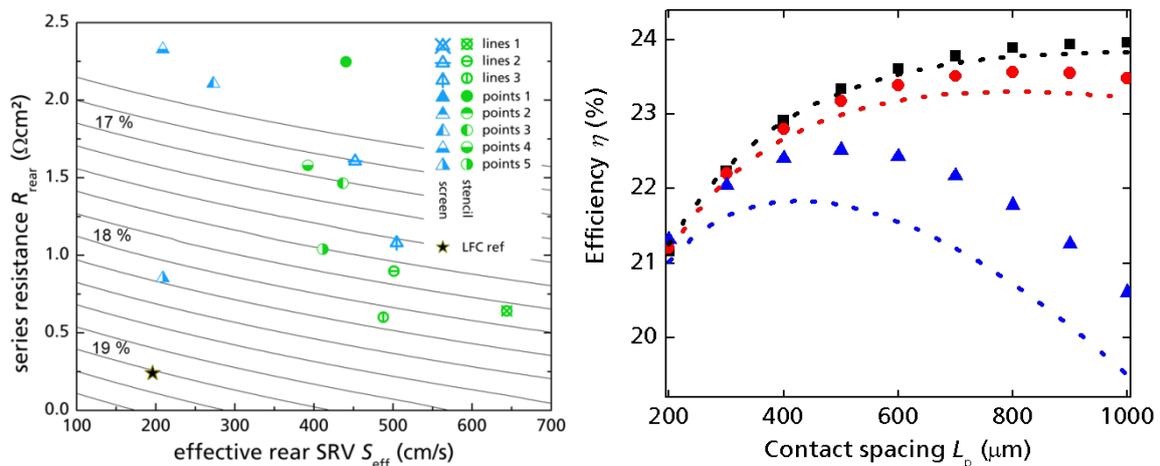


Abbildung 1: Optimierung der rückseitigen Kontaktgeometrie für PERC Solarzellen. Links: Einfluss der Geometrie auf Serienwiderstand und Oberflächenrekombination [Kic12], rechts: Optimierung der Effizienz bzgl. des Kontaktabstandes [Kim12]

Ebenfalls Gegenstand von Untersuchungen war bereits die tatsächliche lokale Kontaktausbildung. Mittels Rasterkraftelektronenmikroskopie kann anhand von Kontaktquerschliffen sehr detailliert die homogene Ausbildung eines Al-Back Surface Fields innerhalb der lokalen Kontaktstellen sowie insgesamt auch die Eindringtiefe der Kontaktbildung geprüft und evaluiert werden. Mittels zusätzlicher EDX Analysen können zusätzlich Aussagen über die chemische Zusammensetzung innerhalb der einzelnen Bereiche getroffen werden. Die lokale Kontaktausbildung sowie die Ausprägung des lokalen Back Surface Fields kann unter anderem von den Kontaktfeuerbedingungen, von der Auswahl der Al-Paste sowie von der Öffnung des Siliciums vor dem eigentlichen Einlegierungsprozess bestimmt werden.

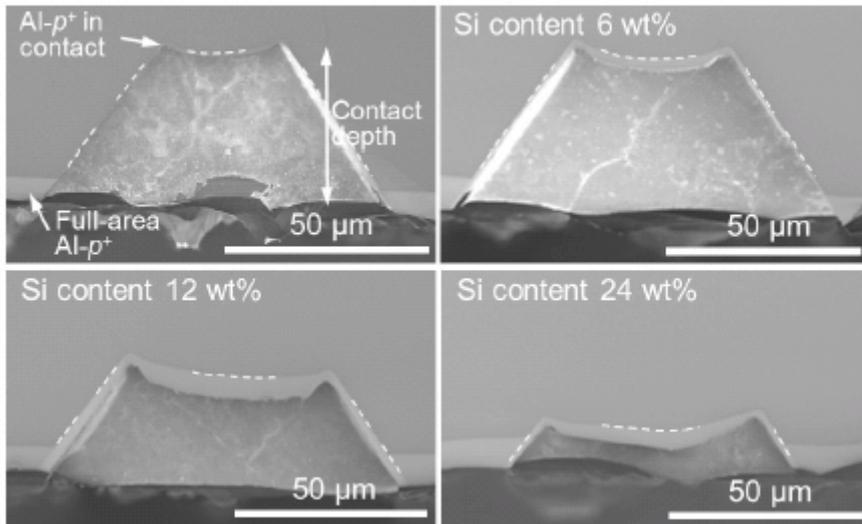


Abbildung 2: Querschliffe lokal erzeugter rückseitiger Kontaktpunkte bei Variation des Siliciumgehalts in der Al-Siebdruckpaste (0, 6, 12, 24wt%) [Sch12].

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Es erfolgte keine Zusammenarbeit mit anderen Stellen.

II. Eingehende Darstellung

1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

1.1 Teilvorhaben Feinliniendruck

AP A1 Entwurf und Konstruktion des Demonstrators eines Aerosol-Saatschichtdruckers (PM1)

Druckkopfentwicklung:

Im Arbeitspaket A1 stand die Entwicklung, Konstruktion und Bau eines Demonstrators für den Saatliniendruck mittels der Aerosoldrucktechnologie an. Da die Testplattform bei der Firma Manz in Reutlingen aufgebaut wurde, konzentrierten sich die ersten Arbeiten des Fraunhofer ISE daran, den Aerosoldruckkopf zu verbessern. Bezogen auf die Weiterentwicklung des Druckkopfmoduls wies der Stand der Technik Nachteile auf, welche hier als Verbesserungsansätze in der Entwicklung dienten:

- Upscale auf mind. 80 Druckdüsen
- Homogenität
- Tinteneffizienz = Verringerung der Aerosolabscheidung im Druckkopf (Tintenverlust)

Um Taktzeiten in der Zellproduktion so klein wie möglich zu halten, müssen die Saatschichten der Vorderseite von Solarzellen in möglichst einem Durchgang gedruckt werden. Hierzu wurde ein Upscale auf 80 Druckdüsen vorgesehen. Um diesen zu realisieren wurde mit Hilfe von CAD-Programmen und FEM-Strömungssimulationen das Strömungsverhalten der Fluide im Druckkopf untersucht (s. Abbildung 3, Abbildung 4).

Zunächst wurde die Mehrphasenströmung des Übergangs von Fokussiergas und Aerosolströmung untersucht. Aus den Simulationsergebnissen konnte ein Konstruktionsdesign für einen Druckkopf abgeleitet werden.

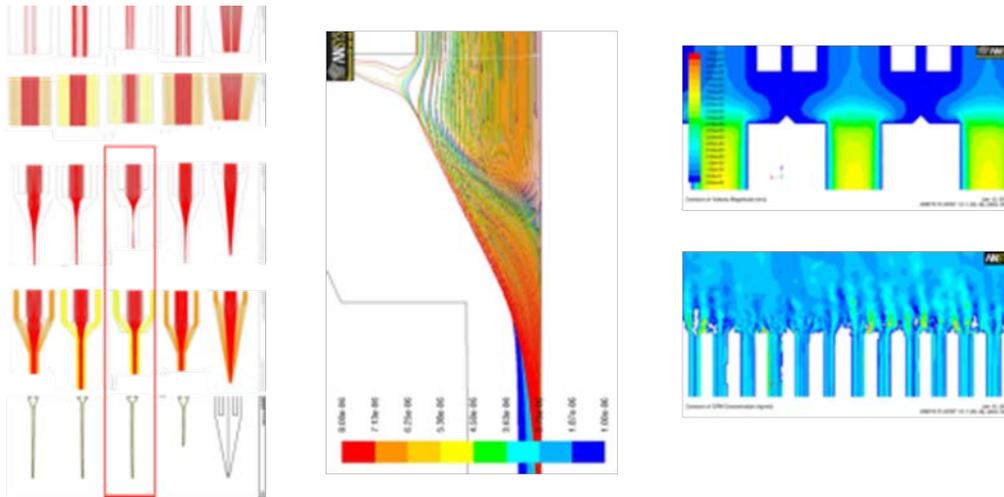


Abbildung 3: Links: Gezeichnete Stromlinien am Übergang Fokussiergas-Aerosol für eine Einzeldüse; rechts: Geschwindigkeitsverteilungen der Strömungen am Übergang von Fokussiergas zum Aerosol für einen Multidüsendruckkopf.

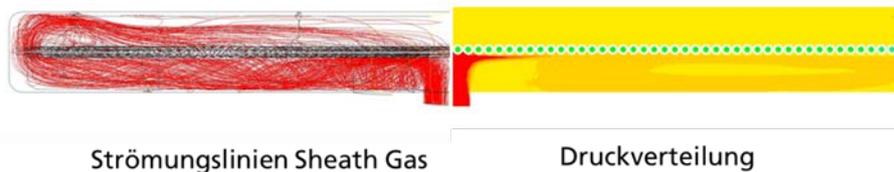


Abbildung 4: Strömungslinien und Druckverteilung des Fokussiergases in einer Strömungssimulation für 80 Düsen.

Nachfolgend war die Aerosolkammer Gegenstand der Betrachtung, mit dem Ziel das Aerosol gleichmäßig auf die einzelnen Düsen zu verteilen und eine Kondensation (= Tintenverlust) von Aerosoltröpfchen an der Innenwand zu vermeiden. Um dies zu realisieren wurden unterschiedlichste Geometrien, wie sie in der Technik in anderen Bereichen eingesetzt werden, für diesen expliziten Fall numerisch untersucht. Abbildung 5 zeigt beispielhafte Geometrien der berechneten Aerosolkammern. Scharfe Kanten, Todwasser und turbulenzbildende Strömungsführung wurden versucht zu vermeiden. Eine in alle Richtungen keilförmige Aerosolkammer mit seitlichem Aerosoleinlass wurde als optimal festgestellt.

Auf Basis der Rechenergebnisse wurde am ISE ein Aerosoldruckkopf mit 80 Düsen und optimierter Strömungsführung entwickelt und gebaut (s. Abbildung 6, Abbildung 7). Erste Druckergebnisse waren vielversprechend. Es zeigte sich jedoch, dass der Prozess noch weiter verstanden und optimiert werden muss. Die Anforderung, dass sich weniger Tinte im Druckkopf abscheidet, wurde erfüllt. Die Homogenität der gedruckten Linien war nicht zufriedenstellend und konnte im Rahmen des Projektes nicht endgültig geprüft werden. Ursache hierfür war eine zu geringe Zerstäuberleistung der Peripherie des ISE. Am Teststand der Firma Manz konnte man den Druckkopf leider nicht testen.

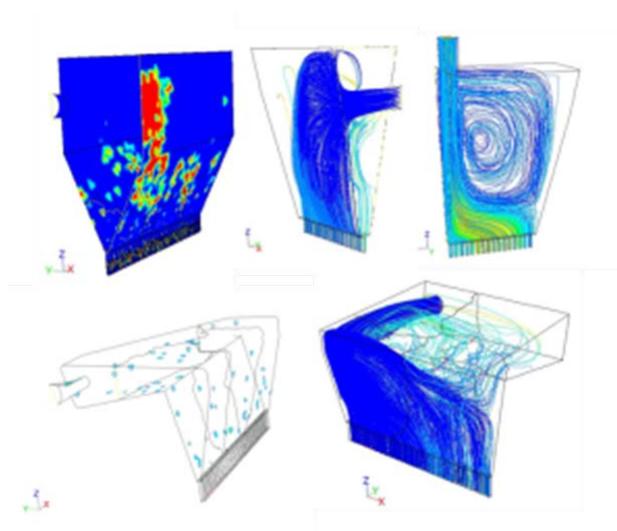


Abbildung 5: Verschiedene beispielhafte Geometrien der Aerosolkammer, dargestellte Wandabscheidung im discrete phase model (links) und Stromlinien zur Turbulenzanalyse (rechts).

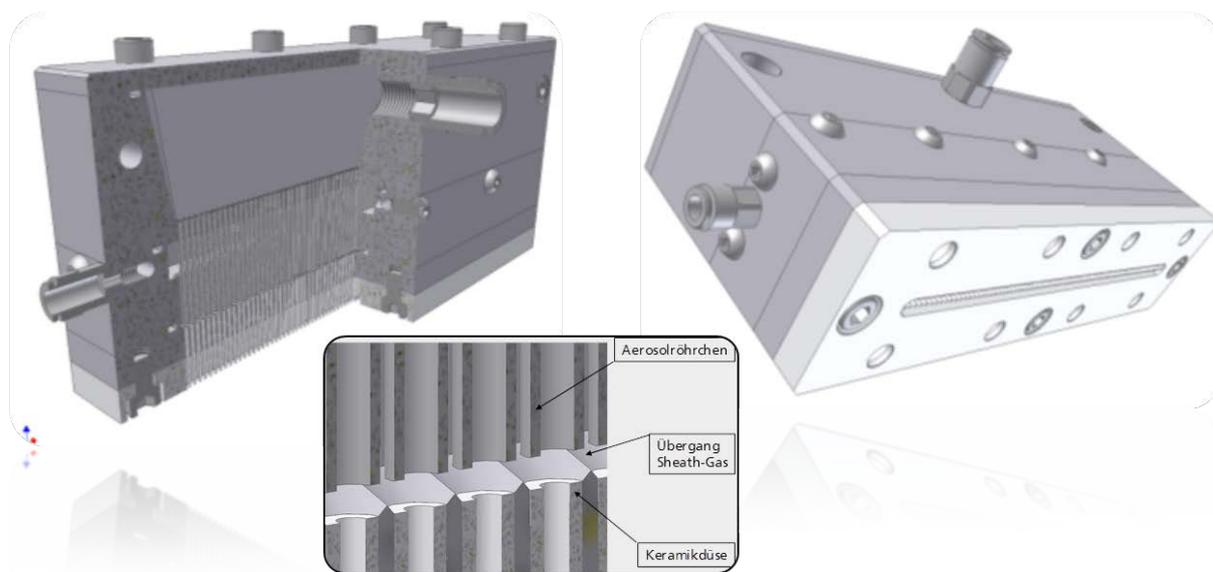


Abbildung 6: CAD-Visualisierung des optimierten Aerosoldruckkopfes am ISE entwickelt, mit Detailzeichnungen.



Abbildung 7: Am Fhl ISE gefertigten Aerosoldruckkopf; (i) perspektivisch, (ii) & (iii) in Aktion an einem Teststand des ISE, (iv) Prüfung, ob sich Aerosol im Druckkopf abgeschieden hatte (v.o.l.n.r.u.).

Nach dem Ausscheiden von Schott:

Nachdem Schott Solar aus dem Projekt ausgestiegen war, wurde zusätzlich zu dem Konzept von Manz der Druckkopf am Fraunhofer ISE weiter untersucht und verbessert; jedoch auf kleinen Testplattformen, welche nur maximal 10 Düsen mit genügend Aerosol versorgen konnten.

Wesentlich zu nennen ist eine weitere Verbesserung der Aerosolkammer, welche Kondensation von Aerosolpartikeln und somit Tintenverluste reduzieren soll. Der ursprüngliche Ansatz vom Fraunhofer ISE wurde weiter untersucht und resultierte in einem neuen Prototyp mit zehn Druckdüsen. Die Größe der Kammer wurde hierbei so gewählt, dass sie zum modularen System von Druckkomponenten des kleinen Teststandes am Fraunhofer ISE passt. Weitere Verbesserungen gegenüber dem Druckkopf mit 80 Düsen sind zusätzliche Reduzierung von scharfen Kanten insbesondere am Übergang des Aerosols in die Aerosolröhrchen (Abbildung 8). Die Aerosolführung der Aerosolkammer wurde zum Patent angemeldet und ist in der Erfindungsmeldung DE102012205990.3 beschrieben. Aus wirtschaftlichen Gründen wurde diese Anmeldung jedoch wieder zurückgezogen.

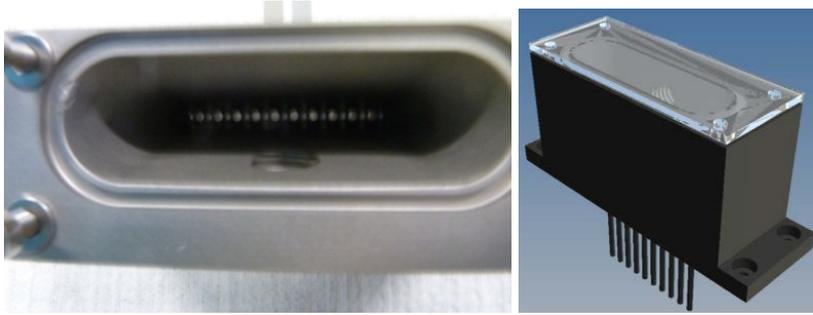


Abbildung 8: Neu gebaute Aerosolkammer mit 10 Düsen, Foto und Konstruktion.

Eine weitere Verbesserung betrifft die Fokussierung des Aerosols unterhalb der Aerosolkammer. Die Strömungsverhältnisse im Druckkopf wurden analytisch betrachtet. Als Ergebnis resultiert die Erkenntnis, dass die Querschnittsflächenverhältnisse die Fokussierung des Aerosols direkt beeinflussen. Dies wurde mittels CFD bestätigt (Abbildung 9). Durch eine Anpassung der Verhältnisse kann die Aerosolfokussierung und somit die Linienbreite direkt bestimmt und in situ den entsprechenden Anforderungen angepasst werden. Eine Erfindungsmeldung dies betreffend ist eingereicht worden, jedoch aus wirtschaftlichen Gründen wieder zurückgezogen (DE102013205683A1). Diese Erkenntnisse führten zum Bau einer modifizierten Fokussiergaskammer und Düsenplatte, welches es ermöglicht das Querschnittsflächenverhältnis zu variieren (Abbildung 10).

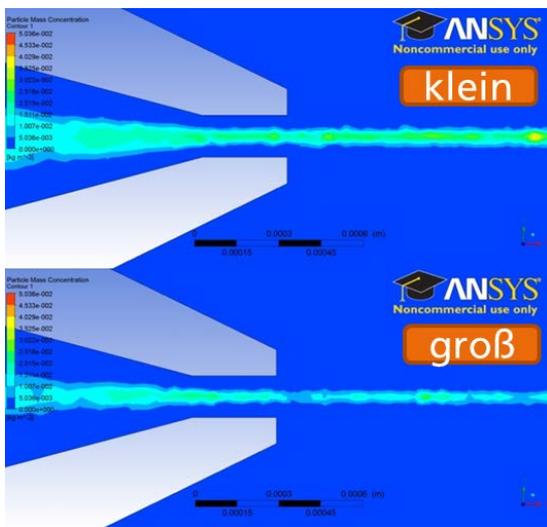


Abbildung 9: CFD-Simulation des Aerosoljets am Austritt der Druckdüsen für zwei unterschiedliche Druckkopflayouts mit kleinem und großem Querschnittsverhältnis.



Abbildung 10: Neu gebaute Komponenten zur Aerosolfokussierung, v.o.n.u.: Aerosolkammer, neue Fokussiergaskammer, Abstandsplättchen, optimierte Düsenplatte mit Düsenschutz.

Die durch das Verändern des Querschnittes entstandene zusätzliche Fokussierung des Aerosols wurde anhand der Linienbreite bestimmt. Eine Reduzierung der Linienbreite von ca. 30 % konnte somit erreicht werden (Abbildung 11). Weitergehend zu diesem Effekt wurde noch das

Verhältnis der Strömungsgeschwindigkeiten der Mehrphasenströmung experimentell untersucht. Durch Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit des Fokussiergases am Übergang, schneller, als die Strömungsgeschwindigkeit des Aerosols, konnte die Linienbreite weiter reduziert werden (Abbildung 12).

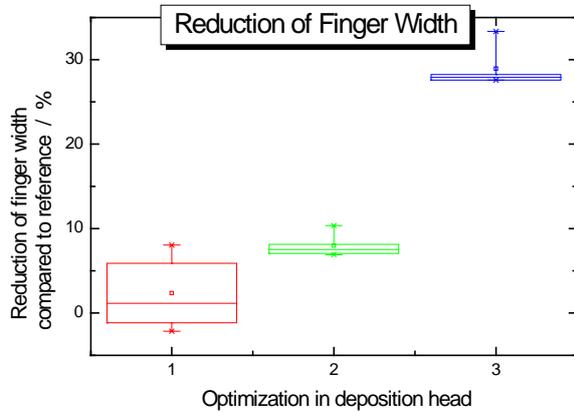


Abbildung 11: Reduzierung der Fingerbreite durch Veränderungen im Druckkopfdesign (Querschnittsverhältnis).

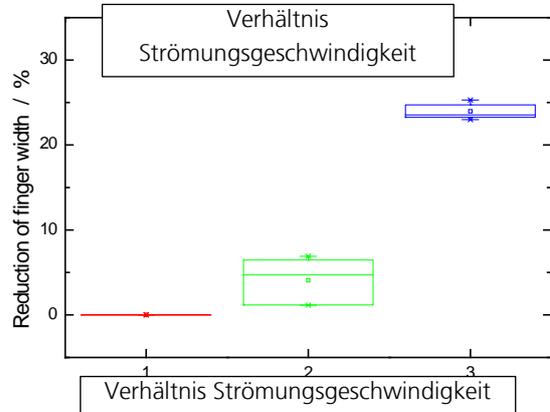


Abbildung 12: Auswirkung des Strömungsverhältnisses auf die Linienbreite.

Eine analytische Studie dieses Fokussiereffektes führte zu einem mittlerweile sehr guten Verständnis der Aerosoldruckprozesse für einzelne Düsen. Durch eine Variation der Gasverhältnisse kann die Linienbreite und deren Qualität erheblich beeinflusst werden (Abbildung 13). Eine weitere Ausdehnung der theoretischen Untersuchung auf Multidüsendruckköpfe war in diesem Rahmen leider nicht mehr möglich.

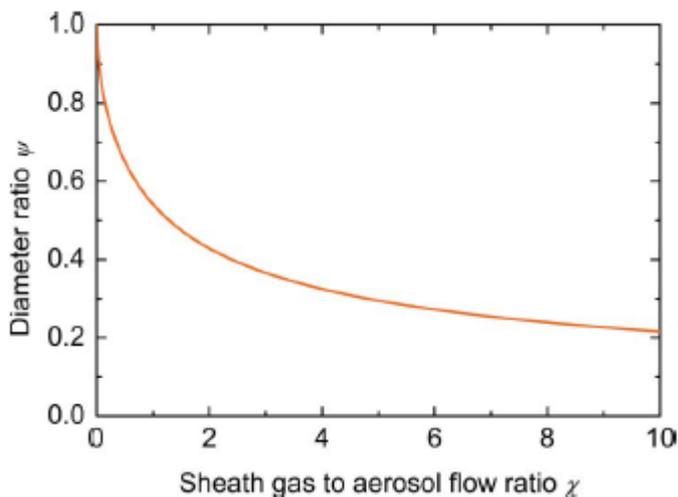


Abbildung 13: Dargestellter Aerosolstrahldurchmesser bezogen auf den Düsendurchmesser gegenüber dem Verhältnis der beiden vorherrschenden Fluidströme: Fokussiergas und Aerosol [Bin2014].

Zusammenfassung AP A1

In AP A1 konnte ein eigenständiges Konzept für das Aerosoldruckmodul zum Drucken von 80 Linien erstellt und gefertigt werden. Leider konnte man dieses Modul nicht ausgiebig testen. Jedoch konnte durch die Untersuchungen, den Bau von äquivalenten 10düsigem Systemen und einer theoretischen Studie ein umfassendes Verständnis der Aerosoldrucktechnologie erworben werden. Dieses Knowhow floss wiederum in die Optimierung des Manz-Demonstrators und dessen Prozesse. Somit konnten mit dem Demonstrator zuverlässig Linien kleiner 35 µm in der Breite gedruckt werden.

AP A3 Prozessentwicklung für das Saatschichtkonzept

Die Saatschichtprozessentwicklung mit 80 Düsen wurde maßgeblich mit dem Aerosoldruckkopfmodul der Firma Manz in Reutlingen durchgeführt. Das Fraunhofer ISE unterstützt in erster Linie Manz mit der optimalen Prozessfindung für ihr Saatschichtdruckmodul beratend und vor Ort. Die gedruckten Linien wurden bewertet und Unterstützung zur weiteren Prozessoptimierung hingehend zu einem feineren Druckbild gegeben. Dadurch konnten Linienbreiten kleiner 35 µm in hohem Waferdurchsatz realisiert werden (Abb. 12).

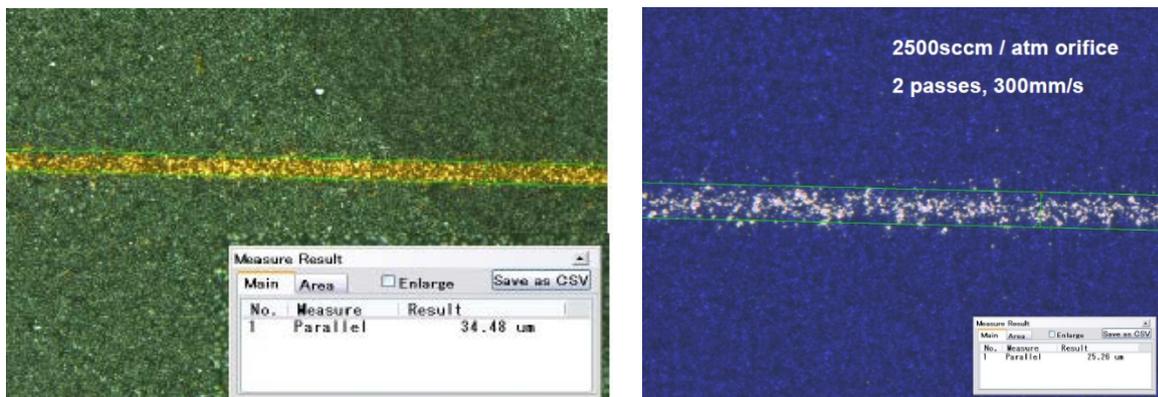


Abbildung 14: Gedruckte Saatschichtbreiten bei Manz, links mit einer kommerziellen Tinte von Cabot (34,5 µm), rechts mit einer vom ISE selbst hergestellten Tinte (25,3 µm).

Die Prozessentwicklung auf Zellniveau wurde folgendermaßen durchgeführt, so dass die Prekusoren von Schott an Manz geschickt und dort bedruckt wurden. Die nachfolgenden Prozessschritte und Prozessoptimierungen, wie das Kontaktfeuern und die galvanische Verstärkung, und die Charakterisierung der Proben wurden am ISE durchgeführt.

Von Schott wurde ein Versuchsplan zur Validierung des Aerosolsaatschichtdruckes mit anschließender Verstärkung der Saatschicht mittels lichtinduzierter Galvanik vorgestellt und diskutiert. Schott stellte bereits die entsprechenden Wafer bereit, Manz bedruckte diese und gab sie zur Prozessierung an Schott und ans Fraunhofer ISE weiter. Für die Saatschicht der Finger wurde eine Tinte von Cabot verwendet. Die Busbars wurden mit einer Paste, ebenfalls von Cabot, siebgedruckt.

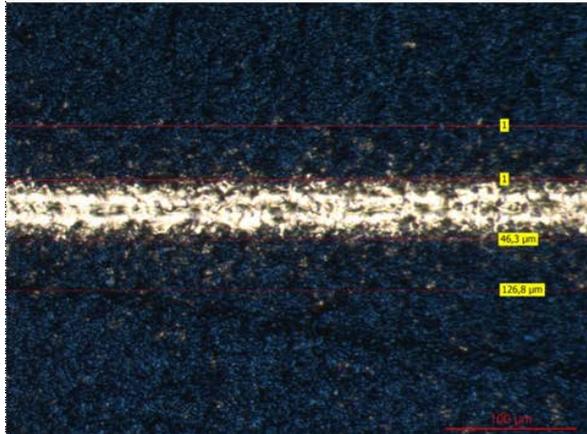
Die erste Gruppe beinhaltete das Finden der optimalen Feuertemperatur zur Kontaktbildung. Die weitere Gruppe bestand aus einer Optimierung der abzuscheidenden Silbermenge bei optimalen Feuerbedingungen. Die dritte Gruppe sollte als Demonstrator für das Konzept bei optimierten Prozessen dienen. Sowohl Schott als auch das Fraunhofer ISE prozessierten eigene Gruppen fertig (Feuern und LIP), charakterisierten und verglichen die Ergebnisse untereinander.

Gruppe 1: Optimierung des Feuerprozesses

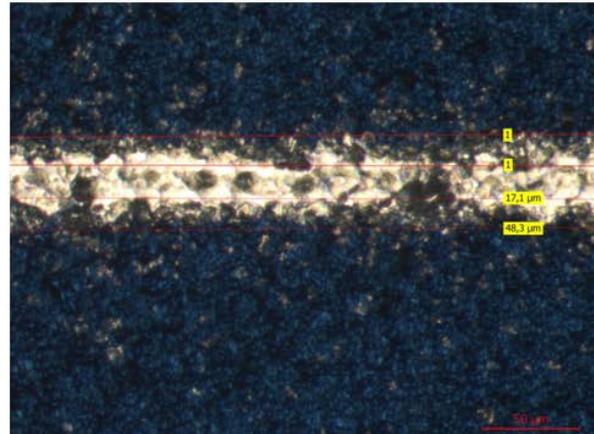
Vorbereitete und bedruckte Wafer wurden am ISE im Durchlaufkontaktierungs-ofen unter industrienahen Bedingungen getestet. Hierbei wurde für das Saatschichtkonzept die Peakfeuertemperatur von 860 – 940 °C variiert und die Zellen anhand ihrer IV-Kennlinie ausgewertet.

Eine Betrachtung der gedruckten Saatschicht im Mikroskop ergab, dass die Linien in etwa 45 µm breit waren, was über der Forderung von 35 µm lag. Dies deutete auf einen noch nicht optimalen Druckprozess hin (Abbildung 15). Die Linienbreite nach der galvanischen wuchs somit auf ca. 75 µm an.

- Saatbreite ca. 45 μm
- Overspray bis ca. 120 μm – macht nicht viel aus



- Linien möglicherweise um ca. 17 μm Versetzt
- Zuviel Tinte?



- Fingerbreite ca. 75 μm

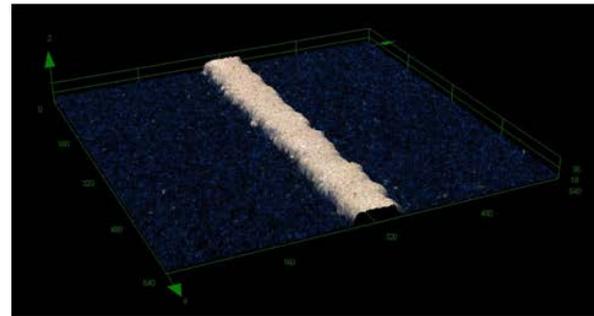
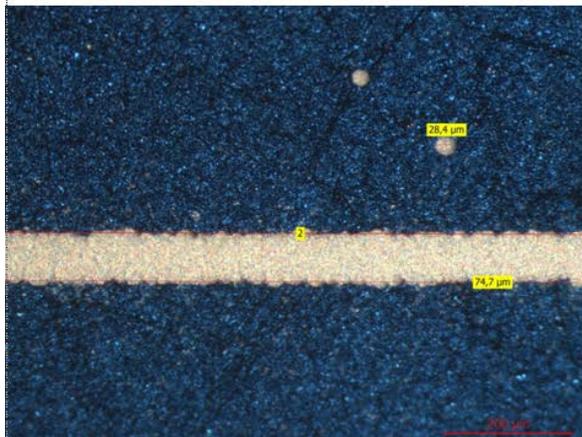


Abbildung 15: Linienbreiten nach Druck (oben) und nach galvanischer Verstärkung (unten).

Die elektrischen Ergebnisse zeigten, dass der Saatliniendruck mit Aerosoldruck ein sehr breites Prozessfenster in Bezug auf die Maximaltemperatur beim Feuerprozess bietet. Das Optimum lag bei einer Feuertemperatur von ca. 890 $^{\circ}\text{C}$. Abbildung 16 gibt die elektrischen Zellwerte wider:

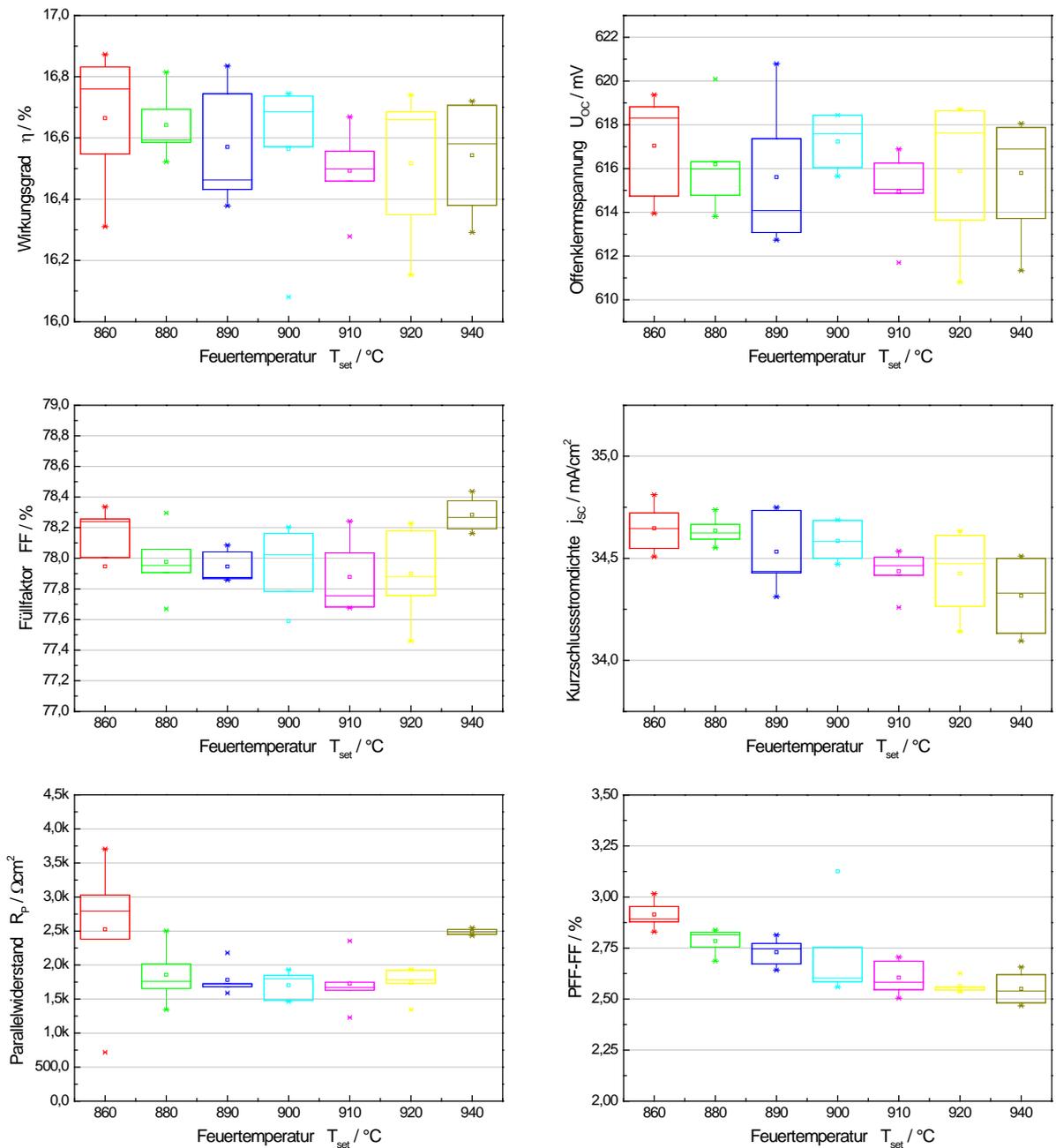


Abbildung 16: Elektrische Zellergebnisse der Feuervariation.

Gruppe 2: Optimierung der galvanisch abgeschiedenen Silbermenge

Aufbauend auf den Ergebnissen der vorigen Gruppe wurden die Wafer dieser Gruppe bei der optimalen Feuertemperatur prozessiert. Nun wurde die galvanisch abzuscheidende Silbermenge variiert, um ein Optimum aus lateraler Leitfähigkeit und geringer Abschattung zu finden (Abbildung 17). Das gefundene elektrische Optimum lag in einem erwarteten Wert von ca. 200-220 mg Silber pro Zelle. Wirtschaftlich betrachtet kann das Optimum etwas niedriger liegen.

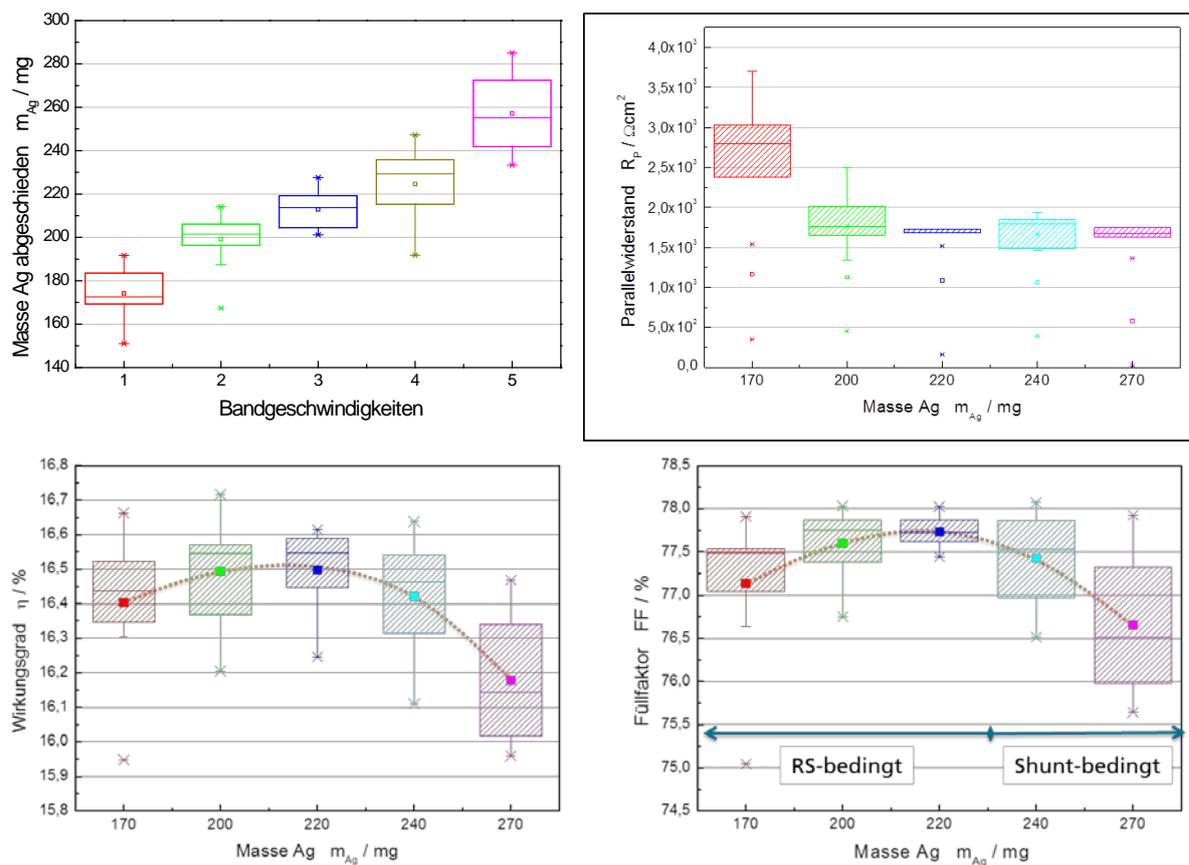


Abbildung 17: Variation der galvanisch abgeschiedenen Silbermenge.

Auffallend war, dass der gemessene Parallelwiderstand der Zellen alle unter dem „guten“ Kriterium von $< 10^5$ lag. Dies kann den Wirkungsgrad der Zellen herabgesetzt haben. Daher wurden Solarzellen mit besonders schlechtem Parallelwiderstand genauer untersucht.

Eine Untersuchung des Serienwiderstandes R_s mittels Thermographie zeigte keine besonderen Merkmale (Abbildung 18). Elektrolumineszenzbilder derselben Zellen jedoch zeigten teils gravierende Schädigungen (Abbildung 19). In DLIT-Aufnahmen, zur Erkennung von Shunts (Kurzschlüssen), sind die Schädigungen ebenfalls sichtbar, was nicht nur auf mechanische, sondern auf elektrische Schädigung schließen ließ (Abbildung 20, Abbildung 21). Ein Abgleich der Schadstellen im DLIT-Bild mit dem Lichtmikroskop ergab, dass an den besagten Stellen offensichtliche mechanische Kratzer vorlagen, bei welchen sich während der galvanischen Verstärkung zusätzliches Silber abschied, welches zu elektrischen Verlusten führte.

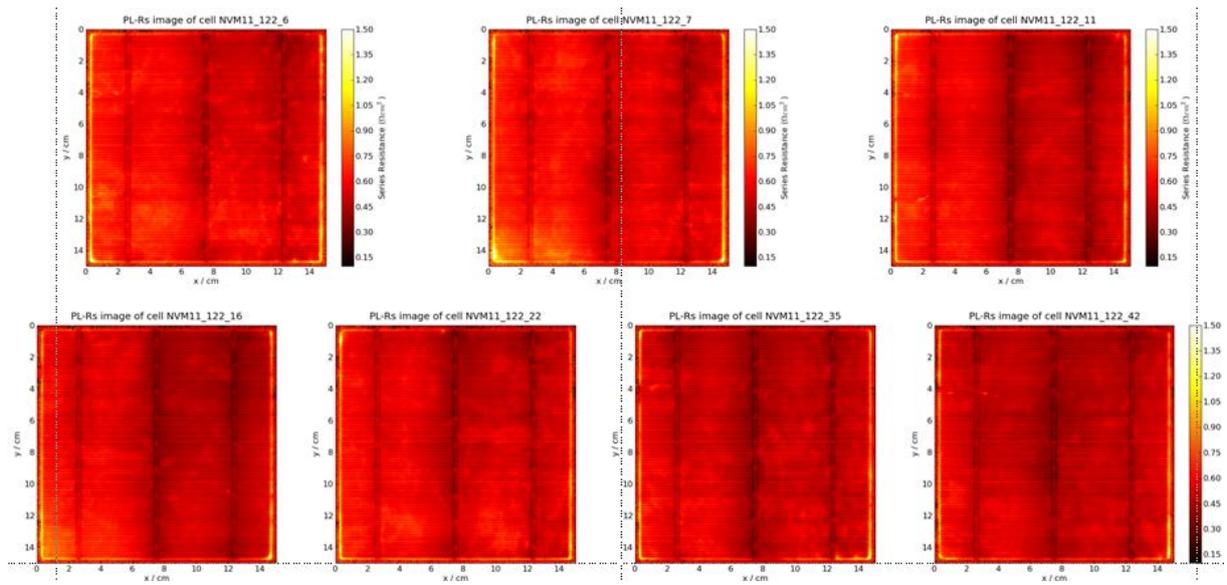


Abbildung 18: Serienwiderstandsbilder von Zellen mit schlechtem Parallelwiderstand.

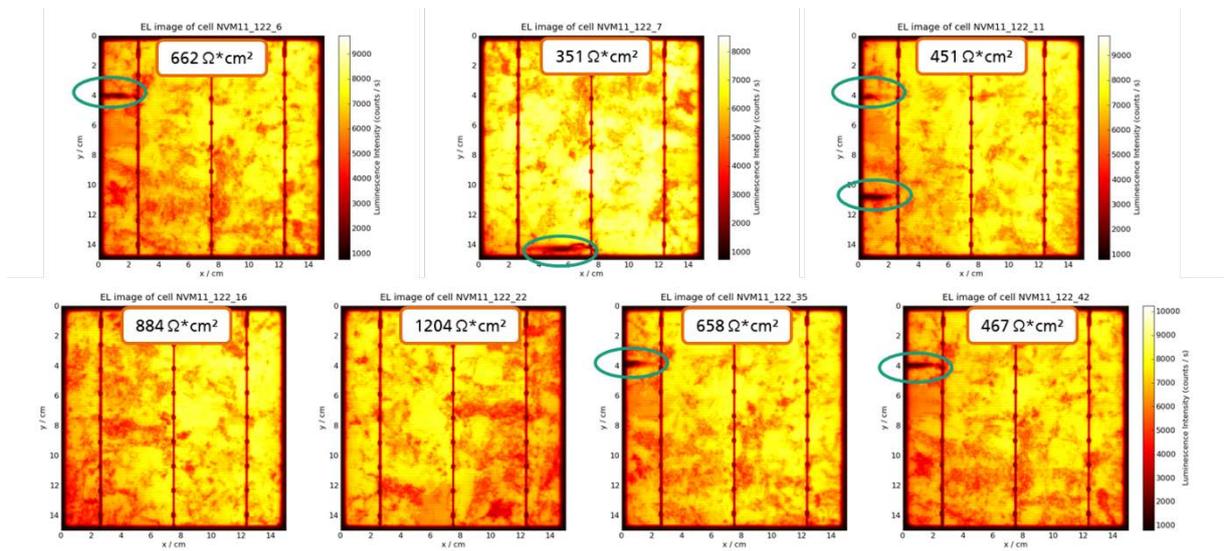


Abbildung 19: Elektrolumineszenzaufnahmen; die Zahl über dem jeweiligen Zellfoto zeigt den gemessenen Parallelwiderstand an.

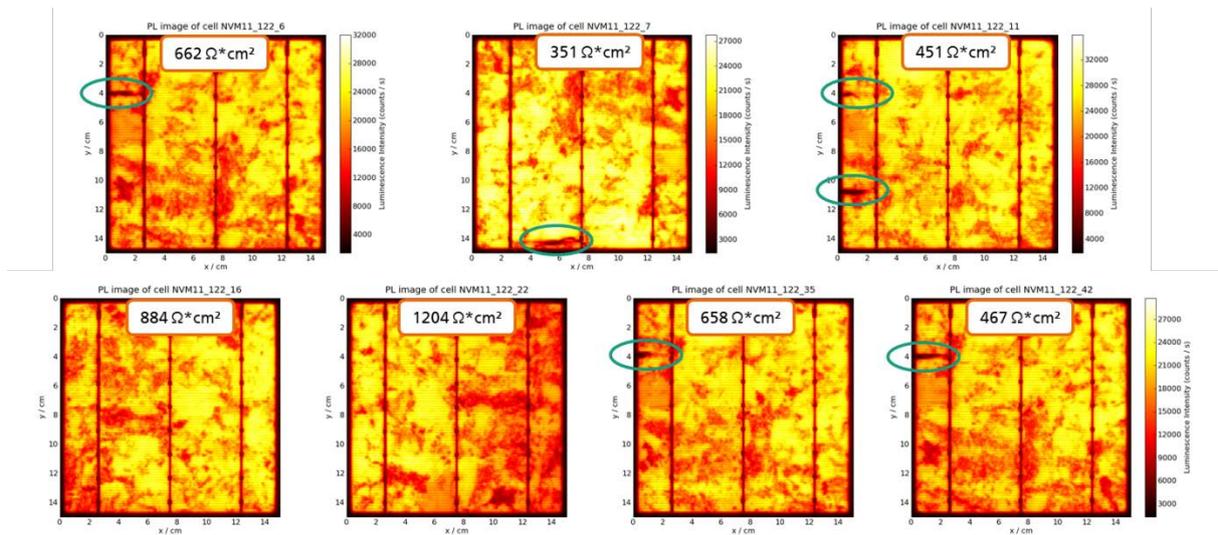


Abbildung 20: DLIT-Aufnahmen zum Erkennen von elektrischen Shunts.

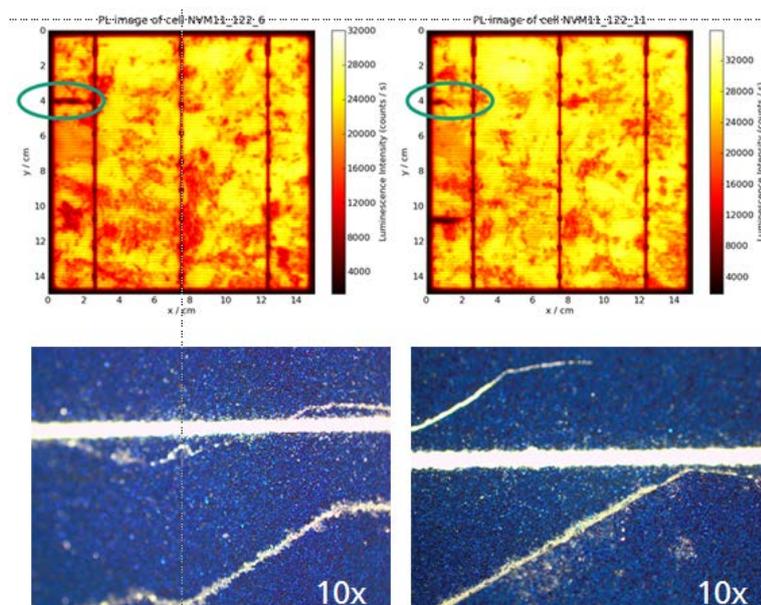


Abbildung 21: Abgleich von elektrischer Schadstellen mit dem Lichtmikroskop.

Die elektrischen Werte und der Wirkungsgrad der Solarzellen hätte besser ausfallen können. Durch mechanische Schädigungen der fragilen multikristallinen Wafer von Schott kam es zu Widerstandsverlusten auf den Solarzellen. Diese Schäden wurden vermutlich durch den mehrmaligen Postversand, Entpacken, Verpacken und manuelles Handling im Technikum verursacht.

Gruppe 3: Optimale Bedingungen

In Gruppe drei wurde eine größere Anzahl Wafer an optimierten Prozessparametern aus Gruppe 1 und 2 prozessiert und mit der Siebdruckreferenz von Schott verglichen. Zudem sollten alle Prozesse optimiert und Schädigungen so gut es ging vermieden werden. Dennoch konnte auf ein Paketversand der Wafer nicht verzichtet werden.

Schott prozessierte intern siebgedruckte Referenzen, welche folgende Kennwerte aufwiesen:

Gruppe	Voc [mV]	Jsc [mA]	FF [%]	Eta [%]	RslscVoc [Ωcm^2]	Rshunt [Ω]
Referenz	621	34,84	78,4	16,96	0,70	295,0

Abbildung 22: Referenzwerte von Schott Solar.

Das Ergebnis, welches in dieser Gruppe durch die Arbeit von Manz und ISE erzielt werden konnte ist in Abbildung 23 gezeigt. Der Wirkungsgrad der optimierten Gruppe konnte den der Referenz knapp nicht erreichen, die Offenklemspannungen U_{oc} sind auf gleichem Niveau, der Füllfaktor FF der aerosolgedruckten Zellen ist besser. Interessanterweise wurde der Kurzschlussstrom Jsc an den Siebdruckreferenzen höher gemessen. Der gemessene Parallelwiderstand (R_p) von durchschnittlich etwa $5000 \text{ Ohm}\cdot\text{cm}^2$ ist, wie bereits bei den anderen Zellgruppen, sehr niedrig.

Eine weitere Untersuchung bei der Strom auf die Leiterbahnen angelegt und ein Wärmebild aufgenommen wurde ergab, dass der Parallelwiderstand lokal stark geschädigt war (Abbildung 24). Der Parallelwiderstand wurde dadurch herabgesetzt, da sich am Rand der Wafer Tintenreste befanden. Diese wurden vermutlich durch verschmutzte Schutzhandschuhe während des Druckprozesses verursacht, bildeten einen elektrischen Kontakt zum Emitter und wurden galvanisch verstärkt.

Um die Qualität des elektrischen Kontaktes von Leiterbahn zum Emitter festzustellen, wurden die Siebdruckreferenzen ans ISE geschickt. Dort wurden die Proben vereinzelt und mit der TLM-Methode der Kontaktwiderstand bestimmt. In Abbildung 25 sind Kontaktwiderstände der Referenzen, von Gruppen, welche bei Schott prozessiert wurden und von der am ISE optimierten Gruppe widergegeben.

Es ist hervorzuheben, dass der spezifische Kontaktwiderstand der am ISE optimierten Gruppe das beste Ergebnis liefert. Dies belegt, dass die nicht gänzlich zufriedenstellende Performance der aerosolgedruckten Zellen nicht an der Kontaktbilder oder dem vorderseitig aerosolgedruckten Grid, sondern vielmehr an mechanischen Schädigungen der Wafer zu liegen hat.

	U_{OC} / mV	$J_{SC} / \text{mA/cm}^2$	$\eta / \%$	FF / %	pFF / %	$R_p / \Omega \cdot \text{cm}^2$	$R_s / \Omega \cdot \text{cm}^2$
Mittel	621,4	34,35	16,80	78,71	81,12	5016	0,48
sigma	1,1	0,14	0,12	0,40	0,34	1722	0,04
Median	621,6	34,38	16,84	78,81	81,12	5085	0,47

Abbildung 23: Zellergebnisse der optimierten Gruppe.



Abbildung 24: Links: Tintenreste vor dem Feuern und rechts: galvanisch abgeschiedenes Silber, welches den Parallelwiderstand herabsetzt.

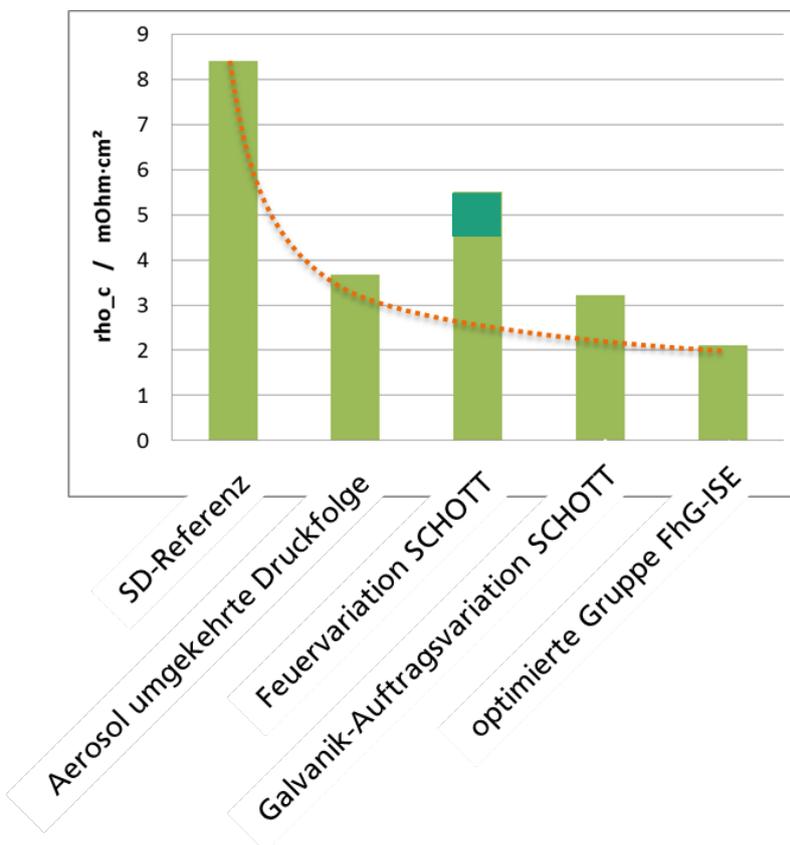


Abbildung 25: Gemessene Kontaktwiderstände von verschiedenen Gruppen.

Zusammenfassung AP A3

In AP A3 konnte die Anwendung des Aerosoldruckes zur Kontaktierung der Schott-Solarzellen erfolgreich systematisch optimiert werden. Jedoch blieben die elektrischen Werte der aerosolgedruckten Zellen unter den Erwartungen verglichen mit siebgedruckten Referenzen. Als Ursache für elektrische Verluste und somit geringerem Wirkungsgrad konnten mechanische Schädigungen lokalisiert werden. Eine Vermeidung derselben hätte zu einem besseren Ergebnis für den Aerosoldruck geführt. Dies lässt sich positiv an der realisierbaren Linienbreite und dem gemessenen Kontaktwiderstand zeigen. Bei den aerosolgedruckten Zellen war der spezifische Kontaktwiderstand in etwa viermal besser als bei den Referenzen.

Weitere AP:

Da das Teilprojekt Feinlinienmetallisierung mittels Aerosoldruck vorzeitig eingestellt wurde, konnten folgende Arbeitspakete nicht mehr bearbeitet werden:

AP A5 (AB) Evaluation der Metallisierung auf der neu entwickelten Frontseitenpassivierung und auf selektiven Emitterstrukturen - Kombination der Technologien,

AP A6 Entwicklung und Konstruktion des Aerosol-Komplett Druckermoduls (PM2) und

AP A7 Prozessentwicklung für den Aerosol-Komplettdruck und Evaluierung von PM2.

1.2 Teilvorhaben PECVD-Passivierung

AP B1 Entwurf und Konstruktion des PECVD-Prozessmoduls (PPM)

AP B1.1 Basisentwicklung und Inbetriebnahme der Anlage

Unter Beteiligung des Fraunhofer ISE wurde bei Manz eine von Grund auf neue PECVD-Anlage entwickelt. Der Entwurf, die Zeichnung und der Anlagenbau erfolgte bei Manz. Das ISE beriet Manz zum Anlagendesign. Genauere Informationen sind im Abschlussbericht der Fa. Manz zu finden.

AP B2 Prozessentwicklung und Optimierung für die Beschichtung der Frontseite

Da die Prozessentwicklung zyklisch in mehreren Schritten erfolgte, wird hier eine kombinierte Darstellung der Arbeitspakete

AP B2.1 Basisentwicklung für dichte und thermisch stabile Schichten und Schichtstapel,

AP B2.2 Prozessoptimierung am PPM,

AP B2.3 Test und Evaluation der Frontseitenpassivierung gewählt:

Im Teilvorhaben zur Entwicklung von PECVD-Passivierungsschichtsystemen wurde zunächst ein Basisprozess zur Abscheidung von Siliciumnitridschichten zur Antireflexbeschichtung der Vorderseiten kristalliner Silicium-Solarzellen entwickelt. Dazu wurden systematisch Parametervariationen durchgeführt, um die gewünschten Schichteigenschaften einstellen zu können. Für eine Antireflex-Schicht auf einem Siliciumsubstrat ist ein Brechungsindex im Bereich von 2,1 (bei 630 nm Wellenlänge) sehr gut geeignet. In Abbildung 4 wurde der Zusammenhang zwischen dem Flussverhältnis der Prozessgase Ammoniak (NH₃) und Silan (SiH₄) (Ratio) dargestellt. Es zeigt sich, dass das Einstellen des gewünschten Brechungsindexes ($n=2,1$) dabei gut möglich ist über die Anpassung des Mischungsverhältnisses der Prozessgase. Interessanterweise ist der Brechungsindex nahezu unabhängig von der Substrattemperatur im untersuchten Temperaturbereich 280°C bis 460°C. Dies spricht dafür, dass die Prozessgase sehr effizient durch die eingesetzte Plasmatechnologie dissoziiert werden.

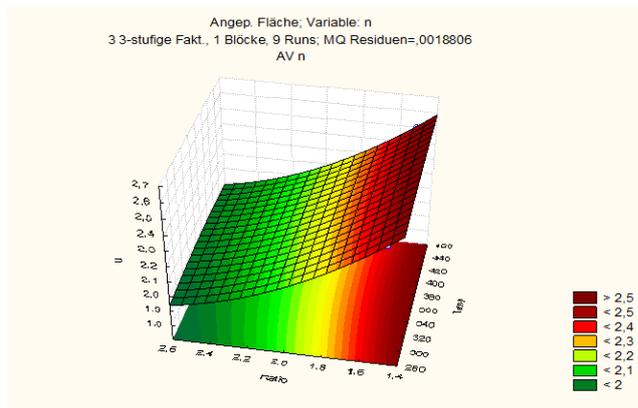


Abbildung 26: Brechungsindex n über dem Gasflussverhältnis von Ammoniak (NH₃) und Silan (SiH₄) (Ratio) und der eingestellten Substrattemperatur nach dem Aufheizvorgang. Die Daten gelten für Siliciumnitridschichten, die mittels der neuen ICP-PECVD-Anlage hergestellt wurden.

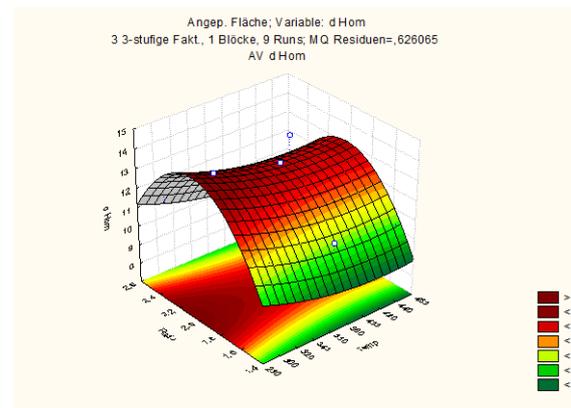


Abbildung 27: Homogenität (prozentuale Abweichung vom Mittelwert) über dem Gasflussverhältnis von Ammoniak (NH₃) und Silan (SiH₄) (Ratio) und der eingestellten Substrattemperatur nach dem Aufheizvorgang. Die Daten gelten für Siliciumnitridschichten, die mittels der neuen ICP-PECVD-Anlage hergestellt wurden.

In einer ersten Zellcharge auf multikristallinem Siliciummaterial wurde das innerhalb der Vortests als am potentiell besten geeignete Siliciumnitrid als Antireflexschicht genutzt und mit dem ISE-Standard-Antireflexnitrid verglichen. Bei der Herstellung der Solarzellen wurde ein Standard-Prozessfluss angewandt, wie er auch vielfach in der industriellen Massenproduktion zum Einsatz kommt. Hierbei wurden die gesägten bordotierten (p-Typ) Wafer zunächst in einem sauren Bad auf der Basis von Fluss- und Salpetersäure so geätzt, dass eine aufgeraute (texturierte) Oberfläche verblieb. Anschließend wurde der n-Typ-Emitter in einem Rohofen bei hohen Temperaturen und durch Zugabe von POCl₃ zur Atmosphäre eindiffundiert. Das dabei entstandene Phosphorsilikatglas (PSG) wurde in einem flusssäurehaltigen Bad entfernt. Die anschließende Beschichtung mit dem Antireflex-Siliciumnitrid erfolgte in den angesprochenen Anlagen, teils in der neuen ICP-PECVD, teils in der ISE-Standard-PECVD. Nach anschließendem

Siebdruck der Vorder- und Rückseitenkontakte, Einfeuern der Kontakte bei hohen Temperaturen und Laserkantenisolation wurden die Hell-IV-Kennlinien der Solarzellen gemessen.

Es zeigte sich, dass bereits ein gutes Performanceniveau erreicht wurde, dass aber gleichzeitig noch Entwicklungspotential verbleibt. Beim Blick auf die Ergebnisse der Messung der Hell-IV-Kennlinie erkennt man, dass die Solarzellen auf einem ähnlichen Niveau liegen, dass allerdings im Bereich der Offenen-Klemmen-Spannung V_{oc} noch ein Vorteil für die Standard-Beschichtung festzustellen ist. Da es sich hier um multikristallines Siliciummaterial handelt, ist davon auszugehen, dass dieser Effekt durch die für die ICP-PECVD (inductively coupled plasma – plasma-enhanced chemical vapour deposition) noch nicht optimale Silicium-Volumenpassivierung durch Wasserstoff aus der Siliciumnitridschicht herrührt. Zusätzlich ist der Füllfaktor für die Standard-SiNx-Zellen besser ausgebildet. Als Grund hierfür lässt sich die bessere Anpassung des Druck- und Feuerprozesses an das Standard-SiNx nennen. Der Kurzschlussstrom ist dagegen für alle Proben auf gleichem Niveau. Siehe Abbildung 29.

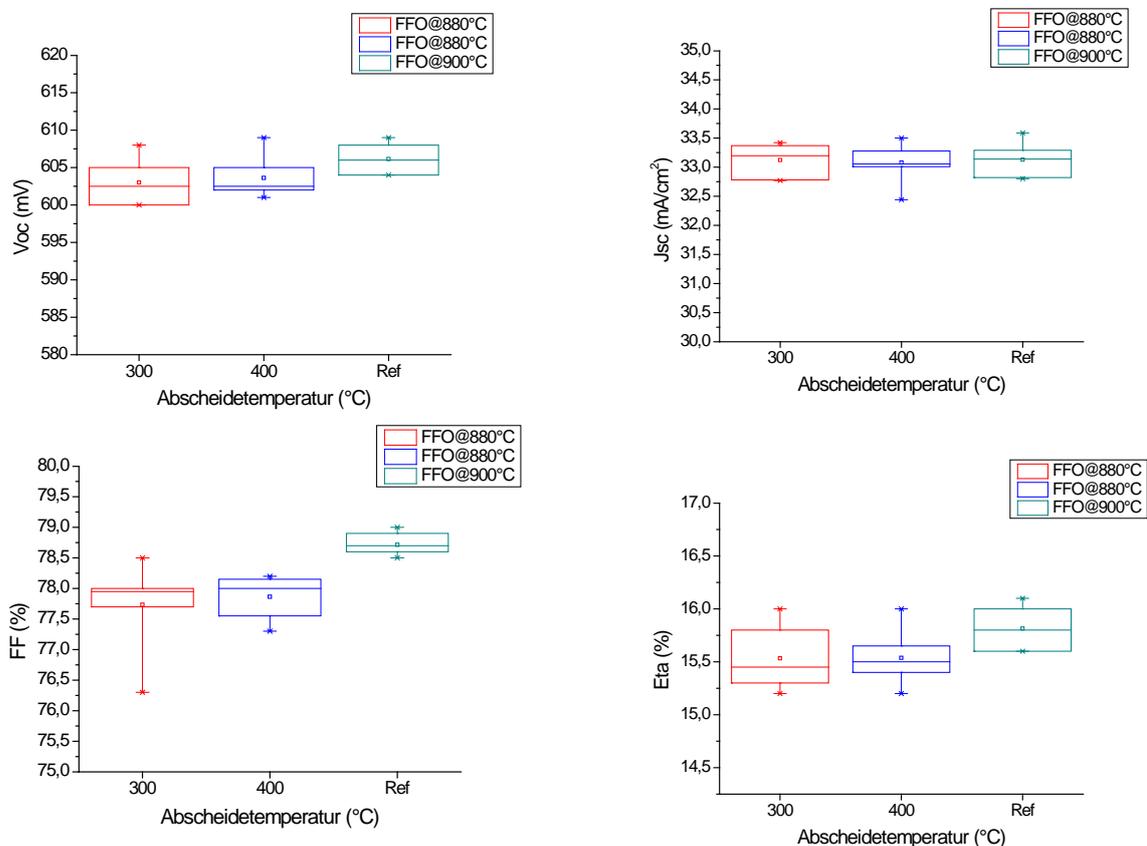


Abbildung 28: Ergebnisse der ersten mc-Si-Solarzellencharge, bei der Siliciumnitrid-Antireflexschichten verwandt wurden, die in der neuen ICP-PECVD-Anlage entwickelt und hergestellt wurden. Hierbei kamen 2 unterschiedliche Abscheidetemperaturen zum Einsatz (300 und 400 °C). Zum Vergleich sind jeweils die Ergebnisse der mitprozessierten Solarzellen dargestellt, die das ISE-Standard-ARC-SiNx aufweisen (Ref). Es sind die Offene-Klemmen-Spannung V_{oc} , die Kurzschluss-Stromdichte J_{sc} , der Füllfaktor FF und die sich daraus ergebende Energieumwandlungseffizienz Eta dargestellt.

Zur Ermittlung der Unterschiede zwischen den einzelnen Schichten wurden Reflexions- und interne Quanteneffizienz-Analysen durchgeführt. In Abbildung 29 erkennt man in den

Reflexionskurven zum einen, dass sich die Schichten relativ ähnlich verhalten, dass sich aber dennoch ein kleiner Unterschied im Reflexionsminimum ausgebildet hat. Dies ist durch die optische Dicke (Produkt aus Dicke und Brechungsindex der Schicht) gegeben. Die Referenzschicht weist also eine geringere optische Dicke auf.

Die interne Quanteneffizienz der Solarzellen ist fast deckungsgleich. Im Bereich kurzer Wellenlängen (geringere mittlere Eindringtiefe des Lichts im Silicium) erkennt man die Performance der Solarzellenvorderseite. Hier schneiden die Referenz-Antireflexschicht und die ICP-PECVD-Schicht, die bei 400°C abgeschieden wurde, am besten ab. Die 300°C-ICP-PECVD-Schicht zeigt ein merklich geringeres Niveau.

Bei Bestrahlung der Zellen mit Licht aus dem mittleren oder langwelligen Spektrum verhalten sich die Proben deckungsgleich.

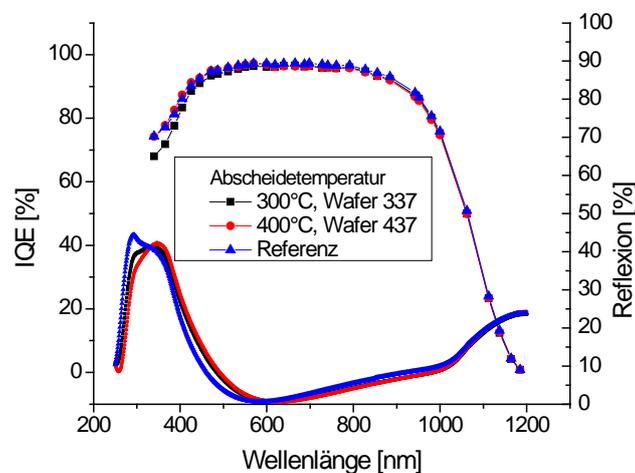


Abbildung 29: Reflexions- und interne Quanteneffizienz-Analyse (IQE) an der jeweils besten mc-Si-Zelle pro Siliciumnitrid-Schichttyp (ICP-PECVD bei 300°C bzw. 400°C und Referenz-PECVD).

Zum Vergleich mit den oben verwandten multikristallinen Solarzellen, wurde zusätzlich monokristallines Material eingesetzt, das entsprechend der mc-Si-Prozessfolge bearbeitet wurde. Die alleinige Ausnahme bildete die Ausbildung der Texturierung der Oberfläche, die mittels eines alkalischen Ätzprozesses durchgeführt wurde.

Die Abscheidung der gleichen Antireflex-Siliciumnitridschichten auf den monokristallinen Substraten ergab das in Abbildung 30 dargestellte Ergebnis. Bei Voc und Jsc bewegten sich die Zellen auf gleichem Niveau. Alleine beim Füllfaktor zeigt sich noch Entwicklungspotential. Erneut kann hier die weitere Anpassbarkeit der Metallisierungsprozesse auf die neuen Antireflexschichten als Grund angeführt werden. Schließlich liegt die erzielte Effizienz der Zellen aber auf vergleichbarem Niveau für alle 3 untersuchten Schichttypen.

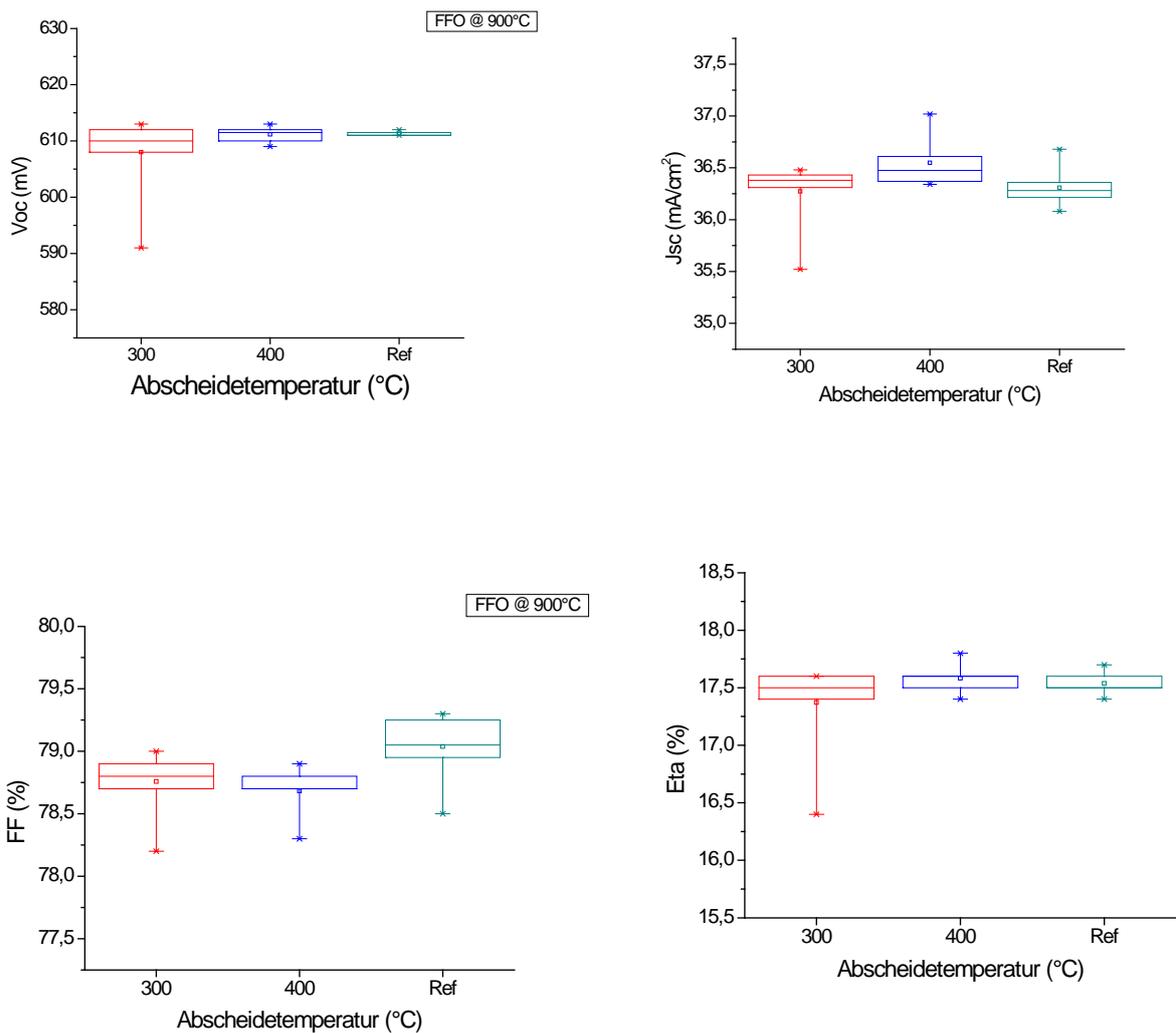


Abbildung 30: Ergebnisse der ersten CZ-Si-Solarzellencharge, bei der Siliciumnitrid-Antireflexschichten verwendet wurden, die in der neuen ICP-PECVD-Anlage entwickelt und hergestellt wurden. Hierbei kamen 2 unterschiedliche Abscheidetemperaturen zum Einsatz (300 und 400 °C). Zum Vergleich sind jeweils die Ergebnisse der mitprozessierten Solarzellen dargestellt, die das ISE-Standard-ARC-SiNx aufweisen (Ref). Es sind die Offene-Klemmen-Spannung Voc, die Kurzschluss-Stromdichte Jsc, der Füllfaktor FF und die sich daraus ergebende Energieumwandlungseffizienz Eta dargestellt.

Zur Optimierung der ICP-PECVD-Antireflexnitridschichten wurde eine zweite Chargenrunde durchgeführt, bei der zunächst in Vortests ein hohes Ladungsträgerlebensdauer-Niveau erreicht werden konnte, das auf eine effiziente Passivierung der Waferoberfläche schließen lässt. In den Vortests wurde vor allem der Einfluss des Prozessgasgemischverhältnisses aus Silan und Ammoniak auf den Brechungsindex, Schichtdicke und Ladungsträgerlebensdauer (nach Feuern) untersucht. Die anschließende Evaluation der neu entwickelten Schichten auf Solarzellen zeigte dabei teils deutliche Unterschiede zwischen den eingesetzten SiNx-Schichten. Die Gruppe mit relativ hochbrechendem SiNx (VP4-3, $n=2,3$ bei 630 nm Lichtwellenlänge) zeigte hier die geringste Performance. Als Grund kann die Ausbildung von Blisterblasen nach dem Feuern nicht ausgeschlossen werden. Dagegen schnitten die Zellen mit dem SiNx VP4-5 ($n=1,9$) sehr gut ab und insbesondere bei der Voc sogar leicht besser als die Referenz, im Durchschnitt und bei den

Spitzenzellen. Es konnte also durch Prozessoptimierung eine Verbesserung des ICP-PECVD-Prozesses erreicht werden.

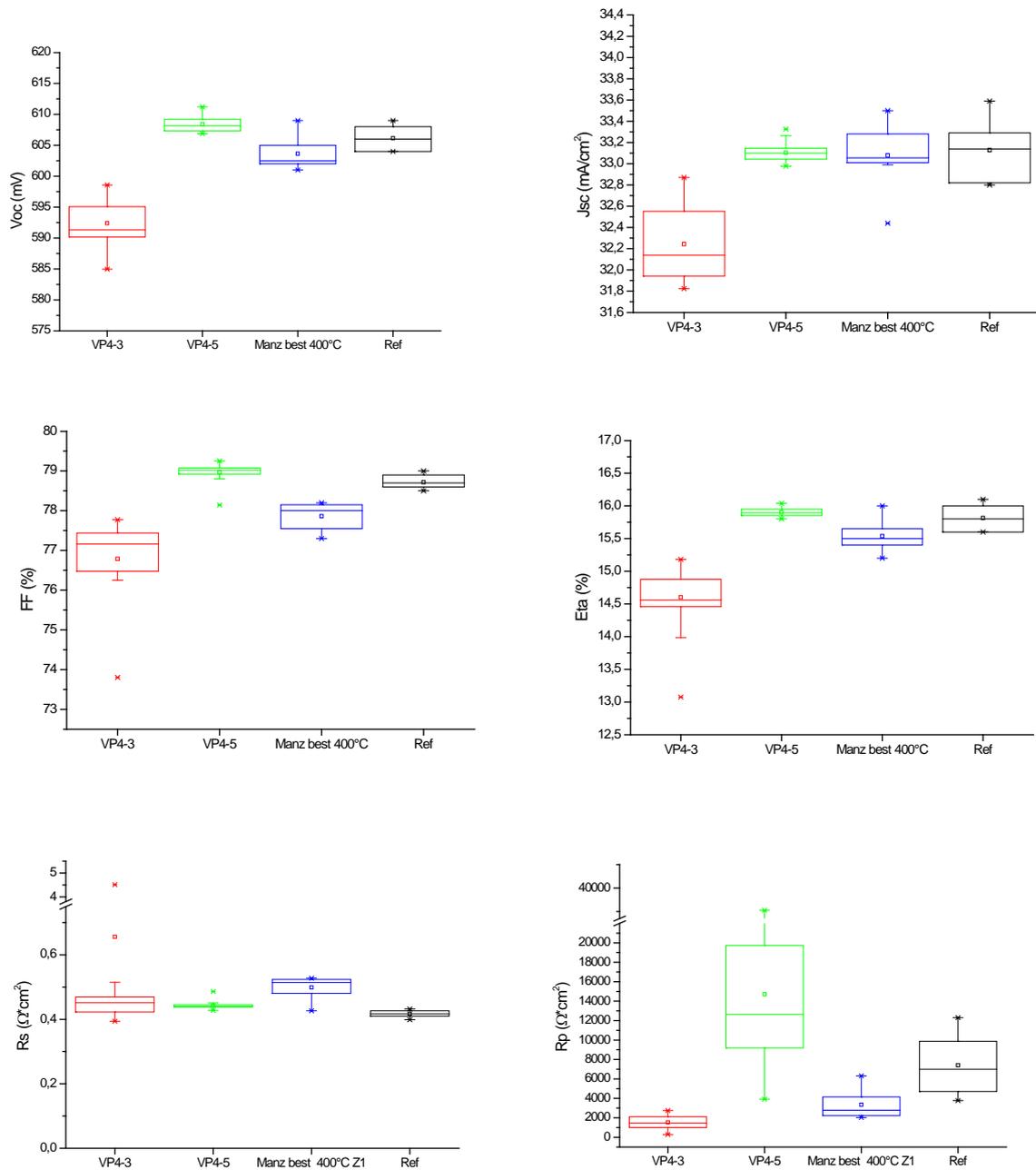


Abbildung 31: Ergebnisse der zweiten mc-Si-Solarzellencharge, bei der Siliciumnitrid-Antireflexschichten verwendet wurden, die in der neuen ICP-PECVD-Anlage entwickelt und hergestellt wurden. Es kamen hierbei 3 unterschiedliche Siliciumnitridschichten aus der neuen Anlage zum Einsatz. Sie unterschieden sich durch das eingestellte Gasflussverhältnis und dem sich daraus ergebenden Schichtwiderstand der SiNx-Schichten: $n(\text{VP4-3})=2,3$ Zum Vergleich sind jeweils die Ergebnisse der mitprozessierten Solarzellen dargestellt, die das ISE-Standard-ARC-SiNx aufweisen (Ref). Es sind die Offene-Klemmen-Spannung Voc, die Kurzschluss-Stromdichte Jsc, der Füllfaktor FF und die sich daraus ergebende Energieumwandlungseffizienz Eta dargestellt. Zusätzlich sieht man die Serienwiderstands- Rs und den Parallelwiderstand Rp der Solarzellen.

Die interne Quanteneffizienz der jeweils besten Zellen ihrer Gruppe, die in Abbildung 32 dargestellt ist, verrät zum einen, dass die Nitride „Referenz“ und „Manz-Best Z1“ am besten und gleichwertig abgeschnitten haben. Des Weiteren gibt es für Zellen mit SiNx VP4-5 gute Werte, die aber nicht ganz das Niveau der anderen beiden SiNx-Schichten erreicht. Dies kann hauptsächlich auf 2 Gründe zurückgeführt werden: Zum einen ist möglicherweise die Oberflächenpassivierung des SiNx VP4-5 nicht auf einem so hohen Niveau ausgeprägt wie bei den beiden vorgenannten SiNx-Schichten. Zum anderen ist evtl. die Passivierung von Defekten im Silicium-Volumen nur begrenzt erfolgt. Das SiNx VP4-3 weist den höchsten Brechungsindex in der Gruppe von SiNx-Schichten auf. Damit einher geht auch eine erhöhte Absorption im kurzwelligen Bereich. Daher ist ein Grund für die geringere Performance dieses Schichttyps darin zu finden.

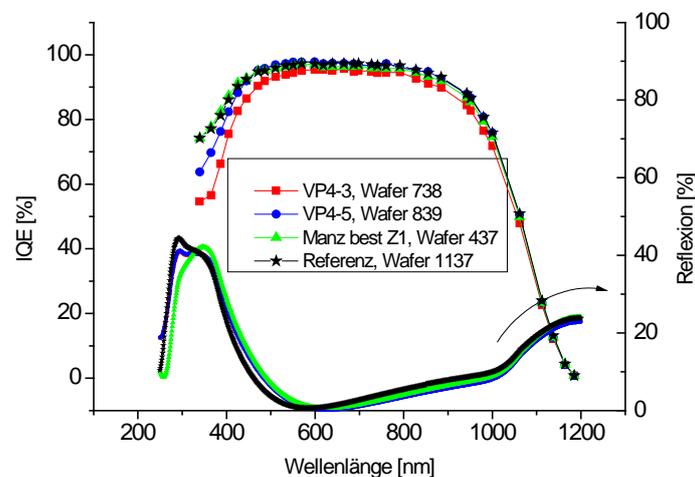


Abbildung 32: Interne Quanteneffizienzen und Reflexionsmesswerte für 4 exemplarische Solarzellen der zweiten Charge mit unterschiedlichen SiNx-Beschichtungen auf der Zellvorderseite.

In Abbildung 33 sind die Ergebnisse der zweiten Solarzellencharge auf der Basis von CZ-Si-Wafern dargestellt. Dabei wurde eine Variation der Abscheidetemperatur durchgeführt. Sowohl in den Stromdichte- als auch in den Spannungswerten erkennt man eine zunehmende Tendenz in Richtung erhöhter Abscheidetemperatur (Substrattemperatur) mit einer Sättigung ab ca. 300°C. Bei den Voc-Werten wurden vergleichbare und teils bessere Werte erreicht als mit der Standard-Technologie, die Stromdichten liegen leicht unter den Referenzwerten. Dies ist vermutlich vor allem auf die noch nicht optimale Schichtdicke zurückzuführen. Die Füllfaktoren sind auf gleichem Niveau, nur für die bei 100°C abgeschiedenen Schichten ergab sich eine geringere Performance. Die SiNx-Schichten, die bei nur 100°C abgeschieden wurden, zeigten allerdings auf FZ-Si-Testwafern mit quasi-perfektem Volumen die besten Passivierungsergebnisse. Gleichzeitig war für die 100°C-SiNx-Schichten die Abscheiderate am höchsten. Damit einher ging der geringste Brechungsindex. Dies lässt auf eine relativ poröse Schichtstruktur schließen, die für die Solarzellenperformance nicht optimal ist.

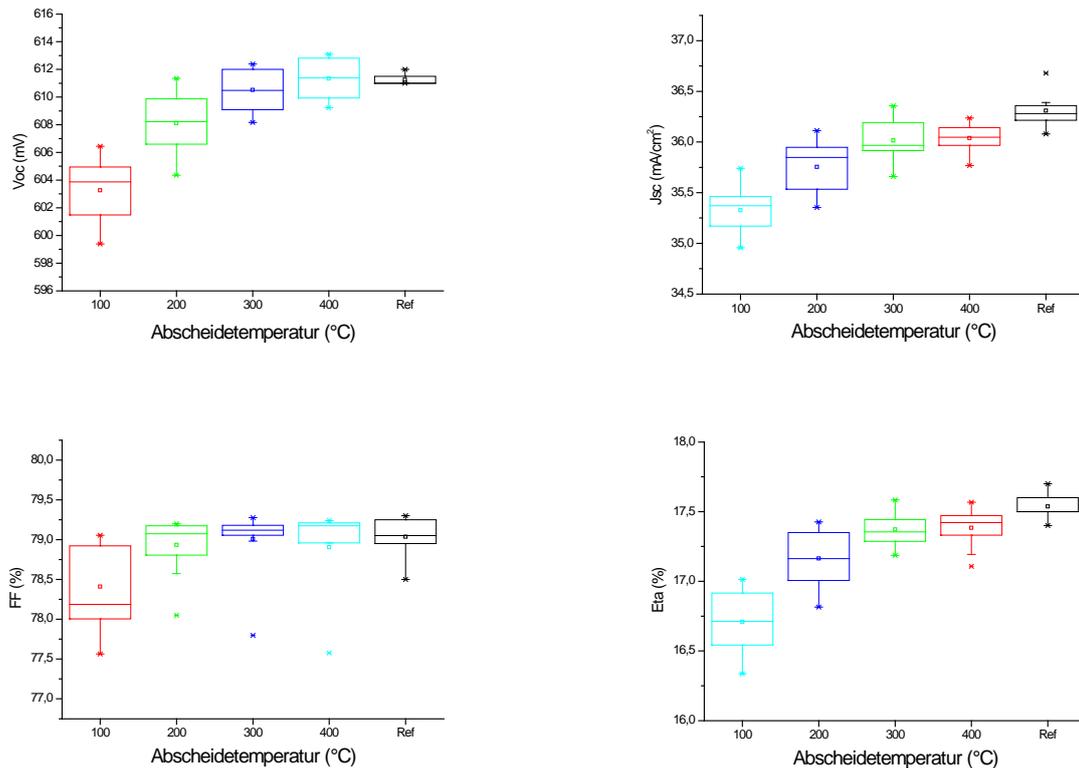


Abbildung 33: Ergebnisse der zweiten CZ-Si-Solarzellencharge, bei der Siliciumnitrid-Antireflexschichten verwendet wurden, die in der neuen ICP-PECVD-Anlage entwickelt und hergestellt wurden. Hierbei kamen 4 unterschiedliche Abscheidetemperaturen zum Einsatz (100, 200, 300 und 400 °C). Zum Vergleich sind jeweils die Ergebnisse der mitprozessierten Solarzellen dargestellt, die das ISE-Standard-ARC-SiNx aufweisen (Ref). Es sind die Offene-Klemmen-Spannung Voc, die Kurzschluss-Stromdichte Jsc, der Füllfaktor FF und die sich daraus ergebende Energieumwandlungseffizienz Eta dargestellt.

Im Folgenden sollen die Ergebnisse von Zellchargen auf mono- sowie multikristallinem Siliciummaterial vorgestellt werden, die zur Weiterentwicklung des SiNx-Antireflex-Films genutzt wurden. Mittels einer Variation in Gasverhältnis NH₃/SiH₄, des Gesamtgasflusses und der Leistung konnten Parameter gefunden werden, mit denen für Solarzellen auf monokristallinem Cz-Si ein SiNx-ARC hergestellt werden kann, welches vergleichbare und bessere Zellergebnisse als die ISE-Referenz liefert.

In einer weiteren Zellcharge wurden SiNx-Stapelschichten auf multikristallinen Si-Wafern hergestellt und zu Solarzellen prozessiert. Hierbei wurden zwei SiNx-Schichten übereinander abgeschieden, ohne das Vakuum zu verlassen, wobei in der dünnen ersten Schicht der Brechungsindex und die Schichtdicke variiert wurden. Auch hier konnten Prozesse eingestellt werden, die in der Solarzellenperformance sowohl der einschichtigen ISE-Referenz als auch der einschichtigen Manz-Referenz überlegen sind.

Zur Herstellung der Solarzellen wurde wie in Abbildung 34 dargestellt ein Standardprozessfluss, entsprechend einem industriellen Herstellungsprozesses für c-Si-Solarzellen, verwendet.



Abbildung 34: Prozessfluss zur Herstellung kristalliner Siliciumsolarzellen mit Al-BSF.

In einer Zellcharge auf monokristallinem Cz-Si-Material (3...6Ohm*cm) sollte ermittelt werden, wie sich eine Variation von Gasverhältnis NH_3/SiH_4 , Gesamtgasfluss und Leistung auf die Zellperformance auswirken. Die Leistungsvariation wurde hierbei auf dem Teststand bei Manz in Karlstein, die Variationen von Gasverhältnis und Gesamtgasfluss wurden am ISE durchgeführt. Hierbei wurden in Vorexperimenten die Brechungsindizes ermittelt und die Parameter mit für Solarzellen relevanten Werten ausgewählt (erste dünne Schicht mit $n_{630} < 2,3$). Die Solarzellen wurden mit einem 75 Ohm/sq Emitter versehen, das Kontaktfeuern fand bei einer Temperatur von 900°C statt.

Rezept	Gesamtgasfluss [sccm]	Ratio NH_3/SiH_4	P [kW]	Refl. Minimum Lambda (nm)	Gewichtete Reflexion [%]	n	d bei n	Abscheidezeit [s]	Rate [nm/s]
Z3_1	1350	2	6,5	705	2,341	2,15	82,0	30	2,7
Z3_2	1291	2,3	6,5	757	2,678	2,01	94,2	31	3,0
Z3_3	1246	2,6	6,5	664	2,175	1,93	86,0	34	2,5
Z3_5	2080	2,3	6,5	769	3,766	2,13	90,3	26	3,5
Z3_6	2008	2,6	6,5	764	2,763	2,04	93,6	26	3,6
Z3_9	2769	2,6	6,5	646	2,040	2,16	74,8	23	3,3
Manz V1	3000	2	6,5	896	3,473	2,67	83,9	22	3,8
Manz V2	3000	2	8	682	2,163	2,42	70,5	19	3,7
Manz V3	3000	2	10	758	2,341	2,32	81,7	20	4,1
Manz V4	2750	2,6	10	783	2,678	2,01	97,4	22	4,4

Tabelle 1: Brechungsindizes und Abscheideraten.

In Tabelle 1 sind die ermittelten Brechungsindizes und die daraus resultierende, über das Prinzip der Viertelwellenlänge bestimmten Schichtdicken dargestellt. Mittels des Prinzips der Viertelwellenlänge kann über das gemessene Reflexionsminimum λ über folgende Formel die Schichtdicke d ermittelt werden:

$$d = \frac{\lambda}{4 \cdot n}$$

Die hierbei bestimmten Abscheideraten liegen bei Leistungen unter 10kW durchweg unter 4nm/s, was für eine industrielle Umsetzung noch nicht ausreichend ist.

Zellergebnisse

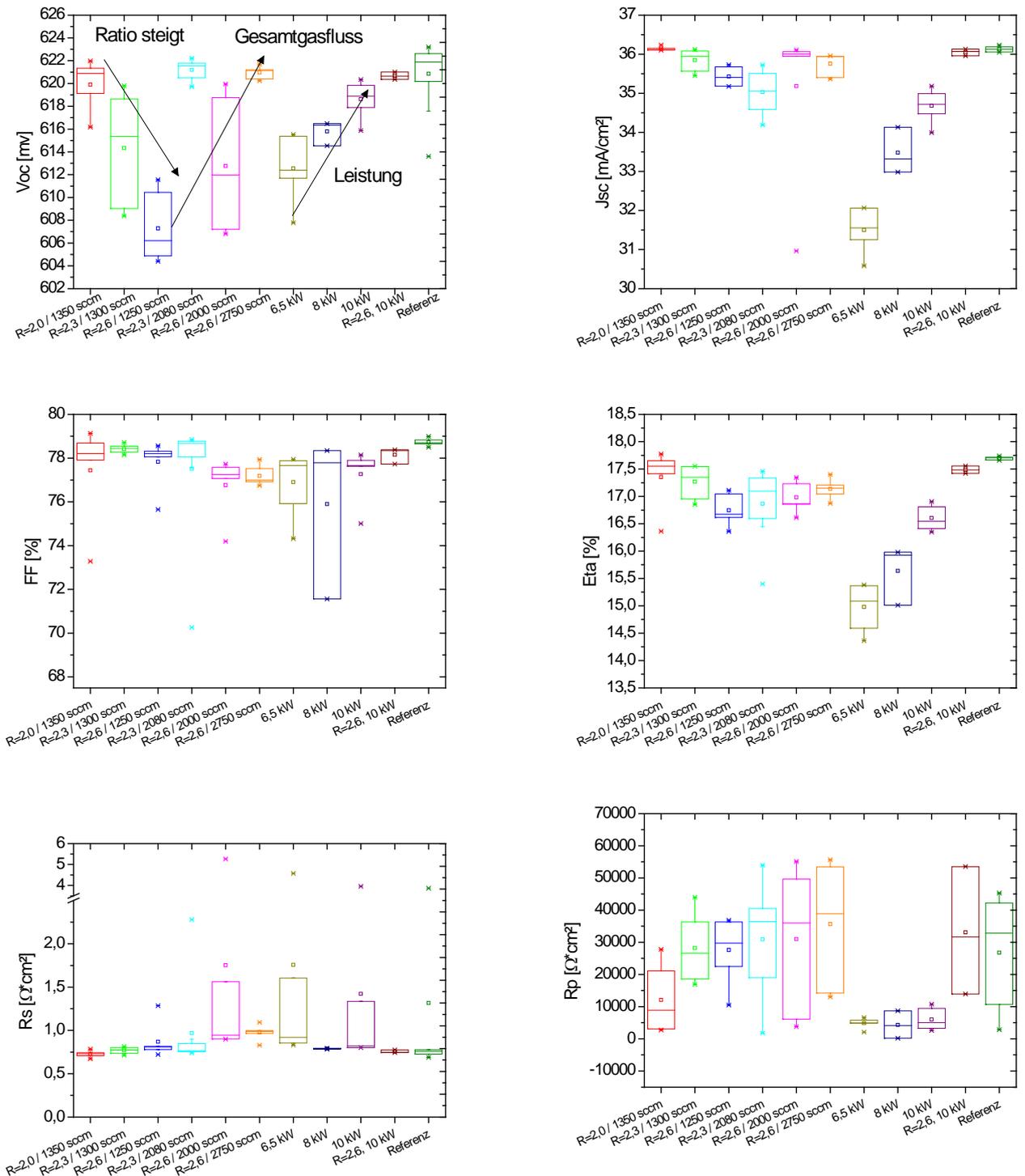


Abbildung 35: Einfluss Gasverhältnis NH_3/SiH_4 bei ähnlichem Gesamtgasfluss (1250sccm bis 1350sccm), Einfluss Gesamtgasfluss bei Ratio $R \text{ NH}_3/\text{SiH}_4 = 2,6$, sowie Einfluss der Leistung bei $\text{NH}_3/\text{SiH}_4 = 2,0$ und Gesamtgasfluss von 3000sccm auf die Solarzellenperformance.

Die Solarzellenleistung der mit dem besten ARC-SiNx-Prozess beschichteten Zelle erreichte in etwa das gleiche Niveau wie der Referenzprozess am ISE.

Die Leistungsvariation wurde auf dem Teststand bei Manz in Karlstein durchgeführt. Insgesamt ist bei dieser Leistungsvariation der Brechungsindex zu hoch im Bereich von 2,3 bis 2,6

ausgefallen, fallend mit zunehmender Leistung. Die höhere Leistung bewirkt eine bessere Ausnutzung des NH_3 , was zu einem niedrigeren Brechungsindex, niedrigerem Wasserstoffgehalt und somit potentiell zu weniger Blistering führt. Das spiegelt sich auch im besten Zellergebnis der in Karlstein beschichteten Proben wieder, die bei 10kW und $R=2,6$ beschichtet wurden, was zu dem niedrigsten Brechungsindex von 2,01 führte.

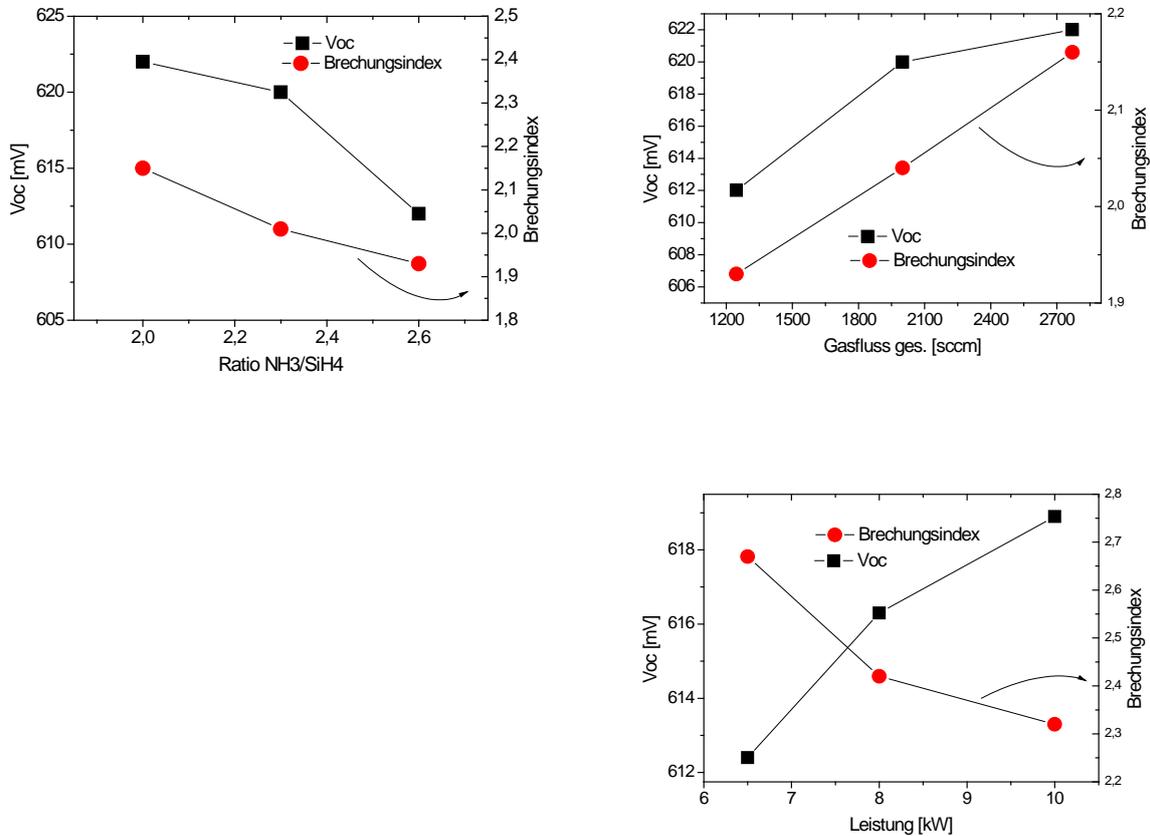


Abbildung 36: Abhängigkeit der Leerlaufspannung Voc von den SiNx-Beschichtungsparametern Gasverhältnis NH_3/SiH_4 , Gesamtgasfluss und Plasmaleistung.

Zusammengefasst kann gesagt werden, dass der ideale Brechungsindex im Bereich von 2,1 liegt, was im Wesentlichen über das Gasverhältnis, den Gesamtgasfluss sowie die Leistung eingestellt werden kann. Bei einer Leistung von 6,5 kW wird das beste Zellergebnis bei einem Gasverhältnis von 2,0 erreicht, bei einer Leistung von 10 kW liegt, bedingt durch die bessere Dissoziation des NH_3 , das ideale Gasverhältnis bei $\text{NH}_3/\text{SiH}_4=2,6$. Bei steigendem Gesamtgasfluss und gleichbleibender Leistung steigt die Ausnutzung des SiH_4 , was sich in steigenden Brechungsindizes widerspiegelt. Um eine für eine industrielle Umsetzung notwendige Abscheiderate von >4 nm/s zu erreichen muss entweder mit hohem Gesamtgasfluss im Bereich von 3000 sccm oder mit einer Leistung ≥ 10 kW gearbeitet werden.

	Uoc	Jsc	Eta	FF	Rp	Rs
ISE	[mV]	[mA/cm²]	[%]	[%]	[Ω*cm²]	[Ω*cm²]
Z3_1: 1350sccm, R=2, 6,5kW, n=2,15, d=82nm						
Best	622	36,23	17,78	79,1	27787	0,67
MW	620	36,14	17,35	77,4	9709	0,73
Stdabwn	2	0,05	0,51	2,1	10264	0,04
Median	621	36,11	17,55	78,2	3460	0,73
Manz V4: 2750sccm, R=2,6, 10kW, n=2,01, d=97nm						
Best	621	36,13	17,56	78,4	53530	0,74
MW	621	36,05	17,49	78,2	33047	0,76
Stdabwn	0	0,07	0,05	0,3	16194	0,01
Median	621	36,07	17,48	78,3	31678	0,75
Referenz						
Best	623	36,23	17,74	79,0	45287	0,69
MW	621	34,08	14,73	67,5	26770	4,04
Stdabwn	3	4,40	4,75	17,2	15796	5,86
Median	622	36,07	17,67	78,6	32820	0,77

Tabelle 2: : IV-Daten der besten am ISE und bei Manz prozessierten Gruppen dieser frühen Zellcharge im Vergleich zu der Referenzgruppe. Mit Prozess Z3_1 konnte das Niveau der Referenz erreicht werden. Die Schicht in Prozess Manz V4 wurde zu dick abgeschieden, was der Grund für einen niedrigeren Strom durch höhere Absorption und einen schlechteren Füllfaktor im Vergleich zu den anderen Gruppen sein könnte. Dies hat einen geringeren Zellwirkungsgrad zur Folge.

IQE / j_0 -Auswertung

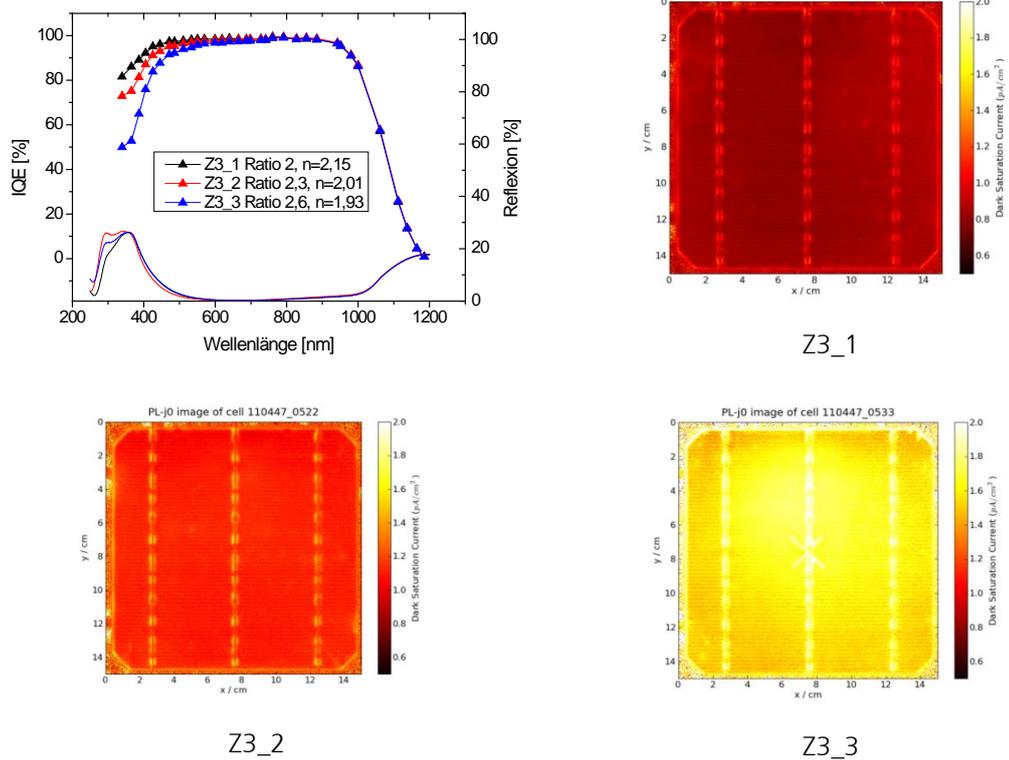


Abbildung 37: IQE und PL- j_0 Analyse der Variation im Gasverhältnis bei ähnlichem Gesamtgasfluss (1250sccm bis 1350sccm) und einer Leistungseinkopplung von 6,5kW.

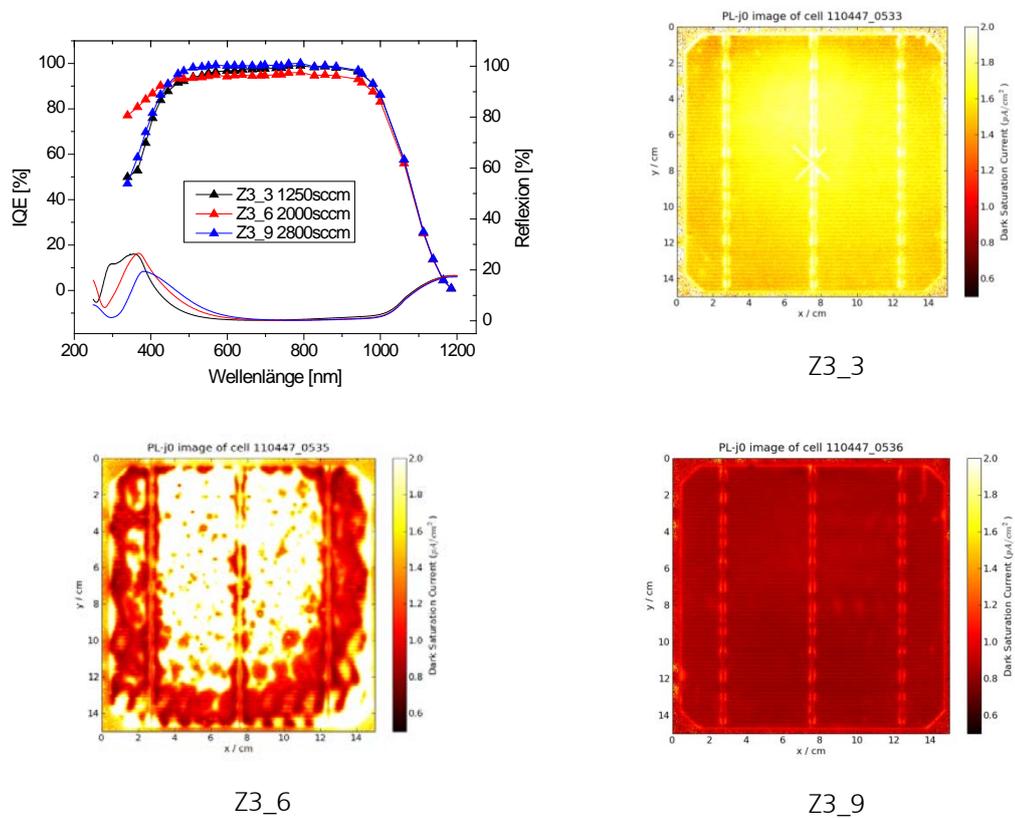


Abbildung 38: IQE und PL- j_0 Analyse der Variation Gesamtgasfluss bei Ratio $R = \text{NH}_3/\text{SiH}_4 = 2,6$ und einer Leistungseinkopplung von 6,5kW.

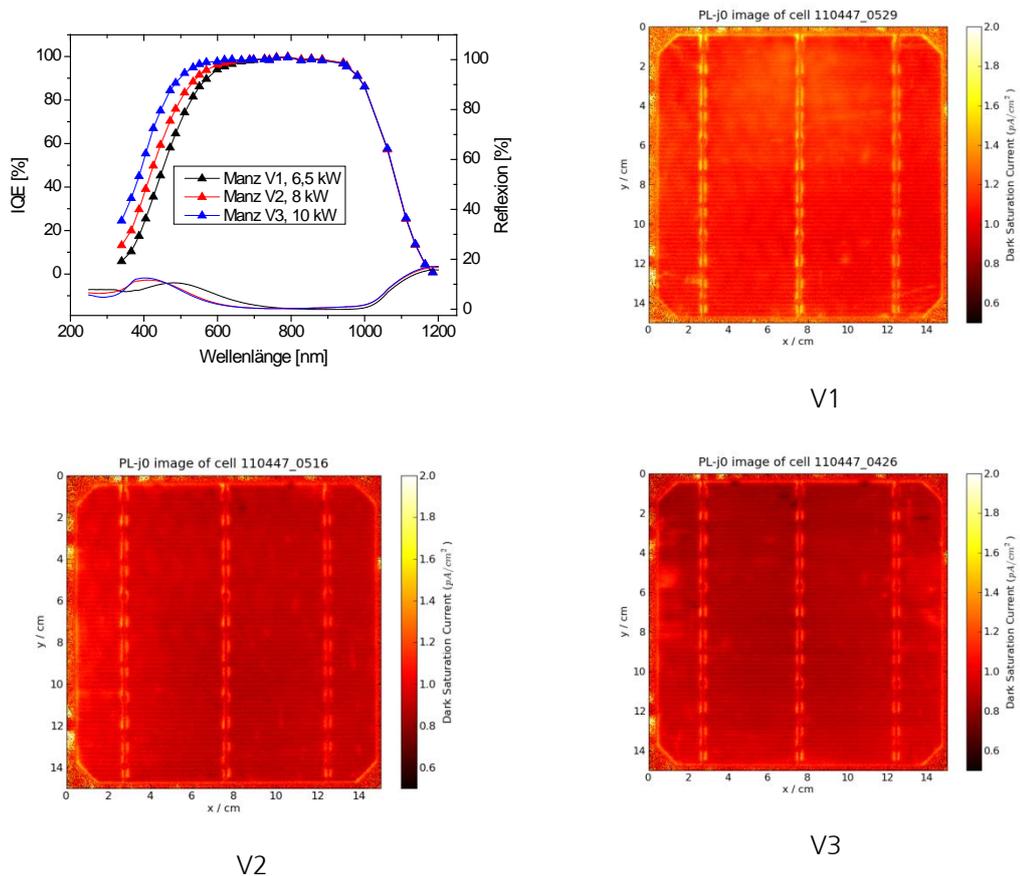


Abbildung 39: IQE und PL-j₀ Analyse der Variation der Leistung bei NH₃/SiH₄ = 2,0 und Gesamtgasfluss von 3000scm.

Abbildung 37 bis Abbildung 39 zeigen die IQE/j₀-Auswertungen der durchgeführten Variationen.

Abbildung 37 zeigt bei konstanter Leistung und ähnlichem Gesamtgasfluss einen klaren Vorteil bei einem Gasverhältnis von 2,0, was in einem Brechungsindex von 2,15 resultiert. Dies spiegelt sich auch in den deutlich besseren Emittersättigungsstromdichten j₀ wider.

Die in Abbildung 38 gezeigte IQE/PL Analyse der Variation im Gesamtgasfluss gibt bei Zelle 3_6 einen deutlichen Hinweis auf Prozessprobleme, was sich in den schlechten Emittersättigungsstromdichten widerspiegelt. Im PL-Bild erkennt man die Struktur des Kettenbands des Feuerofens. Insgesamt scheint allerdings ein hoher Gesamtgasfluss vorteilhaft zu sein.

Wie in Abbildung 39 zu sehen ist, ist eine höhere Leistung aufgrund der besseren Gasausnutzung und somit mutmaßlich höherem Wasserstoffanteil und besserer Passivierungseigenschaften vorzuziehen. Durch die höhere Leistung wird der Dissoziationsgrad des NH₃ deutlich erhöht und somit anteilmäßig weniger Si in die Schicht eingebaut. Das zeigt sich auch in den mit steigender Leistung abnehmenden Brechungsindizes. Nichtsdestotrotz liegen die Brechungsindizes in einem Bereich von etwa 2,3 bis 2,7 (Tabelle 1), was insgesamt für eine SiNx-ARC zu hoch ist. Hier muss noch nachoptimiert werden.

Mit dem bei Zelle 3_1 verwendeten Prozessparametern konnte eine in der Zellperformance der Referenz gleichwertige SiNx-ARC-Schicht hergestellt werden. Im PL-Bild in Abbildung 37 erkennt man dabei auch, dass eine sehr homogene Leistungsfähigkeit der mit diesem Prozess hergestellte Solarzelle erreicht wurde.

In der folgenden Solarzellcharge wurden Siliciumnitridstapelschichten zur Passivierung der Solarzellenvorderseite entwickelt.



Abbildung 40: Aufbau der Siliciumnitridstapelschichten (nicht maßstabsgerecht).

Zur Herstellung der Stapelschichten wurden multikristalline Siliciumwafer mit einer Basisdotierung von 1...2,5 Ohm*cm verwendet. Der Emitterschichtwiderstand nach Diffusion betrug 75 Ohm/sq, die Kontakte wurden bei einer Temperatur von 880°C gefeuert.

In der ersten Schicht, direkt auf dem Siliciumsubstrat, wurde eine Variation der Schichtdicke von 5 nm bis 20 nm sowie eine Variation des Brechungsindex im Bereich 2,4 bis 2,7 durchgeführt. In Vorversuchen zeigte sich ein höherer Wasserstoffanteil in diesen höherbrechenden Schichten, was vorteilhaft für die Volumenpassivierung, insbesondere bei mc-Si-Material sein könnte. Um ein Blistering und Absorptionsverluste in diesen wasserstoffreichen Schichten zu vermeiden wurden diese bewusst sehr dünn gehalten und mit einer wasserstoffärmeren, dem Standard Antireflex-SiNx ähnlichen Schicht bedeckt. Für diese zweite Schicht wurde ein Brechungsindex von 2,1 und einer der ersten Schicht angepassten Schichtdicke gewählt, um insgesamt auf etwa 75 bis 80 nm zu kommen (Tabelle 3).

Die Wafer wurden direkt vor der Beschichtung mit einem Ammoniakvorplasma konditioniert.

Die in Vortests ermittelten Brechungsindizes wurden zur Berechnung der mittleren Schichtdicken der Stapelschichten verwendet. Hierbei wurden die einzelnen Brechungsindizes mit der entsprechenden Schichtdicke, welche auch in Vortests ermittelt wurde, prozentual gewichtet und die Schichtdicke mittels des Prinzips der Viertelwellenlänge bestimmt.

Mit den berechneten Schichtdicken und den bekannten Abscheidezeiten konnten die jeweiligen Abscheideraten ermittelt werden. Die für eine industrielle Umsetzung notwendige Abscheiderate von 4nm/s konnte in allen Fällen übertroffen werden.

Gruppe	Refl. Minimum [nm]	Gewichtete Reflexion [%]	Brechungsindex		d * [nm]	t1 [s]	t2 [s]	Rate [nm/s]
			n1	n2				
1								
(Ref Manz)	637	10,29	2,15	1,00	74,1	16	0	4,6
2	676	10,03	2,40	2,10	79,1	2	14	4,9
3	627	9,76	2,40	2,10	72,1	4	12	4,5
4	664	10,14	2,40	2,10	78,3	1	15	4,9
5	650	10,20	2,50	2,10	75,6	2	14	4,7
6	615	9,62	2,70	2,10	70,7	2	14	4,4
7								
(Ref Manz 2)	627	10,03	2,15	2,10	72,9	16	0	4,6
Ref ISE	615	9,94			75,0			

Tabelle 3: Reflexionen, Schichtdicken und Abscheideraten.

* n1 & n2
prozentual
gewichtet

Zellergebnisse

Wie Abbildung 41 zeigt, konnten die Wirkungsgrade der Referenz in allen Fällen übertroffen werden. Der leichte Vorteil in der Kurzschlussstromdichte der ISE Referenzschicht kann durch die einschichtige ARC und dadurch eine geringere Lichtabsorption erklärt werden.

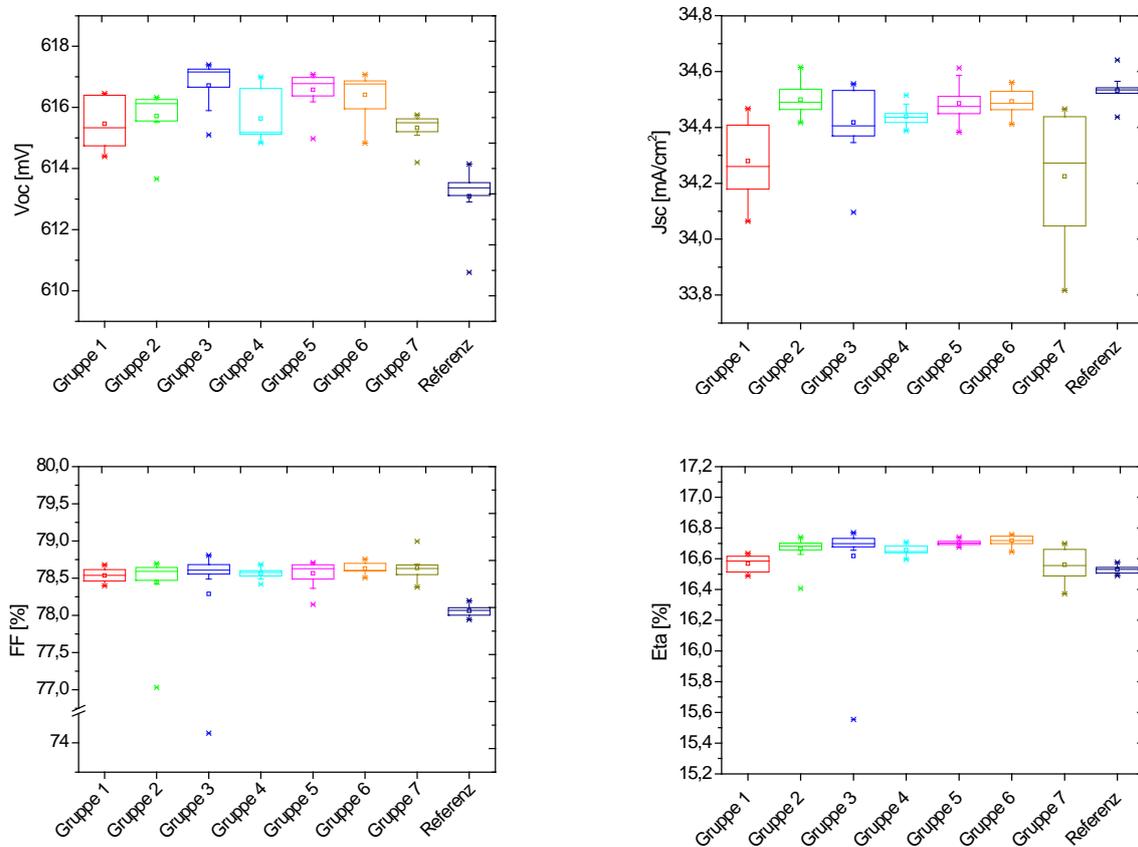


Abbildung 41: IV-Werte der Zellen mit ARC-Stapelschichten (Gr. 2 – 6), den Manz-Referenzen (Gr. 1 und 7) und der ISE-Referenz

Der relativ niedrige FF der ISE-Referenz lässt sich zum einen durch einen erhöhten Emitterschichtwiderstand dieser Gruppe erklären. Durch eine Fehlprozessierung musste das SiNx-ARC wieder abgeätzt werden, wodurch auch der Emitter leicht angeätzt wurde. Der dadurch resultierende erhöhte Emitterschichtwiderstand kann der Grund für die leichten Kontaktierungsprobleme sein, was sich möglicherweise in einem erhöhten Serienwiderstand niederschlug. Da aber dennoch auch die Voc-Werte der neuen Prozesse oberhalb der Referenz liegen, kann hier klar von einem Vorteil der neuen Prozesse gegenüber der Referenz gesprochen werden.

Reproduzierbarkeit

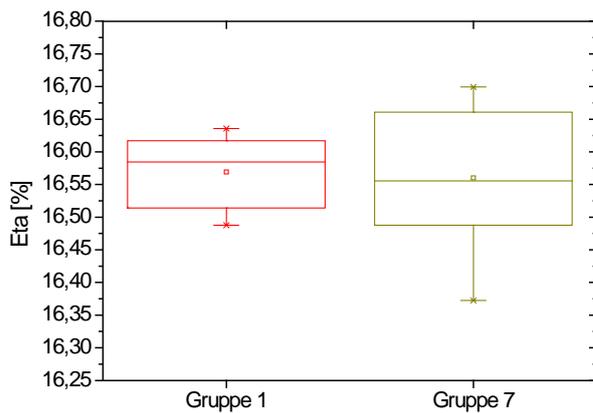


Abbildung 42: Vergleich der beiden Manz-Referenz-Gruppen. Gruppe 1 wurde zu Beginn, Gruppe 7 am Ende des Experiments abgeschieden.

Bei Gruppe 1 und 7 handelt es sich um die Referenz mit den Parametern dem besten bei Manz Coating in Karlstein hergestellten einschichtigen ARC-SiNx. Gruppe 1 wurde zu Beginn morgens, Gruppe 7 am Ende des Experiments abends beschichtet. Es konnte im Zellwirkungsgrad kein signifikanter Unterschied in der Anlagenperformance durch Konditionierung während eines Prozesstages festgestellt werden.

IV-Ergebnisse vs. Dicke (Schicht 1)

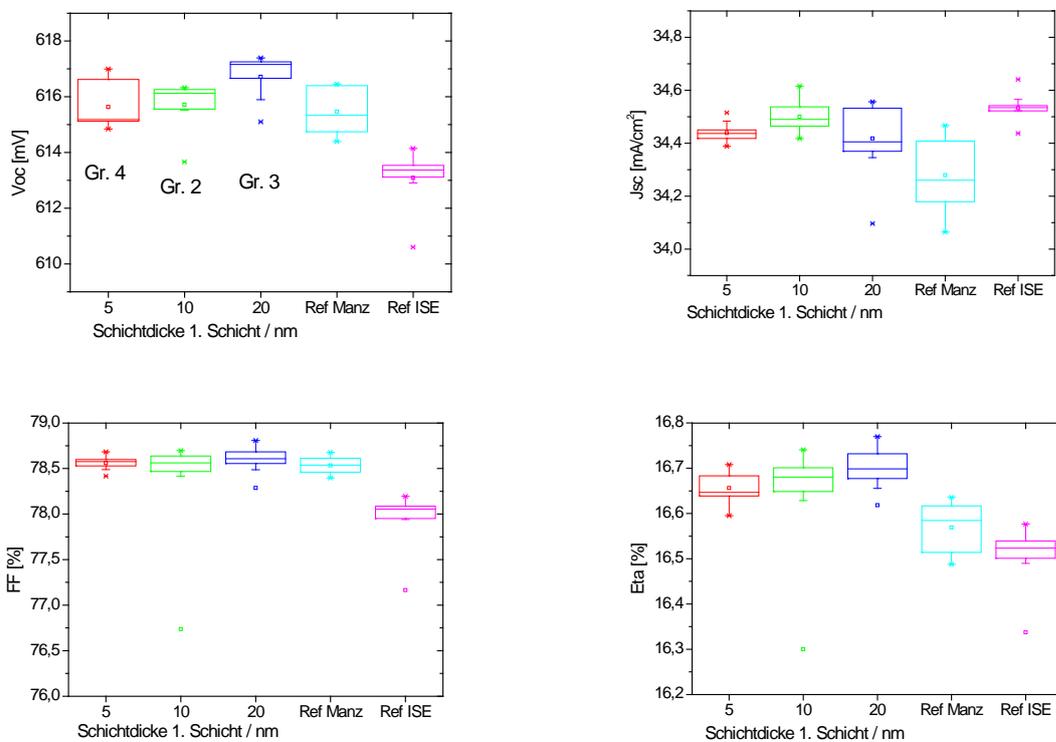


Abbildung 43: IV-Ergebnisse über die Dicke von Schicht 1. Alle Schichten haben einen Brechungsindex von 2,4, bei einem Gesamtgasfluss von 2700scm, einer Ratio von R=1,8 und einer eingekoppelten Leistung von 10kW.

Wie in Abbildung 43 zu sehen ist, zeigt eine Dicke von 20 nm deutliche Vorteile in Voc, was sich auch in Eta widerspiegelt. Der leicht niedrigere jsc gegenüber der ISE-Referenz, wahrscheinlich hervorgerufen durch eine höhere Absorption in der hochbrechenden ersten Schicht, wird durch den Voc-Gewinn kompensiert. Erstaunlich ist hierbei, dass auch eine Schichtdicke von 20nm nicht zu einer stärkeren Verringerung des jsc führt.

IV-Ergebnisse vs. n (Schicht 1)

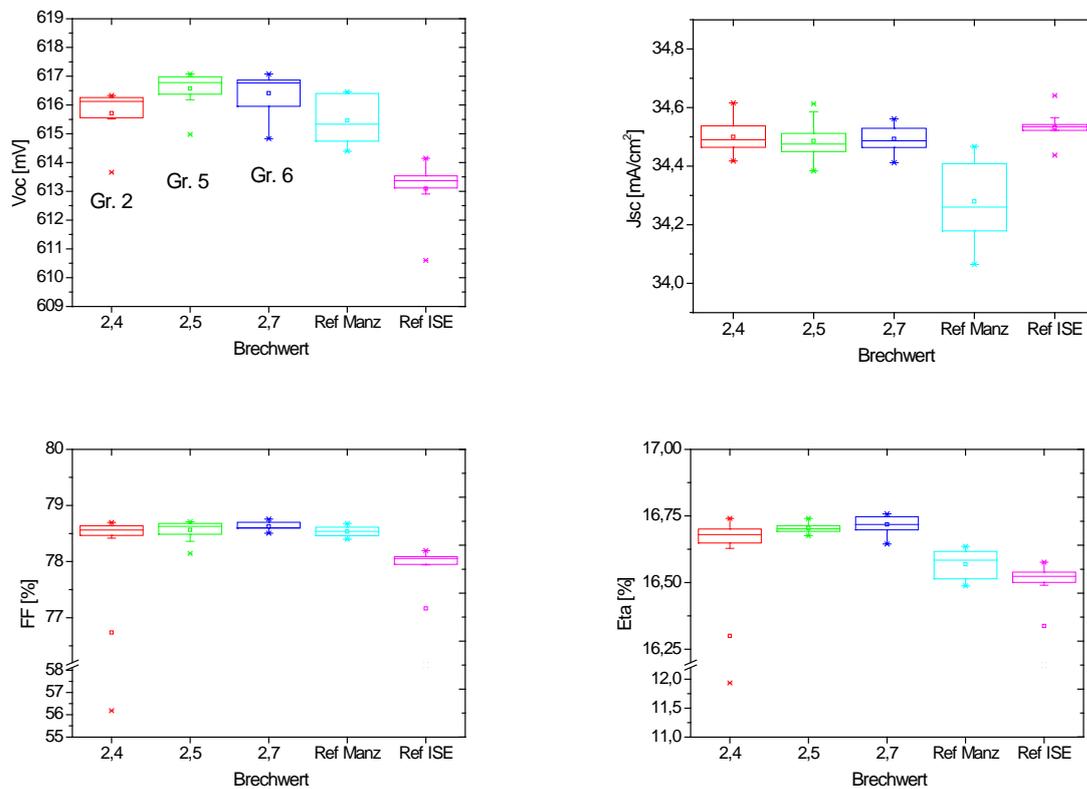


Abbildung 44: IV-Ergebnisse über Brechungsindex in Schicht 1. Alle Schichten haben eine Dicke von etwa 10nm. Der Gesamtgasfluss variiert im Bereich von 2500sccm (Ratio 1,5 n=2,7) und 2650sccm (Ratio 1,7 bzw. 1,8, n=2,5 bzw. 2,4), die eingekoppelte Leistung lag bei 10kW.

Abbildung 44 zeigt die IV-Ergebnisse der Variation im Brechungsindex, eingestellt durch verschiedene Gasverhältnisse NH_3/SiH_4 . Den Unterschied im Gesamtgasfluss außer Acht gelassen, zeigt eine Ratio von 1,5 und ein daraus resultierender Brechungsindex von 2,7 einen leichten Vorteil im Zellwirkungsgrad. Die Leerlaufspannung ist bei einem Brechungsindex von 2,5, was einem Gasverhältnis von 1,7 entspricht, am höchsten. Die Kurzschlussstromdichten liegen für alle Gruppen auf einem ähnlichen Niveau.

Zusammengefasst kann gesagt werden, dass eine höhere Dicke von 20nm und ein höhere Brechungsindex in der ersten Schicht vorteilhaft für die Zellperformance ist.

Photolumineszenz: Beste Gruppen (3 und 6), Referenzen ISE und Manz

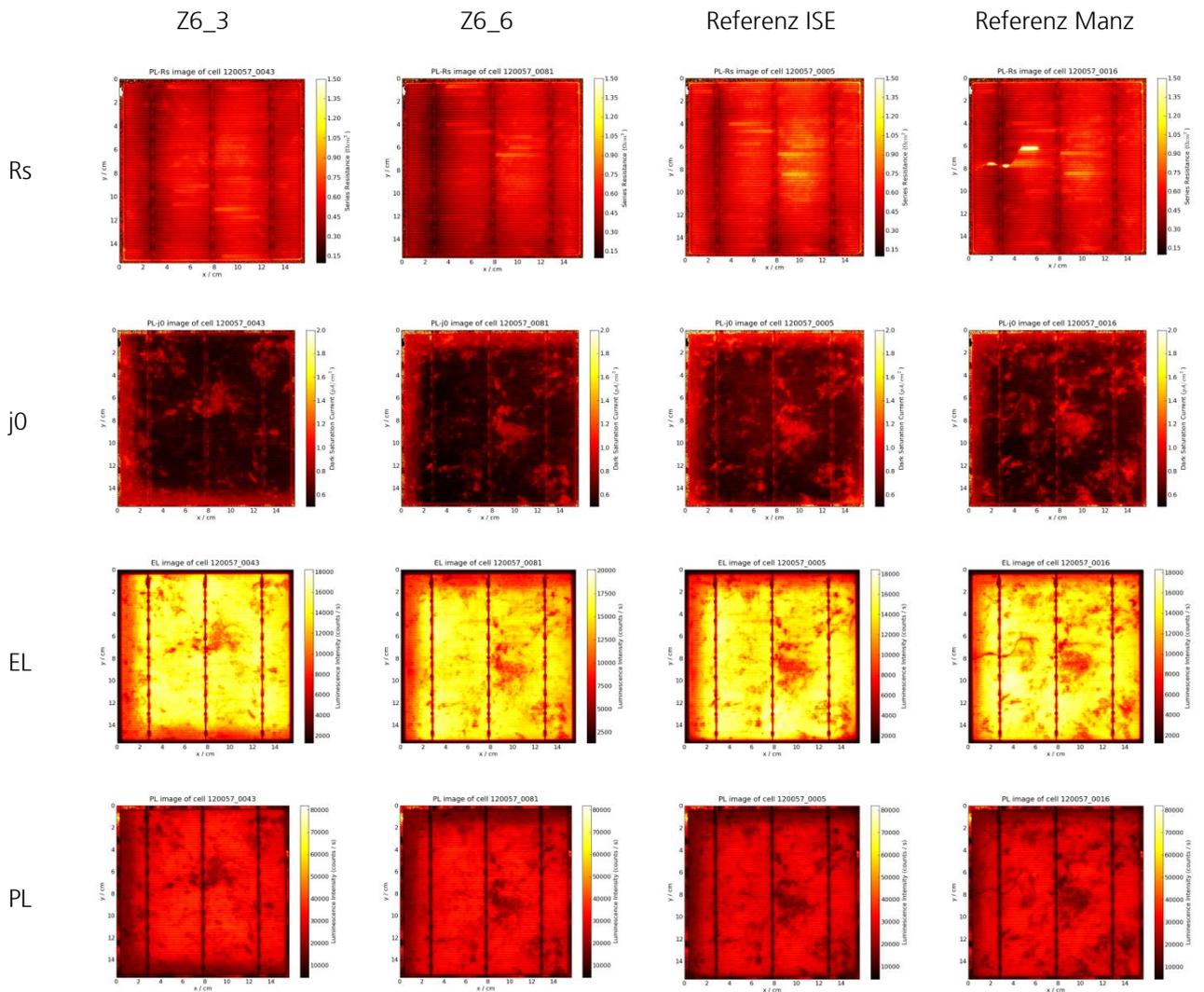


Abbildung 45: Die Lumineszenzaufnahmen zeigen keinen signifikanten Unterschied der verschiedenen Gruppen untereinander.

Die Lumineszenzaufnahmen der fertig prozessierten Solarzellen zeigen für die besten Gruppen keine Anzeichen auf Prozessfehler. Lediglich die Referenzen zeigen im Rs-Bild vereinzelt erhöhte Serienwiderstände durch Kontaktfingerunterbrechungen. Bei der Manz-Referenz ist auch ein Riss in der Zelle im Bereich des linken Busbars zu sehen, wobei nicht nachzuvollziehen ist, ob dieser vor oder nach der IV-Messung zustande gekommen ist. Insgesamt kann gesagt werden, dass das Potential sehr gut ausgeschöpft werden konnte.

AP B3 Prozessentwicklung und Optimierung für die Beschichtung der Rückseite

Da die Prozessentwicklung zyklisch in mehreren Schritten erfolgte, wird hier eine kombinierte Darstellung der Arbeitspakete

AP B3.1 Basisentwicklung eines Passivierungskonzepts,
 AP B3.2 Prozessoptimierung am PPM,
 AP B3.3 Test und Evaluation der Rückseitenpassivierung
 gewählt:

Von Manz in Kooperation mit dem ISE wurde am Teststand bei Manz ein AlOx-Beschichtungsprozess eingerichtet. Nach Einfahren des Beschichtungsprozesses wurde eine erste Solarzellcharge prozessiert, die den neuen AlOx-Prozess evaluieren soll.

Im Folgenden sollen die ersten PERC¹-Zellergebnisse vorgestellt werden. In diesem Experiment wurden sowohl die AlOx/SiNx Rückseitenschichten, als auch die ARC-SiNx-Schichten bei Manz in Karlstein abgeschieden. Auf eine Referenzbeschichtung am ISE wurde in dieser Charge zunächst verzichtet. Verglichen wurden sowohl Cappingnitride mit (Prozess 4) und ohne (Prozess 3) Nachverdichtung als auch verschiedene Solarzellenrückseiten. Um die Möglichkeiten einer Solarzellenprozessvereinfachung zu evaluieren, wurde die Auswirkung einer texturierten (text) Rückseite im Vergleich zu einer politurgeätzten (polish) Rückseite untersucht. Die multi- und monokristallinen Solarzellen wurden gemäß folgendem Prozessfluss hergestellt. Die mc-Basisohmigkeit betrug 1...2,5 Ohm cm, die Cz-Basisohmigkeit 1...3 Ohm cm.



Abbildung 46: Prozessfluss zur Herstellung kristalliner PERC-Siliciumsolarzellen.

¹ PERC: passivated emitter and rear cell: Solarzelle mit passiviertem Emitter und passivierter Rückseite

IV-Ergebnisse Cz

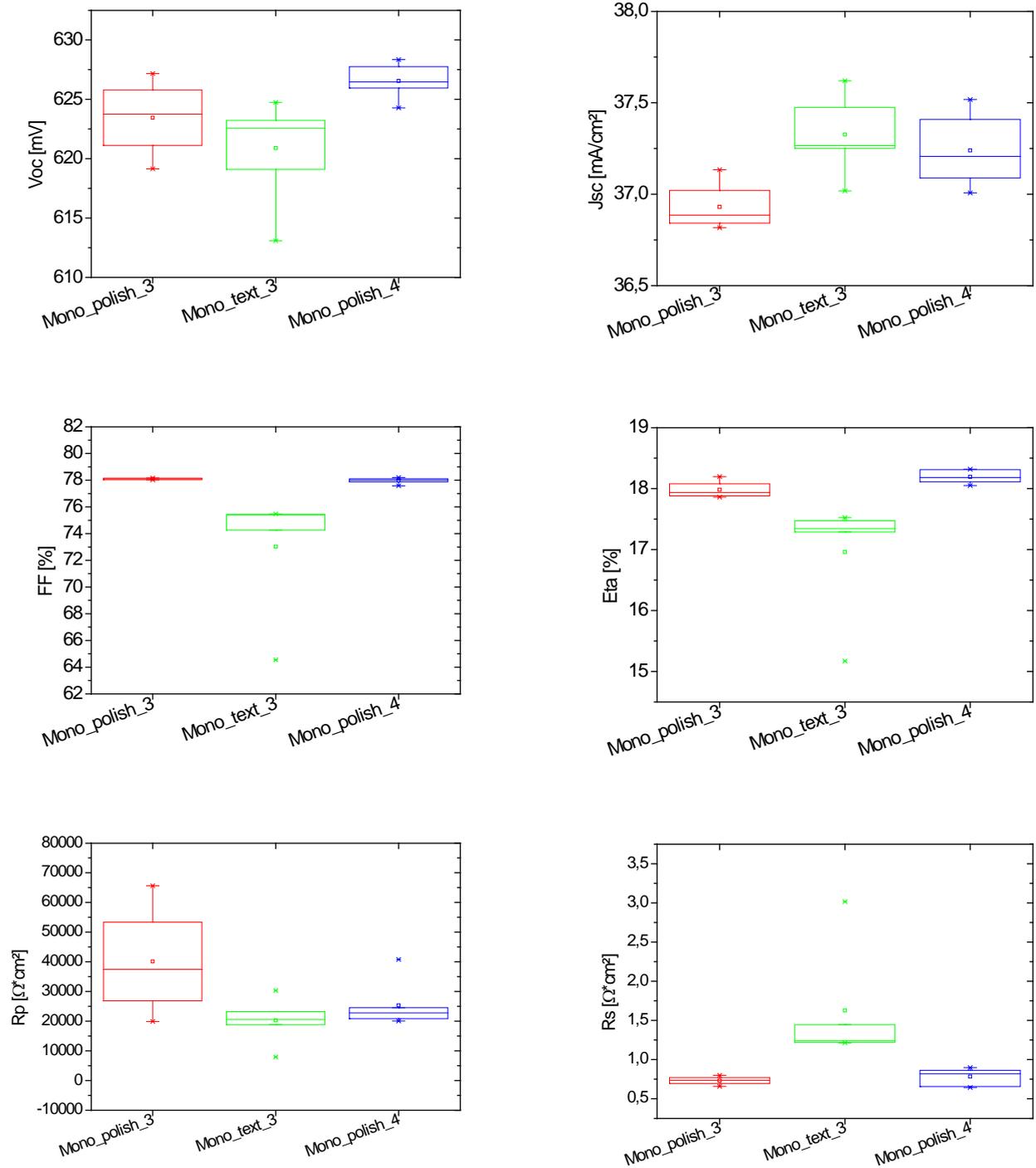


Abbildung 47: IV-Ergebnisse der Cz-Si-Solarzellen mit zwei verschiedenen Cappingnitriden und sowohl texturierter als auch polierter Rückseite

In der Teilcharge mit monokristallinem Cz-Siliciummaterial sollten zwei verschiedene Cappingnitride auf einer ca 10nm dicken AlO_x-Schicht untersucht werden. Prozess 3 ohne, Prozess 4 mit Nachverdichtung. Die Nachverdichtung scheint sich positiv auf die Leerlaufspannung Voc auszuwirken, dadurch zeigt sich auch im Zellwirkungsgrad hier ein leichter Vorteil gegenüber der Gruppe ohne Nachverdichtung. Außerdem wurde hier die Auswirkung einer texturierten im Vergleich zu einer politurgeätzten Rückseite untersucht. Hierbei zeigte die nachverdichtete Nitridschicht deutliche Vorteile, insbesondere in der Leerlaufspannung der Solarzelle. Dies deutet auf eine bessere Passivierungsqualität dieses Prozesses hin. Beim

Vergleich der texturierten gegenüber der polierten Rückseite ist die polierte Rückseite im Voc leicht im Vorteil. Als Grund hierfür ist die bessere Passivierung durch eine geringere zu passivierende Oberfläche zu vermuten. Im jsc ist die texturierte Rückseite im Vorteil, da eine bessere Ausnutzung des langwelligen Lichts in der Solarzelle ermöglicht wird. Die Serienwiderstände der Solarzellen mit texturierter Rückseite weisen allerdings deutlich höhere Werte auf, was darauf hindeuten könnte, dass der LFC-Kontaktierungsprozess für die texturierte Rückseite noch nicht optimal ausgelegt ist. Das wirkt sich insbesondere auf den Füllfaktor und somit auch auf die Zelleffizienz aus. Wenn diese Kontaktierungsprobleme gelöst werden können, besteht für die texturierte Rückseite durchaus Potential. Weitere Optimierungen und Variationen stehen hier allerdings noch aus und waren auch im ursprünglichen Projektplan auch noch nicht vorgesehen.

IV-Ergebnisse mc

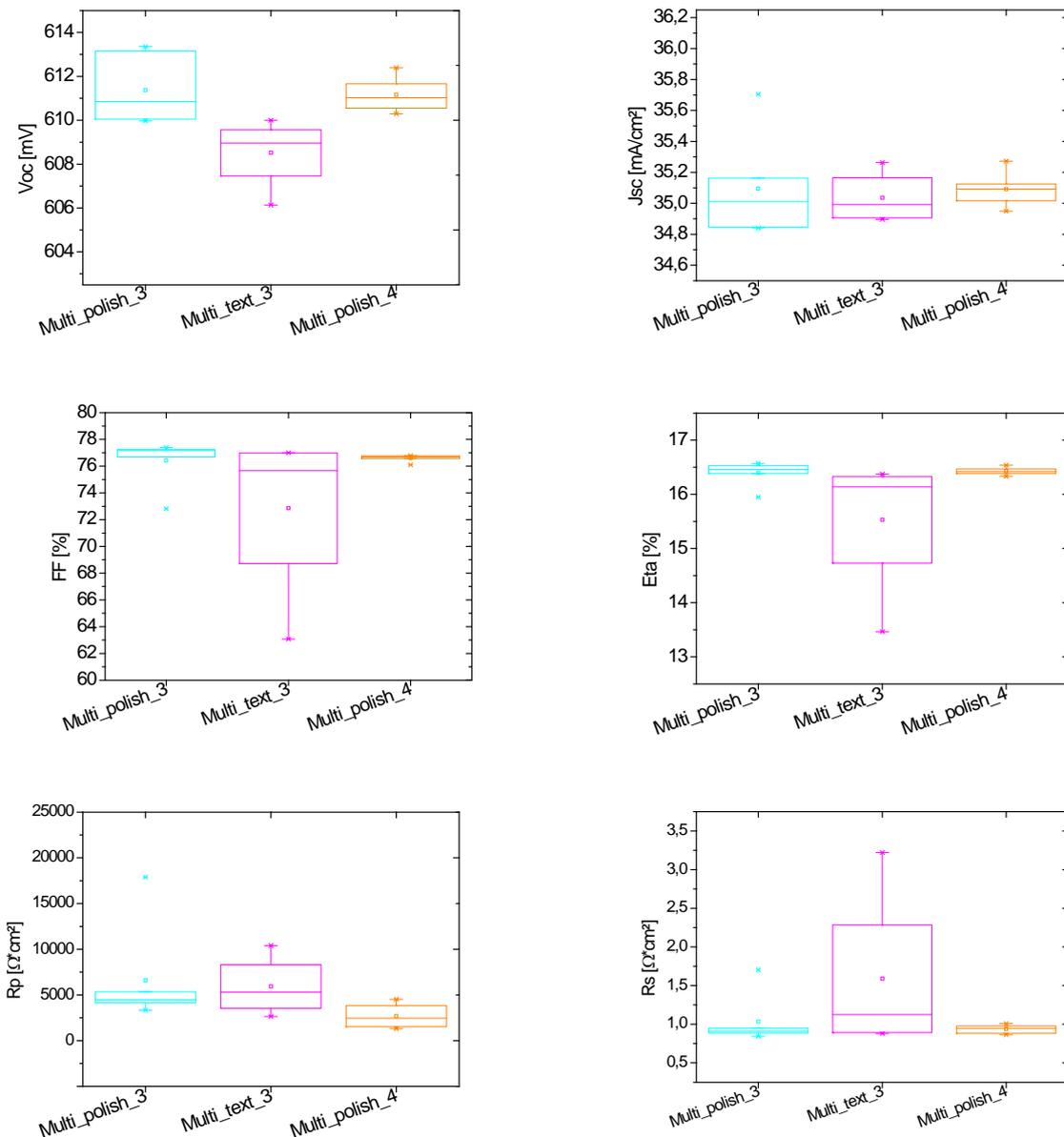


Abbildung 48: IV-Ergebnisse der mc-Si-Solarzellen mit zwei verschiedenen Cappingnitriden und sowohl texturierter als auch polierter Rückseite

Die prinzipiell gleichen Prozesse wie zuvor in dem Abschnitt für die Cz-Si-Teilcharge beschrieben, wurden auch für Solarzellen auf multikristallinem Siliciummaterial angewandt. Hier zeigen die beiden

Cappingnitride keinen wesentlichen Unterschied, jedoch scheinen auch hier die polierten Rückseiten, aus den vorher beschriebenen Gründen vorteilhaft zu sein.

IQE und Reflexionen

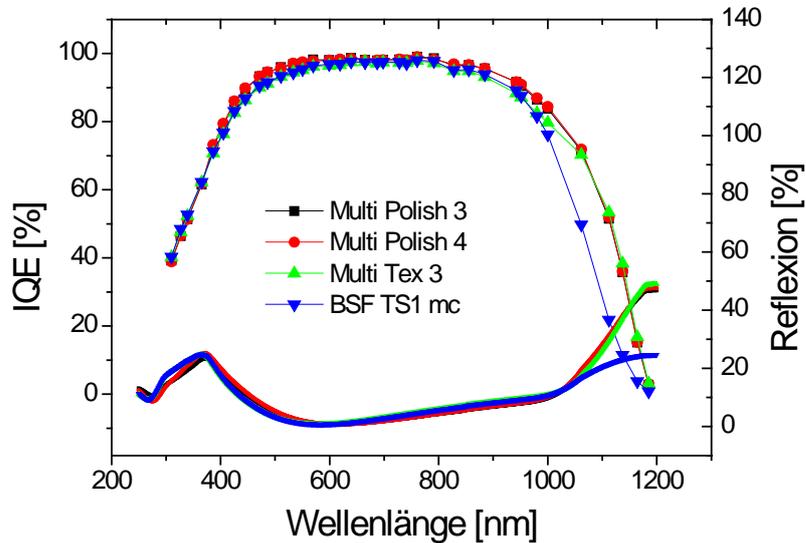


Abbildung 49: IQE-Analyse der mc-Si-Solarzellen mit zwei verschiedenen Cappingnitriden und sowohl texturierter als auch polierter Rückseite.

Die IQE-Analyse der multikristallinen Solarzellen zeigt erwartungsgemäß einen Vorteil gegenüber der Referenz mit Al-BSF im langwelligen, die Rückseite der Solarzelle repräsentierenden Bereich. Die Reflexionseigenschaften im langwelligen Bereich stellen den optischen Vorteil einer dielektrisch passivierten Zelle heraus. Leichte optische Vorteile ergeben sich für die texturierte Zelle (bei 1150-1200 nm). Vorteile in der Passivierungswirkung für die polierte Rückseite sind bei ca. 950-1000 nm zu sehen.

Entwicklung des AlOx-Beschichtungsprozesses am Teststand am Fraunhofer ISE

Nachdem die AlOx-Beschichtungsarbeiten zunächst nur am Teststand bei Manz starteten, wurde auch am PECVD-Teststand am Fraunhofer ISE mit den Arbeiten begonnen. Eine breite Parametervariation zur Optimierung und zum Erweitern des Prozessverständnisses des AlOx-Prozesses wurde durchgeführt. Es zeigte sich dabei, dass verschiedene Faktoren starken Einfluss sowohl auf die Schichtzusammensetzung (Brechungsindex) als auch auf die Schichtdicke und die Passivierungsgüte haben. Abbildung 50 zeigt hierbei beispielhaft verschiedene Abhängigkeiten von der Prozess Temperatur.

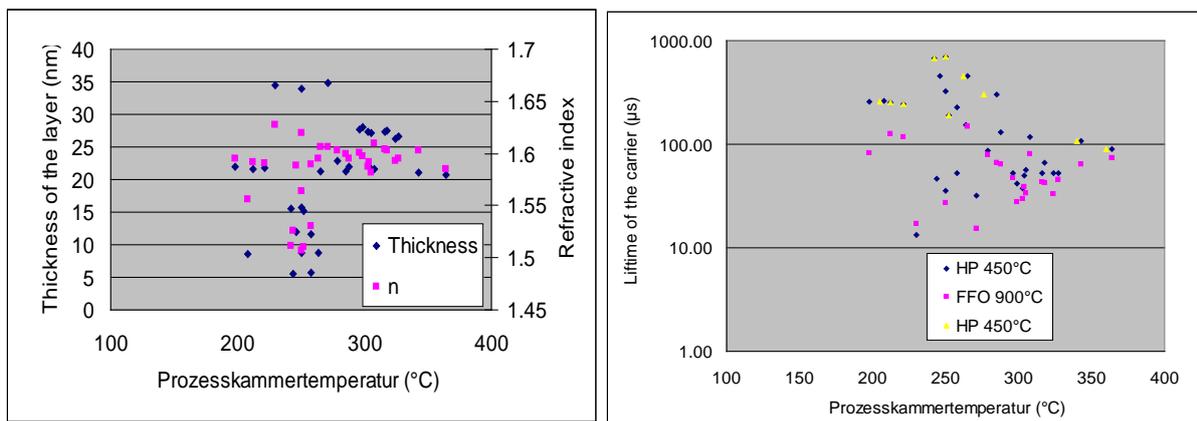


Abbildung 50: Abhängigkeit der Dicke und des Brechungsindex der AlOx-Schicht von der Prozesstemperatur (links) bzw. die Abhängigkeit der Passivierungsgüte (Ladungsträgerlebensdauer) von der Prozesstemperatur (rechts). FFO steht für eine Messung nach Feuern bei einer Spitzentemperatur von 900°C, HP für eine Messung nach Anneal bei 450°C.

In Abbildung 51 wird die Abhängigkeit unterschiedlicher Parameter vom Trimethylaluminium (TMAI) –Gasfluss untersucht. Es zeigte sich dabei eine direkte lineare Abhängigkeit der Schichtdicke von der Verfügbarkeit des TMAIs. Der Brechungsindex der AlOx-Schicht ist allerdings nicht in der gleichen Weise mit dem TMAI-Fluss verbunden. Bei geringen Schichtdicken herrschen geringere Brechungsindizes (1.5 bis 1.6) vor, wohingegen bei höheren TMAI-Flüssen die Brechungsindizes sich rund um 1.6 stabilisieren.

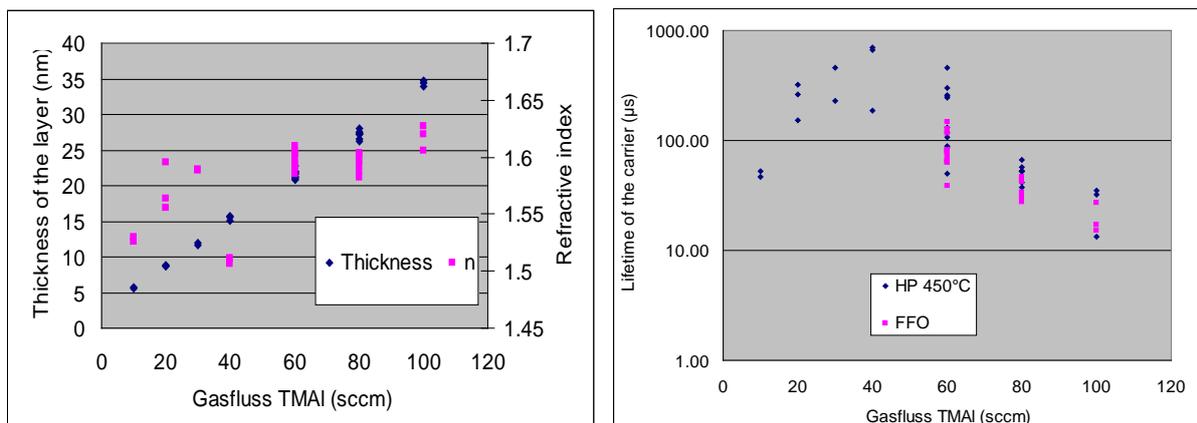


Abbildung 51: Abhängigkeit der Dicke und des Brechungsindex der AlOx-Schicht vom TMAI-Gasfluss (links) bzw. die Abhängigkeit der Passivierungsgüte vom TMAI-Gasfluss.

Es konnten hierbei Ladungsträgerlebensdauerwerte über 700µs nach Anneal erreicht werden, die bereits ein gutes Passivierungsniveau darstellen. Nach Feuern wurden Werte von bis zu 200µs erreicht. Für eine weitergehende Optimierung wären Umbauten an der Beschichtungsanlage nötig gewesen, die im Einvernehmen der Projektpartner nicht durchgeführt wurden.

Beschichtungsprozessentwicklung am Demonstrator der Manz AG in Karlstein

Mitte 2013 wurde im Einvernehmen der Projektpartner Manz und Fraunhofer ISE entschieden, dass die Beschichtungsprozessentwicklung an der PECVD-Anlage am Fraunhofer ISE eingestellt

wird. Stattdessen wurde der Fokus auf die gemeinsame Beschichtungsprozessentwicklung am Anlagenbestand bei der Manz AG in Karlstein gelegt.

Hierbei stand die Prozessentwicklung anhand des im Rahmen von FeinPass gebauten PECVD-Demonstrators im Vordergrund. Auf den Demonstrator wurden sowohl die Siliciumnitrid- (SiNx-) als auch die Aluminiumoxid- (AlOx-) Beschichtungsprozesse übertragen.

Am Fraunhofer ISE wurden dabei u.a. Untersuchungen der Beschichtungsqualität durchgeführt.

In Abbildung 52 sind als Beispiel zwei ladungsträgerlebensdauerkalibrierte Photolumineszenzbilder von kristallinen Siliciumwafern mit AlOx-Beschichtung dargestellt, die die Weiterentwicklung des Beschichtungsprozesses von einem mittleren zu einem exzellenten Passivierungsniveau dokumentieren.

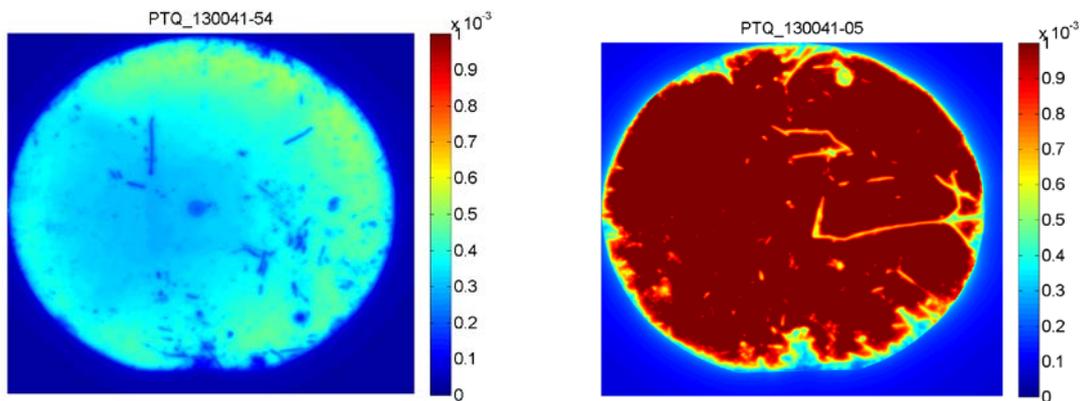


Abbildung 52: Lebensdauerkalibrierte Photolumineszenz-Bilder zweier unterschiedlich beschichteter kristalliner Silicium-Wafer. Der Al₂O₃-Beschichtungsprozess, der auf den linken Wafer angewandt wurde, führte zu einer mittleren Ladungsträgerlebensdauer von ca. 400 μs . Im rechten Bild sieht man das Lebensdauer-Ergebnis, das mit einer optimierten Beschichtungstechnologie erreicht werden konnte, mit großflächig einer Lebensdauer von >1 ms. Die kleinen Bereiche niedrigerer Lebensdauer sind vermutlich auf das händische Handling der Wafer mit Pinzetten vor der Beschichtung zurückzuführen. Das Handling der Wafer in einem industriellen Produktionsprozess würde noch separat optimiert werden (außerhalb von FeinPass).

Für die industrielle Produktion von PERC-Solarzellen (passivated emitter and rear cell) ist angedacht, wie bei den heutigen Standard-Solarzellen (Aluminium back-surface field – Al-BSF) zur rückseitigen Metallisierung und Kontaktierung eine Schicht aus Aluminium per Siebdruckverfahren aufzubringen. Bei dem anschließenden sogenannten Feuerprozess werden die Solarzellen zu ca. 800-850 °C geheizt.

Für die Funktion der rückseitigen Passivierungsschichten in PERC-Solarzellenstrukturen ist es daher wichtig, dass das Passivierungsschichtsystem als Sperrschicht gegenüber dem siebgedruckten Aluminium während des Feuerprozesses wirkt, in dem die Al-Schicht kurz in die flüssige Phase übergeht.

Das in FeinPass für die Rückseitenpassivierung verfolgte Schichtsystem aus AlOx und SiNx wurde in umfangreichen Untersuchungen Tests unterzogen, um die Einsetzbarkeit des Schichtsystems zu erkennen. Dabei wurden c-Si-Wafer einseitig mit AlOx / SiNx-Schichtstapeln beschichtet. Dann wurde per Siebdruck eine Aluminiumschicht darauf aufgebracht. Anschließend wurde dieses Probensystem gefeuert.

Daraufhin kamen 2 Charakterisierungsverfahren zum Einsatz.

Zunächst wurden die Wafer per Photolumineszenz (PL) untersucht. Hierbei zeigte sich keine signifikante Abhängigkeit des Messsignals von der Beschichtung der Wafer. In Abbildung 53 ist eine beispielhafte PL-Untersuchung zu sehen.

Da die Wafer nur auf einer Seite gewollt beschichtet wurden, kann man im PL-Bild an den Rändern des Wafers den leichten Umgriff der Beschichtung auf die andere Waferseite erkennen (helle Strukturen). Es zeichnet sich dabei die periodische Struktur des Carriers ab. Über den gesamten Wafer ist im PL-Bild ein Kreuz zu sehen, das ebenfalls mit der Carriergeometrie zusammenhängt.

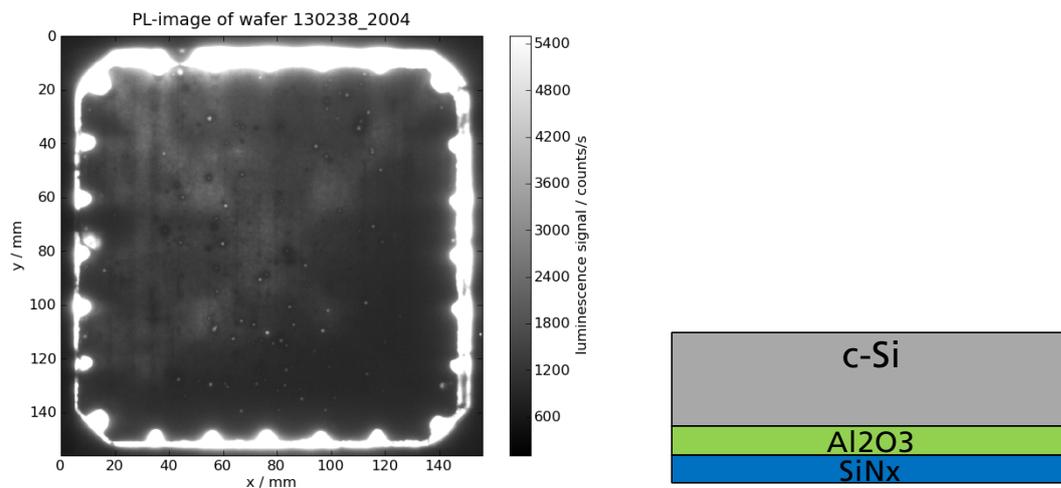


Abbildung 53: Links: Photolumineszenz-Bild eines c-Si-Wafers, der einseitig mit einem AlOx/SiNx-Stapel aus dem Demonstrator und einer Siebdruck-Al-Schicht beschichtet ist (Aufsicht). Rechts ist die Probenstruktur schematisch von der Seite dargestellt.

Anschließend wurden die Wafer auf der (nahezu) unbeschichteten Seite mit Al bedampft, getempert und anschließend in kleine Stücke zerschnitten.

Der elektrische Durchleitungswiderstand von der einen Al-Schicht zur Al-Schicht auf der anderen Seite des Waferstücks ist nun ein Maß für die Sperreigenschaften des AlOx/SiNx-Stapels.

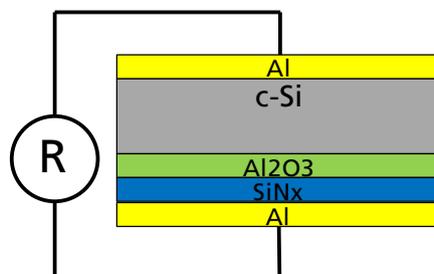


Abbildung 54: Probenstruktur zur Untersuchung der Sperreigenschaften des AlOx/SiNx-Stapels.

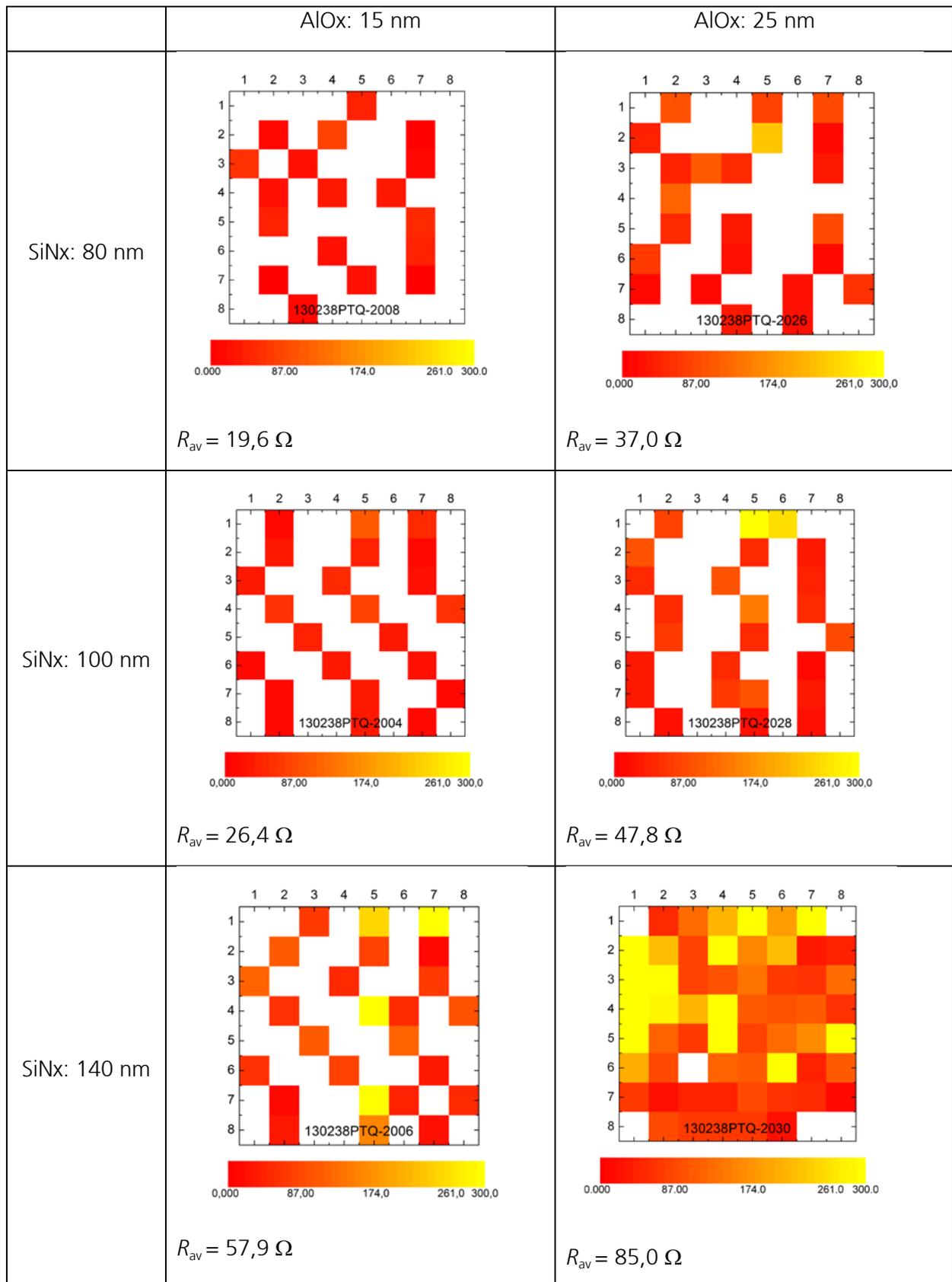


Abbildung 55: Mapping des elektrischen Durchleitungswiderstands durch die Probenstruktur. Der Widerstand ist im Wesentlichen durch das Dielektrikum AIOx / SiNx bestimmt. Hier sind Beispielmessungen dargestellt, die im Wesentlichen zeigen, dass der Durchleitungswiderstand deutlich signifikant von der Schichtdicke abhängt – mit steigendem Widerstand bei größerer Schichtdicke. Es wurde erwartet, dass eine Variation der Plasmaleistung der SiNx-Schicht einen Einfluss hat, da dichtere Schichten mit höherer Plasmaleistung zu erwarten waren. Ein signifikanter Einfluss auf die Widerstandswerte konnte aber nicht detektiert werden.

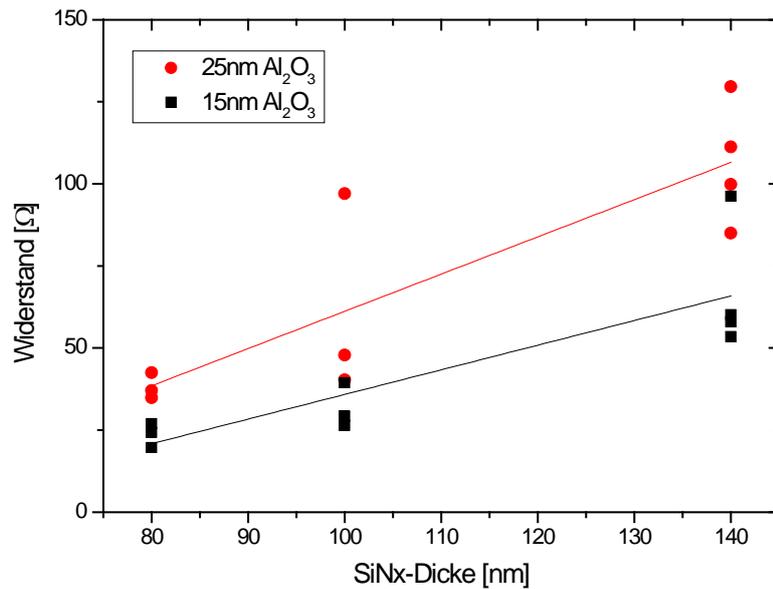


Abbildung 56: Übersicht zum Zusammenhang Widerstand / SiNx-Dicke. Ein klarer Vorteil dickerer SiNx-Schichten ist für den untersuchten Dickenbereich zu sehen.

In vielfältigen Experimenten wurde der Einfluss unterschiedlicher PECVD-Prozessparameter auf die Schichteigenschaften wie bspw. die Feuerstabilität untersucht. Dabei wurden sowohl PL-, als auch QSSPC- und COCOS-Messungen (kombinierte Corona-Ladungs- + SPV-Messungen → kontaktlose CV-Messungen) durchgeführt. In diesem Bericht werden diese nur auszugsweise und beispielhaft dargestellt.

In einer ersten Versuchsreihe wurde der Einfluss der Beschichtungstemperatur untersucht. Dabei konnte kein signifikanter Einfluss der Temperatur im untersuchten Bereich 200-280°C festgestellt werden. Für alle Proben nahm die Lebensdauer durch den Feuerprozess ab. Beispielhaft sind in Abbildung 57 und Abbildung 58 die Ergebnisse für 2 Wafer dargestellt.

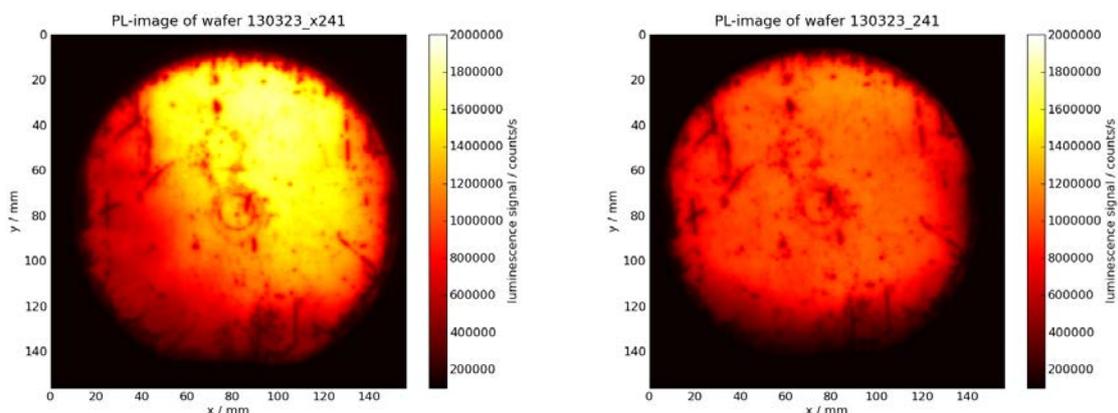


Abbildung 57: PL-Bilder (nicht lebensdauerkalibriert) eines Wafers vor (links, im Mittel ca. 620μs, annealed) und nach dem Feuerprozess (rechts, ca. 500μs). Die hierbei verwendete Abscheidetemperatur betrug 200°C.

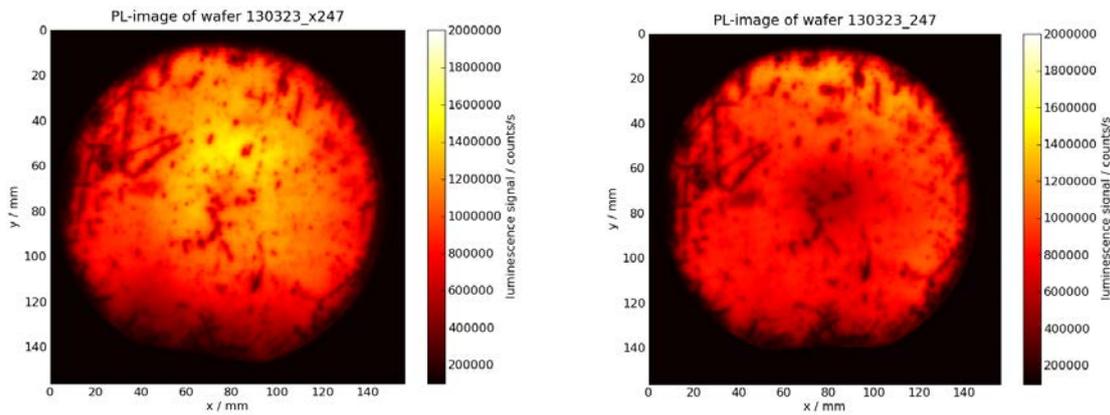


Abbildung 58: PL-Bilder (nicht lebensdauerkalibriert) eines Wafers vor (links, ca. 580µs, annealed) und nach dem Feuerprozess (rechts, ca. 460µs). Die hierbei verwendete Abscheidetemperatur betrug 280°C.

Die SiNx- und AlOx-Beschichtung wird im PECVD-Demonstrator immer im Wechsel für die Rückseitenpassivierung durchgeführt.

Zur Optimierung der Prozess- bzw. Zykluszeit (d.h. des Maschinendurchsatzes) ist es von Vorteil, wenn zwischen SiNx- der ersten und AlOx-Beschichtung des nachfolgenden Wafers ein Gasspülprozess entfallen kann. Dazu wurde untersucht, ob die Ladungsträgerlebensdauer dadurch in Mitleidenschaft gezogen wird. Auch sehr kritisch wäre es, wenn durch die Vermischung der AlOx-Gase mit Rest-SiNx-Gasen eine positiv geladene Schicht entstehen würde, die die Vorteile der negativen Ladungen der reinen AlOx-Schicht teilweise zunichtemachen würde. Diese Punkte wurden in PL-, QSSPC- und COCOS-Untersuchungen evaluiert.

In allen untersuchten Fällen konnte Entwarnung gemeldet werden. Es wurden durchweg Dichten im Bereich 1 bis $6 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ der negativen Ladungen gemessen.

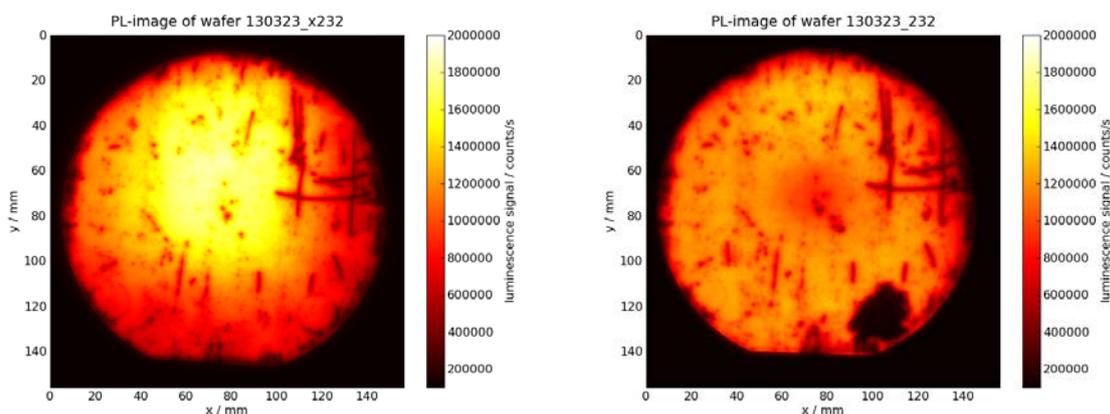


Abbildung 59: PL-Bilder (nicht lebensdauerkalibriert) eines Wafers vor (links, ca. 700µs, annealed) und nach dem Feuerprozess (rechts, ca. 590µs). Die dunkle Stelle rechts unten im rechten Bild zeigt den Bereich, an dem ein Teil der Passivierungsschicht entfernt werden musste, um von der Rückseite des Wafers Kontakt zur c-Si-Basis für die COCOS-Messung zu erhalten.

Im weiteren Verlauf der Arbeiten wurde eine Untersuchung zur Abhängigkeit der Passivierungsqualität von der Oberflächentopographie durchgeführt. Der Versuchsplan vor der Beschichtung, dem Feuern und dem Messen ist in Abbildung 60 dargestellt.

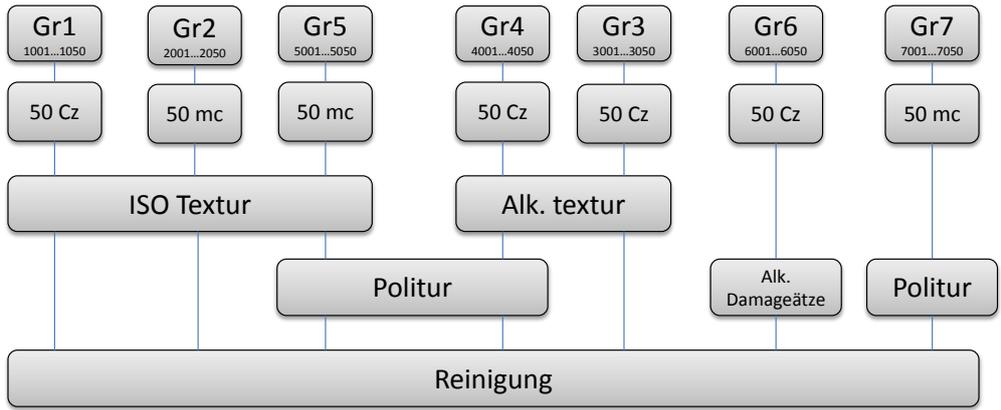


Abbildung 60: Versuchsplan ohne nachfolgend durchgeführter Beschichtung, Feuern und Messen.

Auf CZ-Wafern ergab sich ein leichter Vorteil für ein dünneres AlOx. Auf mc-Si-Wafern ist kein erkennbarer Trend wahrnehmbar. Siehe Abbildung 61.

Es wurden sehr gute Passivierungsgüten (Lebensdauern) sowohl für mc-Si- als auch für Cz-Si-Wafer erreicht, die keine Limitierung der Effizienz heutiger PERC-Solarzellen erwarten lassen.

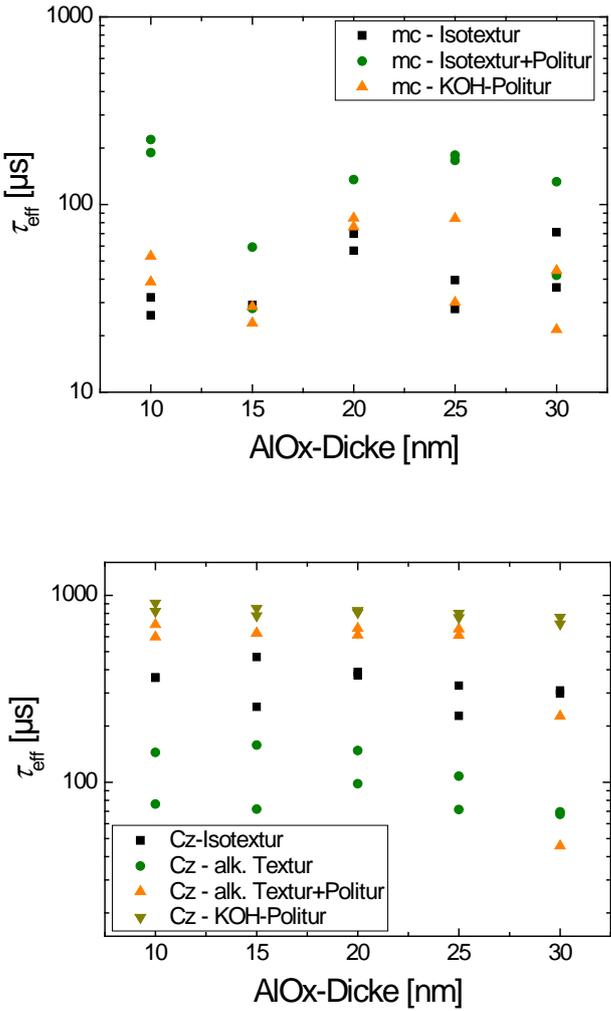


Abbildung 61: Lebensdauer-Ergebnisse in Abhängigkeit der AlOx-Dicke und der Waferoberflächentopographie. Oben: mc-Si-Wafer, unten: CZ-Si-Wafer.

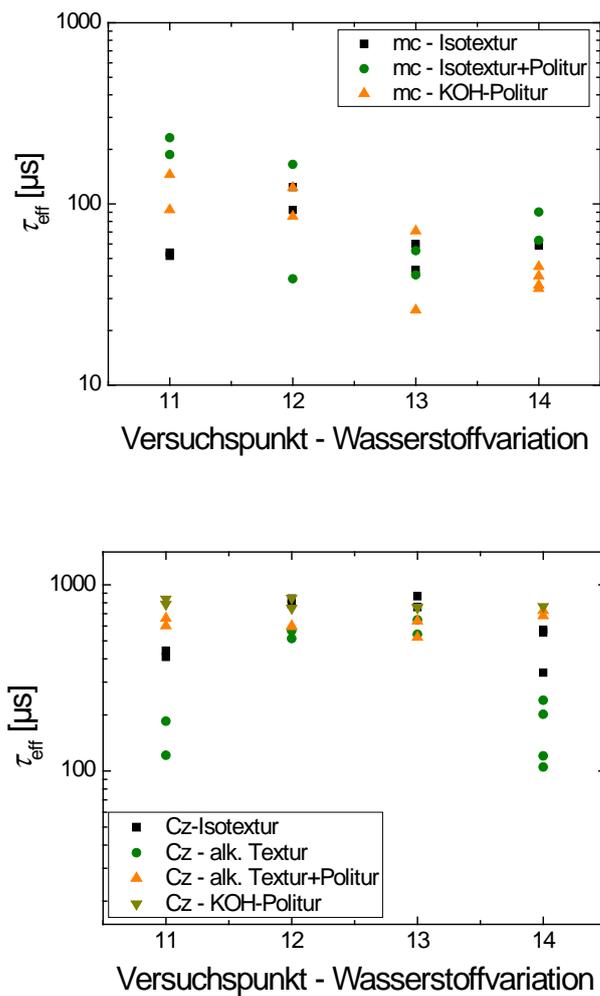


Abbildung 62: Lebensdauer-Ergebnisse in Abhängigkeit der Versuchspunkte zur Variation der Wasserstoffkonzentration im Gesamtgasfluss und der Waferoberflächentopographie. Oben: mc-Si-Wafer, unten: CZ-Si-Wafer.

Darüber hinaus wurden noch weitergehende Untersuchungen der AlOx/SiNx -Beschichtung durchgeführt und dabei die Abhängigkeit zum Feuerprozess und anhand der Ladungsträgerlebensdauer, des PL-Signals und der Ladungsdichte Q_{tot} und der Grenzflächenzustandsdichte D_{it} untersucht.

Zunächst lag der Fokus auf der Demonstration und Weiterentwicklung der Qualität der Passivierungsschichten.

Abbildung 63 zeigt den Ablauf der Prozesse zur Herstellung der PERC-Solarzellen dieser Charge. Es wurden Rückseiten-Beschichtungen ($\text{AlOx} / \text{SiNx}$) am Demonstrator bei Manz in Karlstein mit dem Referenzprozess am ISE verglichen.



Abbildung 63: Solarzellen-Herstellungsprozessablauf der Charge 130201.

Abbildung 64 zeigt einen beispielhaften Überblick zu Photolumineszenz-Bildern nach dem Feuern der Solarzellen und nach der Rückseiten-Kontaktausbildung (laser-gefeuerte Kontakt (LFC) am ISE). Man erkennt eine inhomogene Performance-Verteilung für alle Solarzellen, sowohl vor als auch nach dem LFC-Prozess. Die Struktur des Lumineszenz-Signals ändert sich für die Solarzellen nach dem LFC-Prozess nicht, nur das Niveau des Lumineszenz-Signals wird geringer, was durch das homogene Einbringen der Kontakte zu erwarten ist.

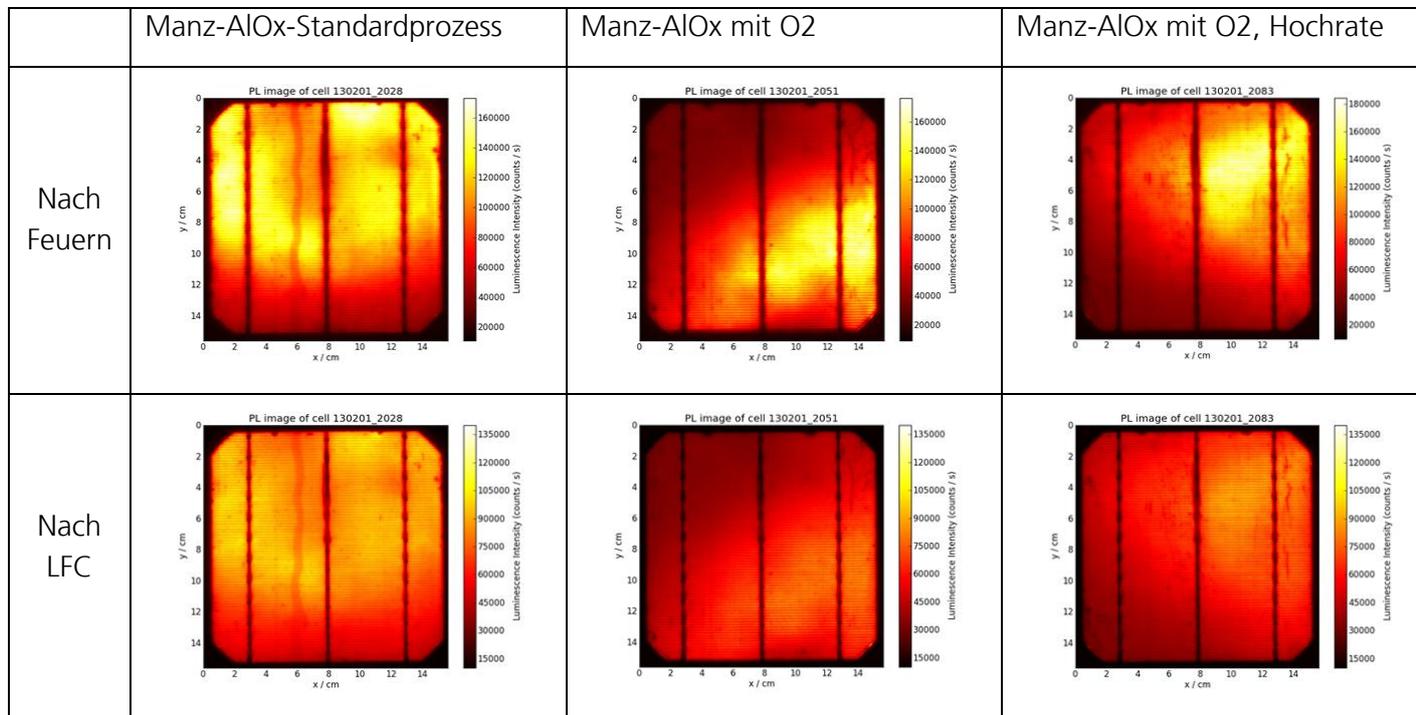


Abbildung 64: Photolumineszenz-Bilder nach Feuern und nach Rückseiten-Kontaktausbildung (Laser-fired contacts LFC) für unterschiedliche AlOx/SiNx-Stacks.

Die finalisierten Solarzellen wurden u.a. mittels Hell-IV-Messungen charakterisiert (Abbildung 65). Sowohl in der Leerlauf-Spannung, als auch im Kurzschlussstrom und im Füllfaktor zeigt sich

im Mittel ein Vorteil für die Solarzellen mit ISE-Referenz-Passivierung. D.h., die Solarzellen mit der FeinPass-Passivierung zeigen noch kein ausreichend homogenes Bild auf hohem Performance-Niveau.

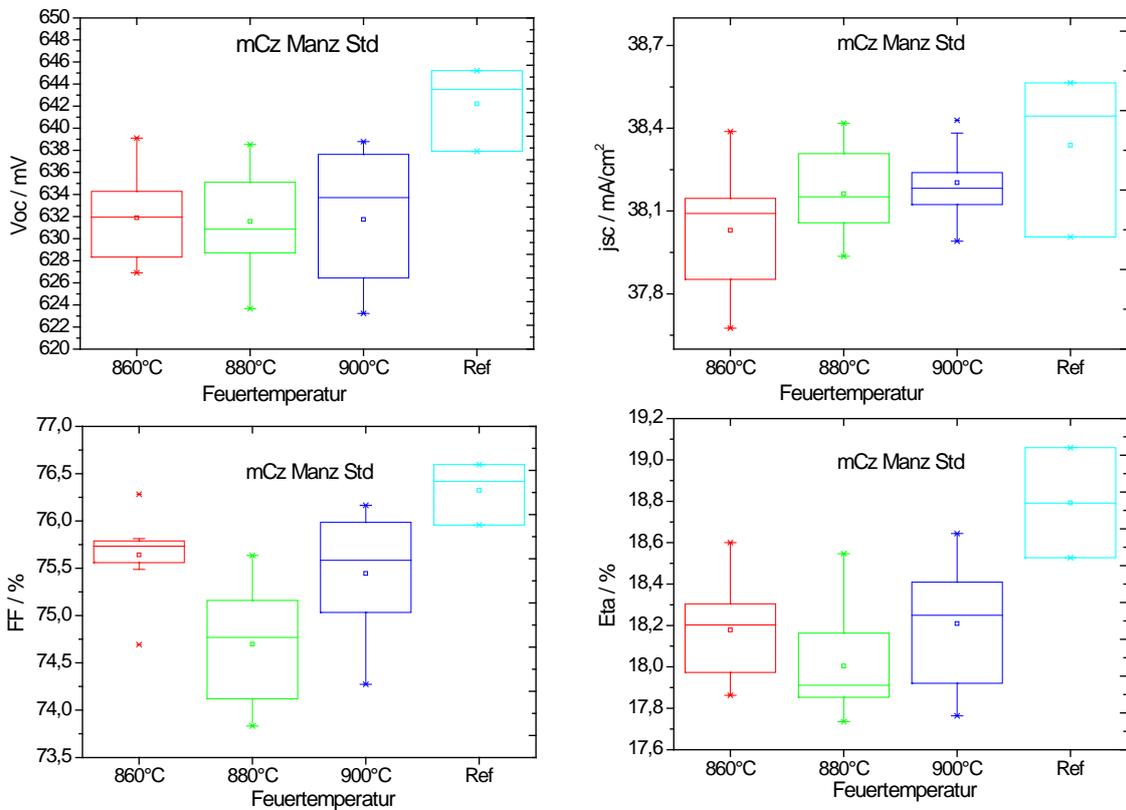


Abbildung 65: Solarzellen-IV-Messergebnisse zum Vergleich des Manz-Standard-AlOx/SiNx-Stacks bei unterschiedlichen Feuertemperaturen mit dem ISE-Referenz-AlOx/SiNx-Passivierungsprozess. Insbesondere in der Offene-Klemmen-Spannung Voc erkennt man noch einen Vorteil für den ISE-Referenzprozess, der sich auch in der Gesamteffizienz der Solarzellen (Eta) niederschlägt.

Zur weiteren Untersuchung der FeinPass- im Vergleich zur ISE-Referenz-Rückseitenpassivierung wurden exemplarisch interne Quanteneffizienz-Messungen durchgeführt, die in Abbildung 66 zeigen, dass ein vergleichbares Niveau der Rückseitenpassivierung für die untersuchten Solarzellen mit Feinpass- und ISE-Referenz-Passivierung erreicht wurde (im langwelligen Wellenlängenbereich).

Vorteilhaft für AlOx/ SiNx-Passivierungsstapel im Vergleich zu allen anderen gängigen Schichtsystemen ist in diesem Zusammenhang die hohe Stabilität der Passivierungswirkung, die eine hohe Performance auch bei niedrigen Einstrahlungstärken erlaubt (Abbildung 67).

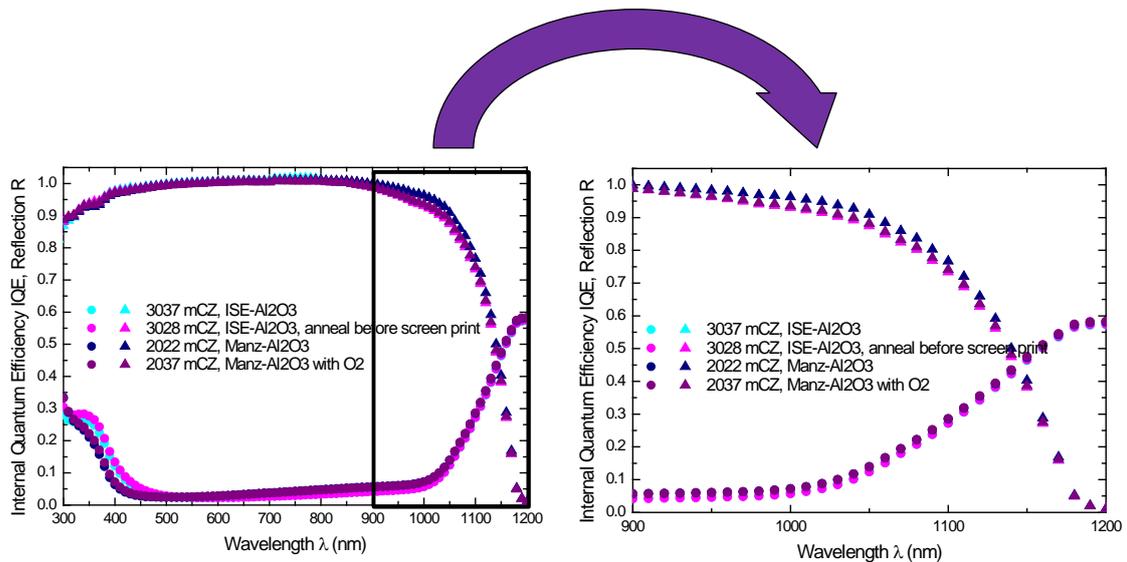


Abbildung 66: Solarzellen-Messergebnisse der internen Quanteneffizienz abhängig von der Wellenlänge zum Vergleich des Manz-AlOx/SiNx-Stacks mit dem ISE-Referenz-AlOx/SiNx-Passivierungsprozess. Im Bereich großer Wellenlängen lässt sich die Performance der Rückseitenpassivierung vergleichen. ISE-Referenz- und Manz-Passivierung liegen hier etwa gleichauf. Auch die interne Rückseitenreflexion lässt sich im langwelligen Bereich beobachten. Diese liegt ebenfalls etwa gleichauf.

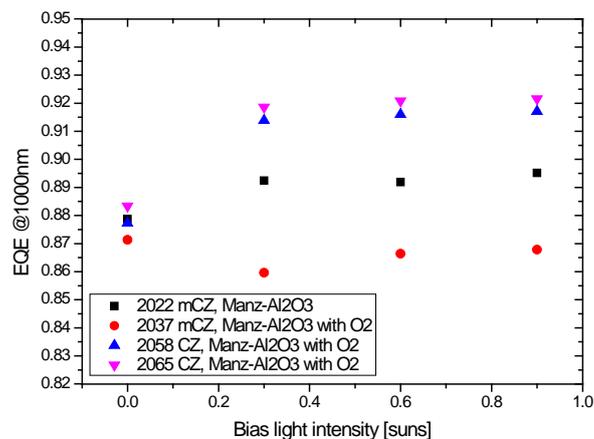


Abbildung 67: Solarzellen-Messergebnisse der externen Quanteneffizienz bei 1000nm Lichtwellenlänge abhängig von der Intensität der zusätzlichen Weißlichtbeleuchtung. Die Manz-AlOx/SiNx-Stacks zeigen relativ stabile Performance auch bei niedrigen Lichtintensitäten. Dies ist eine generelle vorteilhafte Eigenschaft von AlOx-Schichten auf p-Typ-c-Si-Solarzellen.

AP B4 Integration der Prozesse zur Herstellung industrieller PERC Solarzellen

mit den Unter-Arbeitspaketen

AP B4.1 Integration der Passivierung mit einer Laser-Rückkontaktöffnung und

AP B4.2 Realisierung eines PERC-Prozesses:

Durch den Ausstieg von Schott Solar aus dem FeinPass-Projekt sind die Möglichkeiten zur industriellen Herstellung von PERC-Solarzellen im Rahmen des Projekts leider erloschen. SolarWorld Innovations konnte wie das ISE einen Teil der Aufgaben übernehmen, jedoch war eine Herstellung größerer, industrierelevanter Solarzellenmengen leider nicht möglich.

Technische Teilziele PECVD

- **BM1 (nach 12 Monaten):** Der Demonstrator des PECVD-Prozessmoduls (PPM) soll mit einem Durchsatz von >500 Wafern pro Stunde arbeiten.

Im ursprünglichen Förderantrag wurde ein Durchsatz von 900 W/h für eine typische SiNx-Antireflexschicht angestrebt, im Halbzeitmeilenstein wurde ein Mindestdurchsatz von 500 W/h verlangt. Mit den mittlerweile erzielten Abscheideraten von über 5 nm/s ist sogar ein Durchsatz von über 1200 Wafern pro Stunde realisierbar. Begrenzend für den Durchsatz des Demonstrators sind derzeit Komponenten wie das Vakuumsystem und mechanische Handhabungseinheiten. Das im Projektplan und im Meilenstein gesetzte Durchsatzziel von 500 W/h, bzw. 900 W/h wird damit deutlich übertroffen.

- **BM2 (nach 15 Monaten):** Optimierung und Evaluation der Frontseitenpassivierung soll abgeschlossen sein und einen zum Referenzprozess vergleichbaren oder besseren Wirkungsgrad nachweisen.

Mit dem anfänglichen Verbundpartner Schott Solar wurde bereits im Juli 2012 eine Versuchsreihe abgeschlossen, die für die Manz Antireflexschicht sowohl auf mono- als auch auf multikristallinem Silizium vergleichbare oder sogar leicht bessere Wirkungsgrade zeigte (siehe Abschnitt B2.3). Nach dem Ausscheiden von Schott Solar wurden drei weitere Versuchsreihen mit dem neuen assoziierten Partner SolarWorld Innovations durchgeführt. Das dabei zunächst auftretende Defizit zur Vergleichsgruppe konnte durch geeignete Optimierung der Schichtparameter beglichen werden, so dass der letzte Vergleichstest im August 2013 ebenfalls vergleichbare Effizienzen mit teilweise sogar leichtem Vorteil lieferte (siehe Abschnitt B3.3).

Abschließend kann mit den Ergebnissen von Schott Solar und SWIN das Ziel des Halbzeitmeilensteins, nämlich die Erreichung eines zu einer industrierelevanten Referenz vergleichbaren oder besseren Wirkungsgrades, als erfüllt betrachtet werden.

- **BM3 (nach 21 Monaten):** Konzept für eine Rückseitenpassivierung bestehend aus Material (-Kombination) und Schichtstruktur ist festgelegt. Wirkungsgradsteigerung gegenüber Standardzellen mit vollflächigem Al-BSF um 0,5 %.

Mit der Entwicklung des Al₂O₃/SiNx-Stapels zur Rückseitenpassivierung konnte eine Wirkungsgradsteigerung von über 0.5% gegenüber Standard-Al-BSF Zellen gezeigt werden. Zu Projektbeginn lag die durchschnittliche Al-BSF-Zelle des Fraunhofer ISE bei ~17.5%. Im letzten Run (siehe Abbildung 20) liegen die LFC-Gruppen mit Manz Passivierung deutlich über 18.0%, damit ist das technische Ziel erreicht.

- **BM4 (nach 27 Monaten):** Die Rückseitenpassivierten Zellen wurden in Modulen nach IEC 61215 qualifiziert.

Die Qualifizierung auf Modulebene hätte durch Schott erfolgen müssen. Nach dem Ausstieg von Schott Solar wurde dieses technische Teilziel deaktiviert.

- **BM5 (nach 36 Monaten):** Qualifizierung des PERC-Prozesses und Nachweis einer Wirkungsgradsteigerung um 0,5% sowie einer Senkung der Herstellkosten um 30% gegenüber dem Referenzprozess zu Prozessbeginn (Standard-Zelle).

Die Wirkungsgradsteigerung von über 0.5% gegenüber einer Standard-AI-BSF-Zelle wurde bereits zur Erreichung von BM3 nachgewiesen.

Über die Herstellkosten lassen sich keine exakten Aussagen treffen, da Schott Solar mittlerweile keine Solarzellen mehr produziert. Allgemein haben sich die Produktionskosten bereits massiv verringert, sodass davon auszugehen ist, dass zusätzlich mit der Einführung der auf die Anforderungen in der Photovoltaik optimierten und kostengünstigen VCS1200 die Herstellkosten gegenüber dem Referenzprozess zu Prozessbeginn im Jahr 2012 deutlich reduziert werden können.

1.3 Teilvorhaben Laserablation

A1 Prozessentwicklung Laser-Ablation

In Zusammenarbeit zwischen Manz und ISE wurde der Laser-Ablationsprozess bei Manz entwickelt. Dabei wurde die Anwendung der Laserprozesse zunächst an Teststrukturen erprobt, untersucht und schließlich anhand von Solarzellen weiter evaluiert. Die Zielstruktur war hierbei die PERC-Solarzellstruktur (passivated emitter and rear solar cell) [Bla89].

Wichtig für die Herstellung von PERC-Solarzellen ist das gute Zusammenspiel der einzelnen Herstellungsprozesse und der verwendeten Materialien. Der rückseitige Passivierungsschichtstapel aus Al₂O₃ und SiN_x muss sowohl eine sehr gute Passivierungswirkung nach der Solarzellenherstellung bereitstellen als auch als Schutz vor der darüber liegenden Metallschicht (meist siebgedrucktes Al) fungieren. Des Weiteren ist ihr Einsatz als optischer interner Rückseitenreflektor wichtig, um langwelliges Licht zurück in das Solarzellvolumen zu leiten. Der Laserablationsprozess formt nun kleinflächige lokale Öffnungen für die Kontakte der Al-Metallschicht zum Si-Substrat durch die nichtleitende Al₂O₃/SiN_x-Schicht. Hierbei ist es wichtig, dass die nah zu diesen Kontaktbereichen liegende Passivierung möglichst wenig beschädigt wird.

In einer ersten Solarzellencharge wurden PERC-Solarzellen hergestellt. Hierbei wurde der Fokus auf die Entwicklung des Laserablationsprozesses bei der Manz AG in Reutlingen gelegt. Am Fraunhofer ISE wurde dazu die Solarzellenprozessierung so weit vorbereitet, dass nach dem Versenden der Wafer an Manz nur der Laserablationsprozess außerhalb des ISEs stattfand (Abbildung 63).



Abbildung 68: Solarzellen-Herstellungsprozessablauf der Charge 130218. Alle Prozessschritte wurden am Fraunhofer ISE durchgeführt mit Ausnahme des Laserablationsprozesses, der bei der Manz AG in Reutlingen durchgeführt wurde und bei dem der Abstand (Pitch) der Ablationslinien variiert wurde. Es kam hierbei der ISE-Referenz-Beschichtungsprozess zum Einsatz.

Die ablatierten Oberflächen wurden am Fraunhofer ISE mittels eines konfokalen Mikroskops untersucht, dabei sowohl Lichtmikroskopbilder als auch Höhenprofile aufgenommen.

Es zeigte sich, dass der Ablationsprozess sehr homogen über dem gesamten Wafer angewandt wurde. In Abbildung 69 sieht man das Höhenprofil und die Lichtmikroskopaufnahme in der linken oberen Ecke eines Wafers dieser Charge. Beim Vergleich mit den gelaserten Linien in anderen Bereichen desselben Wafers zeigte sich, dass der Ablationsprozess sehr homogen ist, z.B. rechts unten auf demselben Wafer (Abbildung 70).

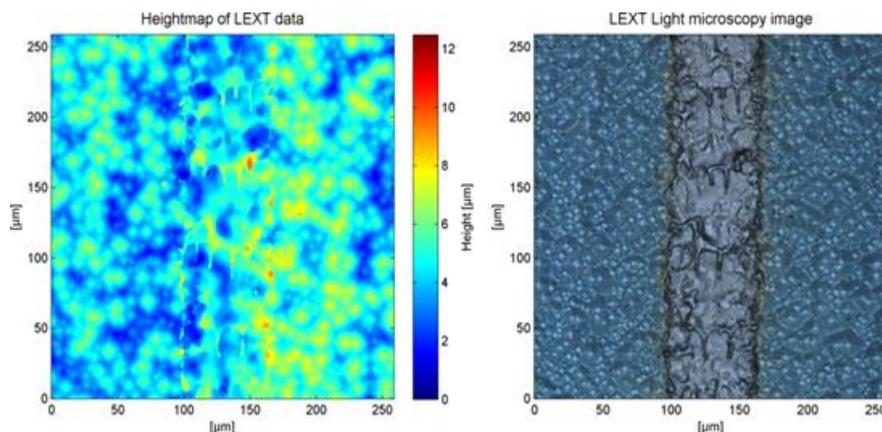


Abbildung 69: Lichtmikroskopaufnahme (rechts) und Höhenkarte (links) des linienförmigen laserablatierten Bereichs links oben auf einem Beispielwafer.

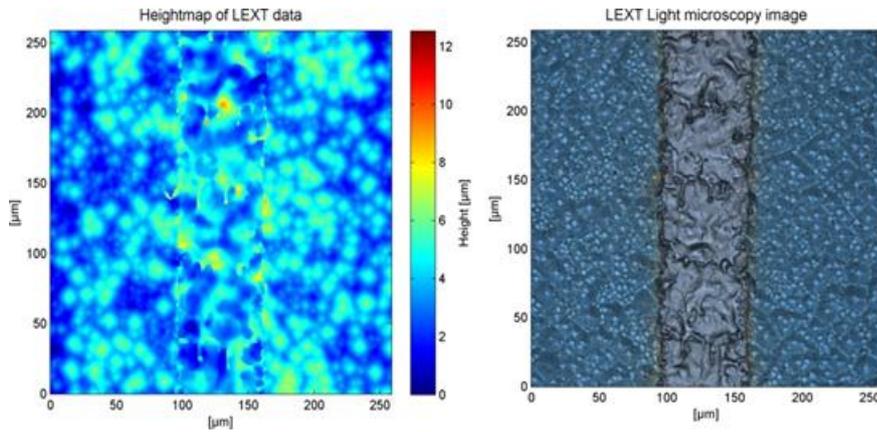


Abbildung 70: Lichtmikroskopaufnahme (rechts) und Höhenkarte (links) des linienförmigen laserablatierten Bereichs rechts unten auf einem Beispielwafer.

Die fertigen Solarzellen wurden ebenfalls einer IV-Charakterisierung unter Beleuchtung unterzogen (Abbildung 71). Der ermittelte Spitzen-Wirkungsgrad für diese Charge lag bei 19.6%. Der Ablationsprozess ist also bereits auf einem guten Niveau angesiedelt. Der Füllfaktor bricht bei zu großem Pitch ein, von ~78.5% auf ~77.5%. Ein Anstieg des Kurzschlussstroms mit Vergrößerung des Pitches konnte festgestellt werden bis zum Peakwert bei 1200 µm Pitch. Für das hier verwendete Si-Basismaterial liegt also das Optimum in diesem Prozessbereich.

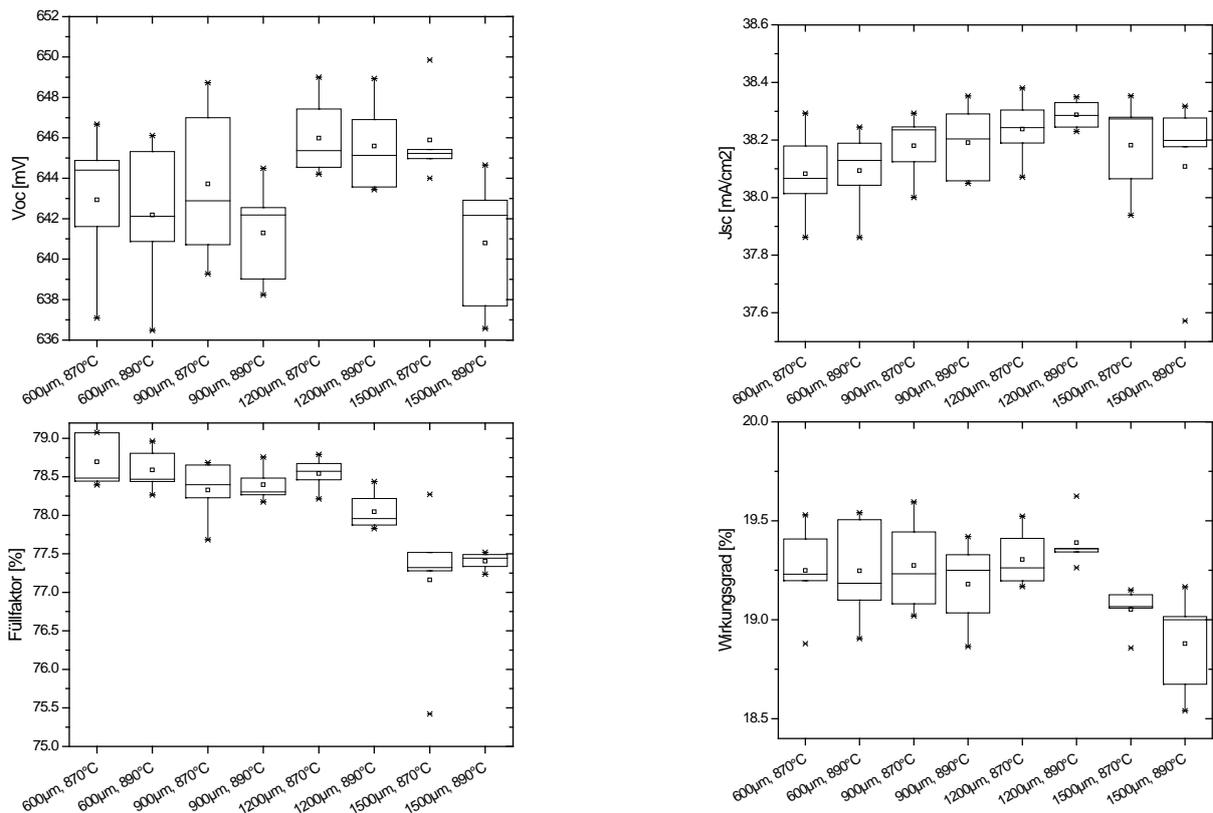


Abbildung 71: Solarzellen-IV-Messergebnisse zum Vergleich des Manz-Standard-AIOx/SiNx-Stacks bei unterschiedlichen Feuertemperaturen und in Abhängigkeit des Abstands der Rückseiten-Kontaktierungslinien.

Im zweiten Teil der Charge wurde ein Vergleich zwischen dem ps-Laserablationsprozess bei Manz und mehreren Prozessen zur Öffnung der Rückseitenpassivierung am ISE durchgeführt.

Am ISE kamen dabei sowohl ein ns-Laserprozess als auch ein Prozess zur chemischen Öffnung der Rückseitenkontaktflächen mittels Inkjet-Maskierung und nasschemischem Ätzen zum Einsatz.

In den IV-Messergebnissen (Abbildung 72) wird klar, dass der FeinPass-Passivierungsprozess gegenüber dem ISE-Referenzpassivierungsprozess aufgeholt hat. Die Leerlauf-Spannungen der ISE-Referenzpassivierung mit ps-Ablation und der FeinPass-Passivierung mit ps-Ablation erreichen ein ähnliches Niveau, mit leichtem Vorteil noch für die ISE-Referenz. Der Jsc der ps-Ablationsprozesse erreicht oder übertrifft die beste Zelle aus dem ersten Chargenteil. Der Füllfaktor zeigt im Vergleich zum ersten Chargenteil unterdurchschnittliche Ergebnisse. Die Gründe hierfür sind im Wesentlichen auf der Solarzellenvorderseite bei der Kontaktausbildung zu suchen. Dies führt zu Solarzelleneffizienzen bis 18.9%.

Es konnte gezeigt werden, dass mit dem ps-Ablationsprozess bei Manz in Reutlingen ein konkurrenzfähiger Prozess etabliert werden konnte, der als Basis für die weitere erfolgreiche Entwicklung des PERC-Solarzellen-Produktionsprozesses bei der Manz AG wertvoll sein wird.

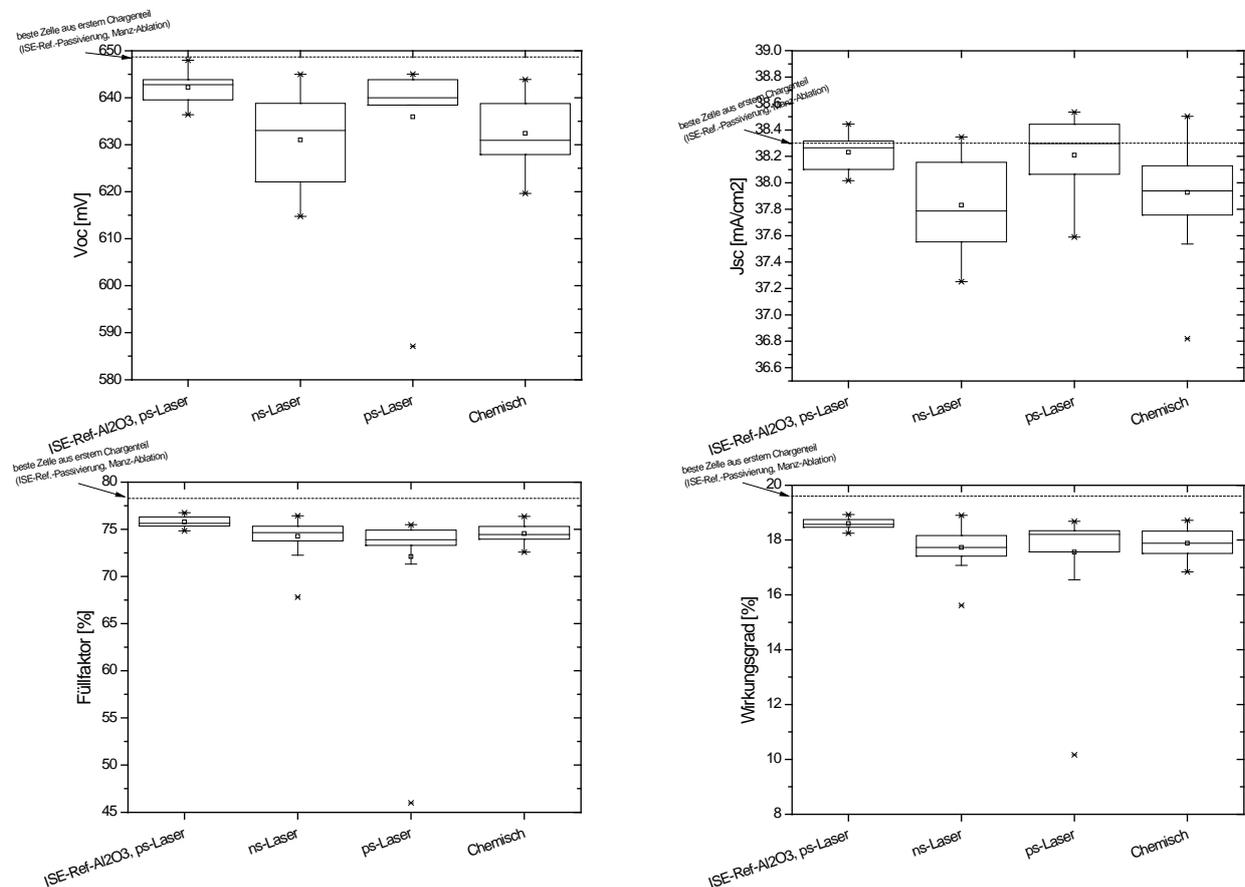


Abbildung 72: Solarzellen-IV-Messergebnisse zum Vergleich des Manz-ps-Laserablationsprozesses mit ns-Laserablacion am ISE und chemischer Kontaktöffnung mit vorangehender Inkjet-Abscheidung einer Ätzmaste.

Multikristalline (mc) Silicium-Solarzellen stellen weiterhin den Großteil des Weltmarkts dar, daher ist die Anpassung und Anwendung der PERC-Solarzellentechnologie ein wichtiger Schritt für die Kommerzialisierung der PECVD- und Laser-Anlagen dar.

Zu diesem Zweck wurde eine mc-Si-PERC-Solarzellencharge durchgeführt, die die in FeinPass entwickelten PECVD-Passivierungen und Laserablationsprozesse verbindet und mit

Standardprozessen am Fraunhofer ISE vergleicht. In Abbildung 73 ist der Ablaufplan der Charge dargestellt. Es fand ein Vergleich der Rückseitenpassivierung am Fraunhofer ISE und bei Manz statt. Des Weiteren wurden die Zellen teils bei Manz mit dem neuen Laserablationsprozess (LCO , Laser Contact Opening) in verschiedenen Prozessvarianten bearbeitet und teils am ISE mit dem Referenzprozess Laser-Fired Contacts (LFC).

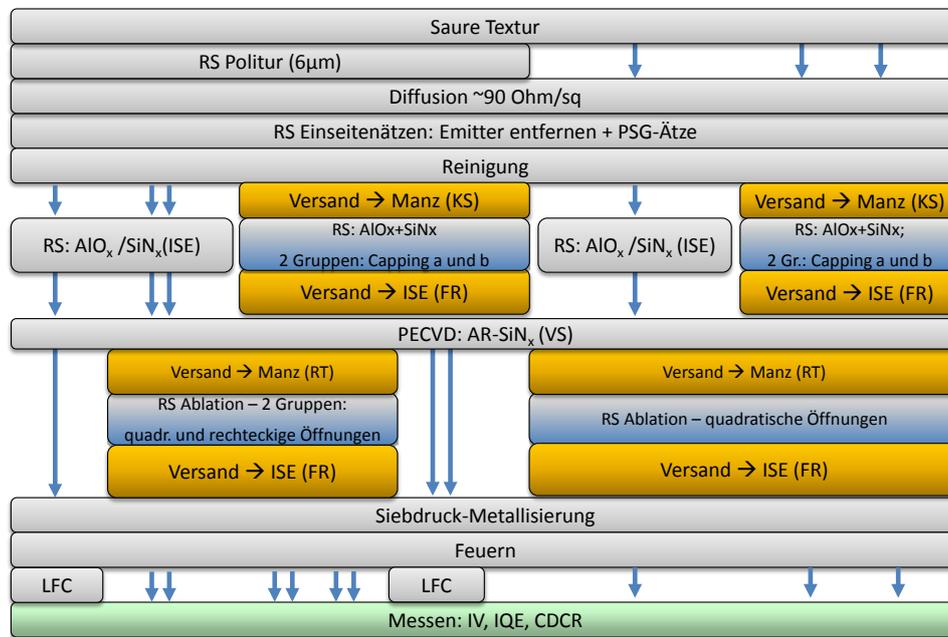


Abbildung 73: Ablaufplan der finalen mc-Si-PERC-Solarzellencharge mit Variation der PECVD-Passivierung und der rückseitigen Laser-Kontaktöffnungstechnologie.

In Abbildung 74 sind die Ergebnisse der Zellcharge zusammengefasst.

Es zeigte sich, dass mit dem LFC-Prozess derzeit noch die etwas besseren Solarzellen herstellbar waren. Dies betrifft sowohl die mit dem ISE-Referenzpassivierungsprozess bearbeiteten Solarzellen als auch die in Karlstein bei Manz beschichteten Zellen. Der Manz-PECVD-Prozess lässt hierbei erneut erkennen, dass er im Vergleich zur ISE-Referenzpassivierung gleichwertige Ergebnisse liefern kann. Daher kann auch ein negativer Einfluss des Transports der Wafer nach Karlstein ausgeschlossen werden. Die Wafer, die mit dem in FeinPass entwickelten Ablationsprozess bearbeitet wurden, wurden allerdings einem zusätzlichen Transport unterzogen im Vergleich zu den Wafern, die direkt nach der Beschichtung wieder ans ISE kamen zur Back-End-Prozessierung. Dies könnte evtl. einen negativen Einfluss auf die laserablatierten Zellen haben. Sehr wahrscheinlich erscheint dies aber nicht, da die PECVD-Beschichtung der wichtigste Schutz für die c-Si-Oberflächen darstellt.

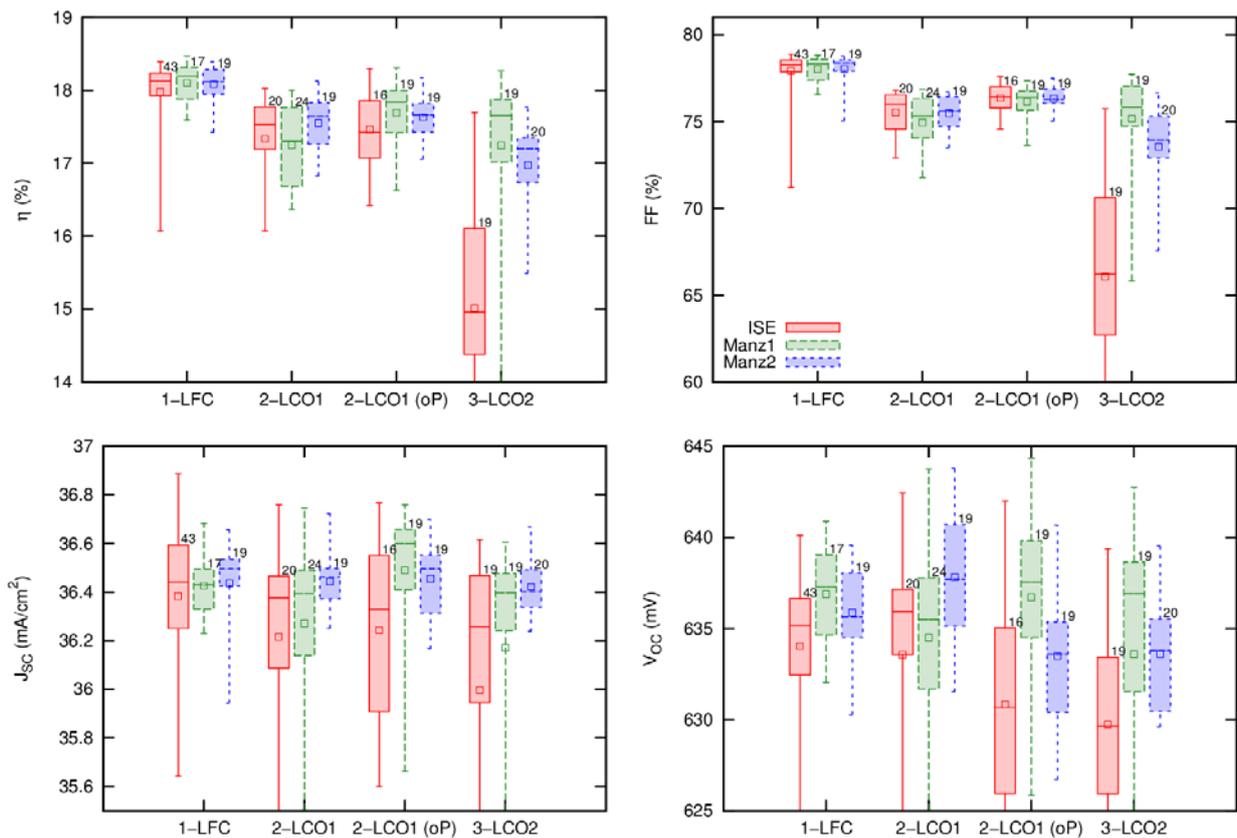


Abbildung 74: IV-Ergebnisse der mc-Si-PERC-Solarzellcharge. Hier wird die Rückseitenpassivierung und die Rückseitenkontaktierungstechnologie verglichen. Erklärung der Beschriftung: ISE = AlO_x und SiN_x am ISE abgeschieden (Referenzprozess), Manz1 / Manz2 = AlO_x und SiN_x mit in FeinPass entwickeltem PECVD-Prozess bei Manz abgeschieden (2 unterschiedliche Prozesse verwendet), LFC = lasergefeuerte Rückseitenkontakte am ISE (Referenzprozess), LCO1 / LCO2 = in FeinPass entwickelte Laserablationsprozesse bei Manz (unterschiedliche Prozessparameter), oP = ohne Politur der Rückseite.

Eindrucksvoll ist der Vergleich der Solarzellen mit und ohne Politur (oP) der Rückseite. Es erscheint von Kostengesichtspunkten her interessant und möglich, auf die Politur der Solarzellenrückseite mit den vorhandenen Methoden bei multikristallinen Solarzellen mit isotexturierten Oberflächen verzichten zu können.

In den V_{oc} -Werten kann man lesen, dass die ISE-Referenz-Passivierung von der FeinPass-Passivierung evtl. leicht übertroffen wird. Da sich dies aber noch innerhalb der Fehlerbalken abspielt, kann man dies noch nicht mit Gewissheit sagen.

Im Füllfaktor FF sind deutliche Unterschiede zwischen den Ablations- und dem LFC-Prozess zu sehen. Es zeigt sich ein deutlicher Vorteil für die LFC-Technologie. Bei genauerer Untersuchung musste man feststellen, dass dies noch mit einer inhomogenen Laserablation in Verbindung stand. Dieses Problem wurde in der Zwischenzeit behoben.

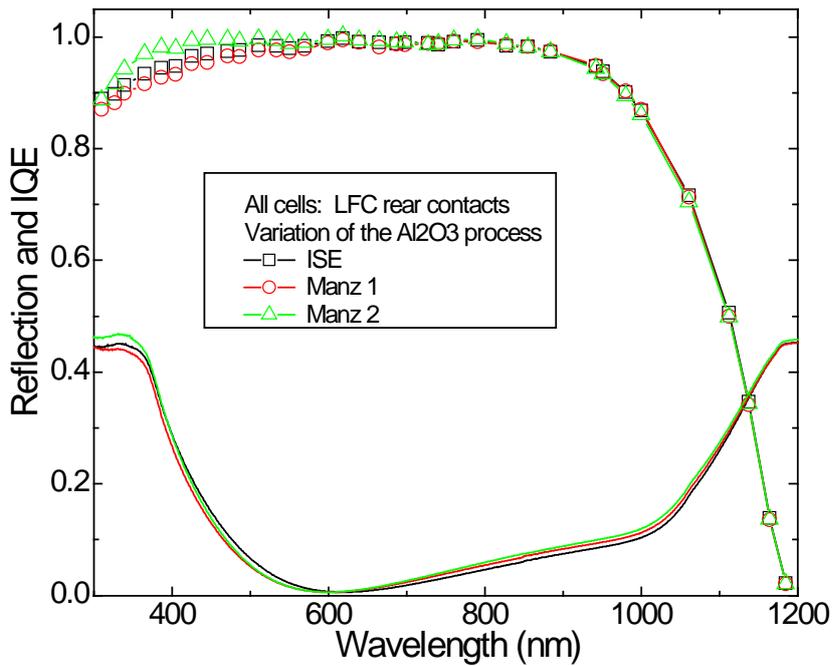


Abbildung 75: Interne Quanteneffizienz und Reflexionswerte der besten Zellen des Experiments mit LFC-Kontakten. Vergleich der unterschiedlichen RS-Passivierungstapel zeigt, dass die in FeinPass entwickelte Passivierungstechnologie auf Augenhöhe mit der Referenztechnologie ist (IQE und Reflexion im Bereich 900...1200nm).

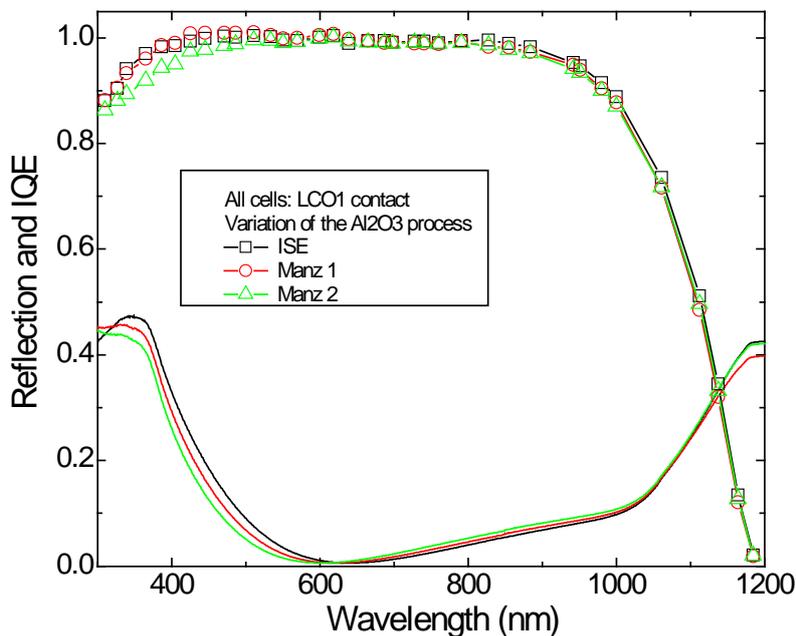


Abbildung 76: Interne Quanteneffizienz und Reflexionswerte der besten Zellen des Experiments mit LCO1-Kontakten. Vergleich der unterschiedlichen RS-Passivierungstapel zeigt, dass die in FeinPass entwickelte Passivierungstechnologie auf Augenhöhe mit der Referenztechnologie ist (IQE und Reflexion im Bereich 900...1200nm).

Die IQE und Reflexionsdaten zeigen im Bereich langwelliges Licht sehr ähnliche Werte für LFC- und LCO-kontaktierte Solarzellen und ebenfalls nur marginale Unterschiede zwischen Manz- und ISE-Passivierung (Al₂O₃/SiNx). Insofern kann man schließen mit der Erkenntnis, dass sowohl

PECVD- als auch Laserablationsprozesse, die in FeinPass entwickelt wurden, auf Augenhöhe mit den ISE-Referenztechnologien sind und somit für eine weitere kommerzielle Verwertung durch die Projektpartner unter Berücksichtigung weiter nötigen Finetunings sehr gut geeignet sind. Das Projekt kann somit als sehr erfolgreich bezeichnet werden.

Technische Teilziele/Meilensteine

AM1 Identifizierung eines $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiN}$ + Al-Paste Schichtsystems (ohne Laser Öffnung), das nach Feuern mit üblichen Feuerparametern eine Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeit kleiner als 50 cm/s liefert.

Die Arbeiten bei Manz ergaben Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeiten von minimal 11 cm/s. Damit wurde dieses Ziel erreicht.

AM2 Erzielen einer Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeit im kontaktierten Bereich kleiner als 500 cm/s mittels ns Laser-Prozess.

Die Arbeiten bei Manz erreichten Werte bis ca. 200 cm/s im kontaktierten Bereich. Hierbei wurde eine deutliche Abhängigkeit mit der Kontaktbreite bei linienförmigen Kontakten festgestellt. Breitere Kontakt erreichten meist geringere Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeiten.

AM3 Herstellung von mindestens einer Solarzellencharge mit ps- und ns-Laserablation.

Eine entsprechende Solarzellencharge wurde gemeinsam von ISE und Manz durchgeführt. Die Ergebnisse wurden im vorangegangenen Kapitel berichtet.

AM4 Nachweis der gleichen oder höheren Effizienz in Solarzellen mittels ns-Laserablation im Vergleich zur Referenz mit ps-Laserablation.

In der Kooperationsarbeit zwischen Manz und ISE konnte ein vergleichbares Niveau zwischen ns- und ps-Laserablation erreicht werden. Die Ergebnisse sind im vorangegangenen Abschnitt beschrieben.

AM5 Definition der Randbedingungen für eine erfolgreiche Laserablation. Spezifikation der minimalen Schichtdicke des $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiN}$ Stapels und der Morphologie und Rauheit der Silizium Oberfläche.

Im Bericht von Manz wird die Erreichung dieses Teilziels beschrieben.

AM6 Prinzipieller Nachweis eines Durchsatzes von 2200 Wafern pro Stunde an der Prototypanlage auf Basis der SE Plattform

Im Bericht von Manz wird die Erreichung dieses Teilziels beschrieben.

AM7 Als weitere Verbesserungsmöglichkeit und Reduzierung der „Total-cost-of-Ownership“ soll ein grobes Konzept erarbeitet werden, ob und wie die Laserablation in einer VCS900 Anlage integriert werden kann

Im Bericht von Manz wird die Erreichung dieses Teilziels beschrieben.

2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die finanziellen Mittel des Projekts wurden am Fraunhofer ISE im Wesentlichen für folgende Positionen verwendet:

Der größte Anteil wurde mit 1.350.297,45 EUR für **Personalmittel** verwendet. Die wissenschaftlich-technische Bearbeitung der Aufgabenstellungen in diesem Projekt wurde durch Mitarbeiter des Fraunhofer ISE durchgeführt. Hierbei wurde stark in den Bereichen der Entwicklung und Charakterisierung dünner funktionaler Schichten für den PECVD-Teil des Projekts gearbeitet. Im Bereich der Feinlinienmetallisierung wurde viel im Bereich der Druckprozessentwicklung und des Prozessdesigns gearbeitet. In beiden Projektteilen wurden wiederholt Solarzellen hergestellt, um die neu entwickelten Herstellungsprozesse an der Zielstruktur zu evaluieren. Für das Teilprojekt Laserablation wurden Solarzellen hergestellt und die Einzelprozesse zur Herstellung der Solarzelle eingehend charakterisiert, mit einem Fokus auf den Laserprozess

Materialkosten von 165.183,56 EUR fielen im Projekt an. Damit wurden im Wesentlichen Silicium-Wafer und Materialien zur Herstellung von Solarzellen bezahlt.

Sonstige unmittelbare Vorhabenskosten in Höhe von 67.826,11 EUR fielen großteils zur Installation des PECVD-Teststands am ISE an.

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Im Rahmen von FeinPass wurden in 2 Teilvorhaben am ISE Arbeiten zur Entwicklung eines PECVD-Beschichtungsprozesses und eines Aerosol-basierten Feinlinien-Druckprozesses durchgeführt. Im Bereich der PECVD-Beschichtungsprozessentwicklung wurde bei der Firma Manz mit Unterstützung des ISE ein völlig neu entwickelter PECVD-Reaktor entworfen und gebaut. Die Entwicklung der Beschichtungsanlage führte zunächst über einen Teststand, der in zweifacher Ausfertigung sowohl bei Manz als auch am ISE aufgestellt wurde, zu einem Demonstrator, der bei Manz aufgestellt wurde. Es wurden im Zuge der Prozess- und Anlagenentwicklung zahlreiche Forschungschargen zur Untersuchung der besten Prozessbedingungen und zur Evaluation der Schichteigenschaften durchgeführt. Zusätzlich wurden mehrere Solarzellchargen hergestellt, die zur Untersuchung der neu entwickelten Beschichtungsprozesse und zum Benchmarking gegen Referenzprozesse genutzt wurden.

Im Bereich der Feinlinienmetallisierung wurde in Kooperation mit der Firma Manz ein Demonstrator für aerosolgedruckte Saatschichten auf Solarzellen entwickelt und gebaut. Dieser Demonstrator wurde bei Manz / Reutlingen aufgestellt. Zwei Konzepte für die Strom- und

Aerosolführung wurden bei Manz und am Fraunhofer ISE je mit Hilfe von CAD- und CFD-Methoden untersucht und entwickelt. Beide Konzepte folgten den Anforderungen von hohen Durchsätzen zur Gewährleistung entsprechender Taktraten zur Solarzellenproduktion. Der vom ISE entwickelte und gebaute Druckkopf wurde intern untersucht und weiterentwickelt. Zum Entwickeln von geeigneten Produktionsprozessen wurde der Demonstrator mit dem Druckkopf der Firma Manz genutzt. Die hierfür benötigten Solarwafer wurden von Schott Solar bereitgestellt und an Manz geschickt, welche die Leiterbahnen auf der Vorderseite mit dem Aerosoldrucker auftrugen. Die weitere Prozessierung, Charakterisierung und Bewertung von Zellergebnissen wurde vom Fraunhofer ISE geleistet.

Nach dem Beenden der Feinlinienmetallisierungsaktivitäten wurde stattdessen mit Zustimmung des Fördermittelgebers die Arbeit an Laserablationsprozessen im Rahmen von FeinPass gestartet. Hierbei unterstützte das Fraunhofer ISE die Manz AG bei der Entwicklung eines industrietauglichen Flat-Top-Laserablationsprozesses, der sich gegen die ISE-Referenzprozesse als gleichwertig herausstellte. Hierfür wurden Untersuchungen der laserablatierten Oberflächen und mehrere Solarzellenchargen durchgeführt.

4 Voraussichtlicher Nutzen / Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Für die Verwertungsmöglichkeiten der Ergebnisse im Sinne einer kommerziellen Vermarktung der entwickelten Produktionsmaschinen sei hier auf den Projektabschlussbericht der Fa. Manz verwiesen.

Darüber hinaus ist hier die Verwertbarkeit der Ergebnisse für das Fraunhofer ISE dargestellt.

Erfindungen, Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte sowie deren Verwertungsmöglichkeiten

Im Rahmen dieses Projektes erfolgten folgende Schutzrechtsanmeldungen:

Anmeldenummer	Beschreibung
DE102012205990A1 & WO2013/153158A1	Skalierbarer Aerosol-Druckkopf für hohe Durchsätze
DE102013205683A1	Verfahren zum Reduzieren der Querschnittsfläche eines Aerosolstrahls zum Drucken dünner Linien

Beide Schutzrechtsanmeldungen wurden allerdings aus finanziellen Gründen nach der Anmeldung nicht weiter verfolgt. Daher besteht auch nicht mehr die Möglichkeit, diese weiter zu verwerten.

Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten für die in diesem Vorhaben erzielten Ergebnisse sind als sehr gut einzuschätzen. Einige führende Solarzellenhersteller haben bereits PECVD-Beschichtungsanlagen zur Erprobung in ihren Produktionslinien aufgestellt bzw. haben bereits die industrielle Volumen-Produktion gestartet. Ähnliches gilt für die industrielle lokale Laserkontaktierung bzw. -öffnung auf der Solarzellenrückseite. Das ISE unterstützt diese Aktivitäten durch wissenschaftliche und technologische Beratung und durch Referenzexperimente in der Demonstrator-Anlage am ISE

In jedem der Themenschwerpunkte des Projektes wurde umfangreiches KnowHow und konkrete Konzepte zu verschiedenen Teilaspekten erarbeitet, deren weitere Verwertung sich für die Themenschwerpunkte unterscheidet und daher getrennt betrachtet werden sollen.

Feinlinien-Metallisierung

Die Arbeit an der Feinlinien-Metallisierung auf der Basis des Aerosol-Konzepts wurde im Laufe des Projekts eingestellt, als klar wurde, dass eine erfolgreiche wirtschaftliche Verwertung der Projektergebnisse sehr unwahrscheinlich geworden ist. Dies basiert auf der starken technologischen Weiterentwicklung der Siebdruck-basierten Metallisierungstechnologie. Die Siebdrucktechnologie konnte in den vergangenen Jahren deutlich verbessert werden und erlaubt heute im Vergleich zum Projektstart stark verringerte Fingerbreiten auf Solarzellen, die eine geringere Abschattung und damit eine verbesserte Solarzelleneffizienz ermöglichen. Eine wirtschaftliche Verwertung der entwickelten Technologie konnte so im Projekt leider nicht sichergestellt werden.

PECVD-Beschichtung

Wie oben beschrieben, werden PERC-Solarzellen zunehmend auch industriell in die Volumen-Produktion überführt. Die dafür nötige Beschichtungstechnologie für die Solarzellenrückseite wurde in FeinPass entwickelt und dessen Leistungsfähigkeit gezeigt. Daher sind die Aussichten der wirtschaftlichen Vermarktung der PECVD-Technologie als sehr gut einzuschätzen.

Laserablation

Wie die PECVD-Beschichtungstechnologie ist auch die Laserablationstechnologie ein Prozess-Element, dass zur industriellen Herstellung von PERC-Solarzellen standardmäßig eingesetzt wird. Auch der Laserablationsprozess konnte in FeinPass auf einem sehr hohen Niveau demonstriert werden und einer weiteren kommerziellen Verwertung steht somit nichts Wesentliches im Weg.

Sowohl Laserablation als auch PECVD-Beschichtung sind über die PERC-Technologie hinaus für weitere fortschrittliche Solarzelltypen wie PERT oder IBC geeignet und bieten den Projektpartnern somit eine weitergehende Verwertung der Projektergebnisse.

5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Die PERC-Technologie ist während der Durchführung des Projekts in ersten industriellen Produktionslinien eingesetzt worden. Dies zeigte, dass die im Projekt entwickelten Technologien sehr vielversprechend für eine nachgelagerte kommerzielle Verwertung der bei Manz entwickelten Anlagenkonzepte sind, insbesondere die PECVD- und die Laserablationstechnologien.

Auch andere Forschungsinstitute sind auf dem Gebiet der PERC-Solarzellen aktiv und haben, teilweise gemeinsam mit anderen Partnern, ebenfalls neue Technologien für PERC-Solarzellen entwickelt. Beispielsweise ist zwischenzeitlich von der Firma Singulus ebenfalls eine PECVD-Anlage für SiNx- und Al₂O₃-Schichten erhältlich [Vei12].

Alternativ zu PECVD-Prozessen zur Al₂O₃-Abscheidung wurden auch APCVD-Prozesse in die Photovoltaik eingeführt [Bla12].

Auch vor dem Start von FeinPass war bekannt, dass ALD-Al₂O₃-Schichten ebenfalls sehr gute Passivierungseigenschaften bereitstellen können.

Für ALD und APCVD gilt allerdings (derzeit), dass keine SiNx-Deckschicht mit der gleichen Abscheidetechnologie hergestellt werden kann. Daher muss auch hier weiterhin auf eine PECVD-Deckschicht gesetzt werden. Dies birgt einen Vorteil für die in FeinPass entwickelte PECVD-Technologie, da mit ihr alle nötigen dielektrischen Schichten abgeschieden werden können.

Alternativ zur Al₂O₃-Passivierung wurde ebenfalls eine SiON-basierte Passivierung untersucht und kommerziell angeboten durch die Fa. Centrotherm. Diese unterscheidet sich deutlich von der Al₂O₃-Passivierung durch die Ausbildung ortsfester positiver Ladungen in der Passivierschicht im Gegensatz zu ortsfesten *negativen* Ladungen in der Al₂O₃-Schicht. Für p-Typ-c-Si-Oberflächen entsteht daher mittels der Al₂O₃-Beschichtung eine vorteilhafte Bandverbiegung mit Akkumulation von Majoritätsladungsträgern an der c-Si-Oberfläche.

6 Veröffentlichung der Ergebnisse

Folgende Veröffentlichungen wurden im Rahmen von FeinPass mit ISE-Beteiligung publiziert:

B. Kafle, S. Kühnhold, W. Beyer, S. Lindekugel, P. Saint-Cast, M. Hofmann, J. Rentsch: *Thermal Stability Investigations of PECVD Al₂O₃ Films Discussing a Possibility of Improving Surface Passivation by Re-Hydrogenation After High Temperature Processes*, Proceedings of the European Photovoltaic Solar Energy Conference (EUPVSEC) 2012, Frankfurt, p. 1788.

F. Schwarz, R. Beckmann, S. Nölker, S. Kastl, T. Pernau, H. Wanka, N. Kohn, M. Hofmann, J. Rentsch: *Advanced anti-reflection and passivation layer systems produced by high-power plasma in the new Manz PECVD system*, Proceedings of the European Photovoltaic Solar Energy Conference (EUPVSEC) 2012, Frankfurt, p. 1938.

M. Hofmann, N. Kohn, F. Schwarz, S. Nölker, S. Kastl, R. Beckmann, R. Ferré, T. Pernau, D. Trogus, S. Kühnhold, P. Saint-Cast, J. Rentsch: *High-Power-Plasma PECVD of SiN_x and Al₂O₃ for Industrial Solar Cell Manufacturing*, Proceedings of the European Photovoltaic Solar Energy Conference (EUPVSEC) 2013, Paris, p. 1184.

Sebastian Binder, Markus Glatthaar & Edda Rädlein (2014) *Analytical Investigation of Aerosol Jet Printing*, *Aerosol Science and Technology*, 48:9, 924-929.

Sebastian Binder, Christian Schmiga, Markus Glatthaar and Stefan W. Glunz: *OPTIMIZED AEROSOL JET PRINTED SILVER CONTACTS ON LOWLY DOPED PHOSPHORUS AND BORON EMITTERS*, Proceedings of the European Photovoltaic Solar Energy Conference (EUPVSEC) 2014, Amsterdam.

7 Literaturverzeichnis

- [Abe99] A. Aberle, Crystalline Silicon Solar Cells, University of New South Wales, Sydney, 1999
- [Bin14] S. Binder et al., , Aerosol Science and Technology 2014, 48:9, 924-929.
- [Bla89] A. W. Blakers et al., Applied Physics Letters 1989, 55(13), p. 1363
- [Bla12] L. E. Black, K. R. McIntosh, Applied Physics Letters 100, 202107 (2012)
- [Glu07] S. W. Glunz, Advances in OptoElectronics, 2007
- [Goe07] A. Goetzberger et al., Sonnenenergie: Photovoltaik, Stuttgart, Teubner 1997
- [Hör09] M. Hörteis, Dissertation Thesis, Universität Konstanz (2009)
- [Hus05] F. Huster, 20th EUPVSEC, Barcelona, 2005
- [Kic12] C. Kick, et.al. EUPVSEC Frankfurt 2012, p. 544
- [Kim12] A. Kimmerle, et.al. Energy Procedia 27 (2012) 275
- [Mac01] D. MacDonald, Dissertation, Australian National University, 2001
- [Met07] A. Mette, Dissertation Thesis, Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg (2007)
- [Sch12] C. Schmiga, et.al. EUPVSEC Frankfurt 2012, p. 915
- [Vei12] B. Veith et al., Energy Procedia 27 (2012) 379 – 384
- [Woe08] R. Woehl et al. Advances in OptoElectronics, (2008)
- [Moh10] S. Mohanan, H. Guo, M. Ametowobla, T. Schlenker, D. Manz, Advanced Aerosol Fine-Line Metallization for High Efficiency Silicon Solar Cells, 25th European PVSEC, Valencia, 2DV.1.49 (2010)