

Abschlussbericht des Forschungsvorhabens

Technologiecluster für die industrielle Fertigung von Solarzellen mit Tunneloxid-passivierenden Kontakten

Akronym: TOPCon Cluster

Förderkennzeichen: 03EE1065F

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klima unter dem Förderkennzeichen 03EE1065 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.“

Projektlaufzeit: 01.06.2020 – 30.11.2023

RENA-Projektleitung: Tobias Dannenberg

RENA-Autor: Tobias Dannenberg, Benedikt Straub, Damian Brunner

RENA Technologies GmbH

Höhenweg 1

D-78148 Gütenbach

Inhaltsverzeichnis

1	WISSENSCHAFTLICHE ODER TECHNISCHE ARBEITSZIELE DES TEILVORHABENS	3
1.1	GESAMTZIEL DES VORHABENS.....	3
1.1.1	<i>Motivation und Ziel des Teilvorhabens.....</i>	3
1.1.2	<i>Bezug des Teilvorhabens zu den förderpolitischen Zielen</i>	4
1.1.3	<i>Wissenschaftliche oder technische Arbeitsziele des Teilvorhabens.....</i>	5
1.2	STAND DER TECHNIK ZU PROJEKTBEGINN	7
1.2.1	<i>Stand der Technik bzgl. Gesamtvorhaben</i>	7
1.2.2	<i>Stand der Technik bzgl. Teilvorhaben RENA.....</i>	9
1.2.3	<i>Bestehende Schutzrechte (eigene und Dritter).....</i>	9
2	WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHE PROJEKTERGEBNISSE	10
2.1	TUNNELOXID UND REINIGUNG (AP2).....	10
2.1.1	<i>Textur und Reinigung (AP2.1).....</i>	10
2.2	EINSEITIGE ÄTZPROZESSE (AP4).....	14
2.2.1	<i>Kantenisolation und BSG Ätze (AP4.1)</i>	14
2.2.2	<i>Einseitige Entfernung von LPCVD und PECVD TOPCon Schichten (AP4.2)</i>	19
2.3	GALVANIKMETALLISIERUNG (AP6)	32
2.4	ZUSAMMENFASSUNG	37
3	FORTSCHREIBUNG DER VERWERTUNGSPLANUNG.....	39
3.1	WIRTSCHAFTLICHE ERFOLGSAUSSICHTEN UND ANSCHLUSSFÄHIGKEIT.....	39
3.2	WISSENSCHAFTLICHE UND TECHNISCHE ANSCHLUSSFÄHIGKEIT	40
4	ARBEITEN DIE ZU KEINER LÖSUNG GEFÜHRT HABEN	41
5	PRÄSENTATIONSMÖGLICHKEITEN FÜR MÖGLICHE NUTZER	42
6	EINHALTUNG DER AUSGABEN-/KOSTEN- UND ZEITPLANUNG	43
7	LITERATURVERZEICHNIS	44

1 Wissenschaftliche oder technische Arbeitsziele des Teilvorhabens

1.1 Gesamtziel des Vorhabens

1.1.1 Motivation und Ziel des Teilvorhabens

Das Projektziel war es, eine Basis für die industrielle Umsetzung von Solarzellen mit Tunneloxid-passivierenden Kontakten (TOPCon) zu schaffen um hierbei die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Anlagenbauer zu stärken, so dass diese am erwarteten starken Marktwachstum von TOPCon Produktionskapazitäten teilhaben können. Auf diese Weise sollten zudem die Produktionstechnologien für Solarzellen mit passivierten Kontakten als technologische und effizienzsteigernde Innovation weiterentwickelt werden, welches die Stromgestehungskosten durch höhere Wirkungsgrade im Vergleich zur bisherig dominierenden Passivated Emitter and Rear Cells (PERC) Prozesstechnologie weiter reduziert.

Die RENA Technologies GmbH hat sich im Rahmen dieses Projektes mit der Entwicklung geeigneter Ansätze für die nasschemische Prozessierung im TOPCon Prozessfluss befasst. Folgende Prozesssequenzen wurden betrachtet:

- Textur und Reinigung (AP2.1)
- Nasschemische Kantenisolation und BSG Ätze (AP4.1)
- Einseitige Entfernung von LPCVD und PECVD TOPCon Schichten (AP4.2)
- Galvanik-Metallisierung (AP6)

Die so entwickelten Prozesse sollten auf gegenüber PERC wettbewerbsfähige Hochdurchsatz-Prozessanlagen übertragen werden.

1.1.2 Bezug des Teilvorhabens zu den förderpolitischen Zielen

Das Förderprojekt TOPCon Cluster adressiert folgende von der Bundesregierung im 7. Energieforschungsprogramm „Innovationen für die Energiewende“ (BAnz AT 18.10.2018 B1) in Absatz 3.5 „Photovoltaik“ festgelegte Ziele:

Ziele im 7. Energieforschungsprogramm , Kapitel 4.2.1 Photovoltaik	Zielstellung im Projekt „TOPCon Cluster“
Reduktion der Kosten der Technologien durch „...kontinuierliche Steigerung des Wirkungsgrads und der Produktivität“, ()	Entwicklung kosteneffizienter Hochdurchsatz-Produktionsanlagen und geeigneter Prozesse für die TOPCon Technologie ➔ reduzierte Cost of Ownership im Vergleich zu üblichen Prozessen bei der PERC Produktion durch Wirkungsgradsteigerung und innovative Anlagentechnologie
Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit deutscher Unternehmen „Es ist notwendig, dass sich die heimischen Unternehmen stets mit Innovationen von der internationalen Konkurrenz abheben, um in kürzeren Zeiträumen über effizienzsteigernde technologische Weiterentwicklungen Kostensenkungspotenziale zu erzielen“ und Förderung bevorzugt von Verbundvorhaben „... bevorzugt über Verbundprojekte, an denen Unternehmen (PV-Industrie, Material- und Anlagenhersteller, Anbieter von Photovoltaik-Systemtechnik), Forschungseinrichtungen und Universitäten mitwirken.“	Das Projektkonsortium, bestehend aus den deutschen Firmen und Instituten, ermöglicht einen Innovationsvorteil und die Stärkung der Technologieführerschaft von deutschem Anlagenbau (und heimischen Zulieferbetrieben), sowie die Sicherung der Spitzenstellung deutscher PV-Forschung. Damit einhergehend langfristige Schaffung/Sicherung von Arbeitsplätzen und Expertise.
Umwelt- und naturverträgliche Gestaltung des Ausbaus der erneuerbaren Energien und Vermeidung umweltbelastender Stoffe : „...Aufbau von Produktionen (vom Rohstoff über die Solarzelle und -modul bis zum System) mit industriellem Durchsatz zur Ausnutzung von Skaleneffekten ermöglicht werden, unter Berücksichtigung von Ressourceneffizienz und Umweltverträglichkeit“	Die Steigerung der Anlagendurchsätze ohne signifikante Erhöhung der Anlagenstellfläche (Footprint) reduziert den Flächenverbrauch in Bezug auf die Produktionskapazität und erhöht somit die Ressourceneffizienz.
Kostensenkung durch effizientere Produktionsverfahren und gesteigerter Prozessausbeute in allen Bereichen: „Dabei müssen durch Prozesskontrolle, Logistik- und Automatisierungskonzepte das Fabrik-Layout und die Servicequalität verbessert werden.“	Signifikante Steigerung der Produktionskapazität durch Erhöhung der Anlagendurchsätze ermöglicht signifikante Kostenreduktion. Im Vergleich zu heutigen Produktionen soll der Durchsatz um Faktor 3-4 gesteigert werden

1.1.3 Wissenschaftliche oder technische Arbeitsziele des Teilvorhabens

Im Teilvorhaben von RENA waren folgende Entwicklungsziele angestrebt:

- Textur und Reinigung (AP2.1): Evaluierung und Adaption der bestehenden RENA Textur Prozesse der PERC Produktion
- Nasschemische Kantenisolation und BSG-Ätze (AP4.1): Evaluierung und Adaption der bestehenden RENA Prozesse
- Einseitige Entfernung von LPCVD und PECVD TOPCon Schichten (AP4):
 - Einseitige Entfernung des Umgriffs der abgeschiedenen dotierten Siliziumschicht (TOPCon Schicht)
 - Ätzung der Kante für optimalen Parallelwiderstand bzw. möglichst niedrigen Rückwärtsstrom
 - Evaluierung eines Prozesses für einen Durchsatz von 5000 Wafern/Stunde

Weiterhin sollten die neu entwickelten Prozesssequenzen, wie auch die im Erfolgsfall optimierte Hardware der Anlage in neue Anlagenkonzepte, die diese Prozesssequenzen abbilden, umgesetzt werden.

AP 2: Tunneloxid und nasschemische Reinigung (RENA)

In diesem Arbeitspaket sollten bei RENA Untersuchungen des Textur- und Reinigungsprozesses für TOPCon Solarzellen erfolgen. Die notwendigen Adaptionen des Verfahrens sollten hier evaluiert werden. Hierzu wurden von RENA Wafer mit verschiedenen Texturprozessen und Reinigungssequenzen behandelt und diese am Fraunhofer ISE weiterprozessiert. Über die erhaltenen Zellparameter oder auch Parameter von speziellen Teststrukturen, die Aufschluss auf die Performance des jeweiligen nasschemischen Prozesses liefern, sollten für TOPCon geeignete optimierte Prozesse ermittelt werden.

Meilenstein 2.1 (nach 18 Monaten): Reinigung vor Tunneloxid ermöglicht $iVoc > 730$ mV (symmetrische TOPCon Probe mit SiNx gefeuert) bei Durchsatz 5000 wph (mind. M2-Format)

AP 4: Einseitige Ätzprozesse (RENA)

Für den am Fraunhofer ISE entwickelten optimierten Bor-Emitter (siehe AP1) sollten bei RENA Untersuchungen zur Entfernung dieses Emitters auf der Rückseite und an den Kanten des Wafers durchgeführt werden. Die notwendigen Adaptionen des einseitigen Ätzprozesse für Phosphor-Emitter aus der PERC Prozessroute sollten für den Bor Emitter für TOPCon Solarzellen evaluiert werden.

Des Weiteren sollten Untersuchungen zur einseitigen Entfernung der aufgetragenen dotierten Siliziumschichten (TOPCon) mittels nasschemischer Prozesse bei der RENA erfolgen. Der bzw. die Prozesse sollten für unterschiedliche TOPCon Abscheideverfahren (PECVD, LPCVD) evaluiert werden. Unterstützt wurden diese Arbeiten durch Charakterisierung der Prozessergebnisse durch das Fraunhofer ISE.

Meilenstein 4.1 (nach 12 Monaten): Prozess Kantenisolation und BSG-Ätze etabliert, BSG VS und Emitter auf RS vollständig entfernt, bei Durchsatz 5000 wph (mind. M2-Format)

Meilenstein 4.2 (nach 24 Monaten): Prozess für einseitige Entfernung des LPCVD Umgriffs etabliert

AP 6: Galvanik Metallisierung

In Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer ISE sollte RENA die Wechselwirkung von verschiedenen TOPCon Schichten mit der Galvanik-Metallisierung analysieren. Die verschiedenen Abscheideverfahren und Schichteigenschaften der TOPCon Schicht sollten hinsichtlich ihrer Interaktion mit den nachfolgenden Laserstrukturierungs- und galvanischen Metallisierungsprozessen untersucht werden. Am Ende sollte ein Schichtsystem identifiziert werden, welches ein geringes Maß an Schädigung und geringe Kontaktwiderstände ermöglicht. Die Arbeiten sollten durch Innolas als assoziierten Partner unterstützt werden, der geeignete Laserquellen und angepasste Laser-Prozesse für die Laserablation auf Vorder- und Rückseite einbringen sollte. Dabei sollten Variationen an der TOPCon Abscheideart, Schichtdicke und Dotierungsstärke durchgeführt werden und deren Interaktion mit Laserablation, Galvanik (Vorbehandlung & Abscheidung) und thermische Kontaktannealverfahren untersucht werden. Zusätzlich sollte untersucht werden, inwieweit die elektrischen Kontakteigenschaften von Galvanikkontakten im Randbereich der Solarzelle (insbesondere auf der Bor-Emitter Vorderseite) beeinflusst werden vom Umgriff der TOPCon-Schicht bzw. nasschemischen Nachbehandlungen zu dessen Entfernung. Die in AP5a erwähnten Infrarot-Strahlquellen sollten in diesem AP für die Anwendung „Temper-Prozesse von Galvanikkontakten“ getestet werden. Die Arbeiten sollten in enger Abstimmung durch den Projektpartner RENA, ISE, Rehm und Heraeus Noblelight durchgeführt werden.

1.2 Stand der Technik zu Projektbeginn

1.2.1 Stand der Technik bzgl. Gesamtvorhaben

Zum Projektbeginn dominierte die Technologie der PERC-Solarzelle den Markt bzgl. Aufbau neuer Solarzellen-Produktionskapazitäten. Mit diesem Solarzellentyp erreicht man in der industriellen Produktion einen mittleren Wirkungsgrad von 22,2–22,5%. Limitierend sind hierbei vor allem Verluste entlang der Vorderseitenmetallisierung und im Phosphor-Emitter.

Das vor Projektstart für PERC-Solarzellen eingesetzte p-Typ-Silizium wurde mit überwiegender Mehrheit mittels Bor (B) dotiert. Dies führt zur bekannten Degradation (auch als Licht-induzierte Degradation, LID, bezeichnet), welche durch Rekombination von Minoritätsladungsträgern an Bor-Sauerstoff-Komplexen die Eigenschaften der Solarzelle erheblich limitiert. Für TOPCon-Solarzellen wird in der industriellen Produktion daher vorwiegend n-Typ Material (mittels Phosphor dotiert) eingesetzt, welches erheblich höhere Lebensdauern der Minoritätsladungsträger aufweist. Weiterhin hat der größte Hersteller von Siliziumwafern für die Photovoltaik (LONGi Silicon) 2019 angekündigt, dass dessen Produktion bis Ende 2020 vollständig von Bor-dotiertem auf Gallium-dotiertes Material umgestellt werden sollte. Verschiedene Untersuchungen zeigten, dass der Einsatz von Gallium im Siliziumsubstrat zu signifikant verringertem Auftreten des oben beschriebenen Degradationseffekts führt und deutlich höhere, stabile Minoritätsladungsträgerlebensdauern erreicht werden können. Eine weitere, deutliche Indikation waren damals neu angekündigte PERC-Produktionskapazitäten von chinesischen Solarzellherstellern, welche den Prozessschritt zur Deaktivierung des Bor-Sauerstoff-Komplexes nicht mehr vorsahen. Bekannt war zu Projektstart, dass in Gallium-dotiertem Material unter Betriebsbedingungen der Solarzelle andere Degradationseffekte auftreten können (z.B. LeTID (light and elevated temperature induced degradation)), welche jedoch im Vergleich zu Bor-dotiertem Material eine langsamere Kinetik zeigt. Es existierten bis dahin allerdings noch relativ wenige Untersuchungen dazu und es war unklar, inwieweit nicht eventuell auch Spuren von Bor für die beobachteten Effekte verantwortlich sein könnten.

Die Eigenschaften von passivierenden Kontakten waren bereits seit Jahrzehnten aus Halbleiter-Anwendungen bekannt [1, 2]. Am Fraunhofer ISE wurde die Technologie für beidseitig kontaktierte Solarzellen in den vergangenen Jahren weiterentwickelt [3]. Es wurden auf kleinen Flächen Wirkungsgrade bis 25,8% erreicht. Asiatische Zellhersteller haben bereits Pilot-Produktionen aufgebaut und erreichten damit Wirkungsgrade um 23% auf vollformatigen mit Siebdruck kontaktierten Solarzellen [4]. Mit hocheffizienz-Ansätzen wurden über 24,5% auf großformatigen Zellen erreicht [5]. Mittelfristig wurde ein starkes Wachstum des Marktanteils solcher Solarzellen erwartet (siehe Abbildung 1). Auf dem Markt waren aber nur wenige Module mit TOPCon-Solarzellen ohne Wirkungsgradvorteil gegenüber PERC Modulen verfü-

bar. Nach Einschätzung des Projektkonsortiums war dies darauf zurückzuführen, dass die spezifischen Herstellungskosten der TOPCon-Solarzellen noch erheblich über denen von PERC-Solarzellen lagen und der Wirkungsgradgewinn bisher die erhöhten Aufwände in der Herstellung nicht rechtfertigte. Weiterhin gab es einige ungelöste Fragestellungen im Gesamtprozess und bei der Modulintegration, insbesondere der Stabilität der TOPCon Solarzellen bei Beaufschlagung mit negativer Spannung, wie sie bei teilverschatteten Modulen auftritt.

Es gab eine Vielzahl an technologischen Optionen für die Umsetzung der TOPCon-Struktur. Tunneloxide konnten beispielsweise thermisch [6], nasschemisch [7] oder mittels Plasma-Oxidation [8] oder ALD erzeugt werden. Bekannte Abscheideverfahren für die dotierten Siliziumschichten konnten mittels LPCVD- [6], PECVD- [3], APCVD- , und PVD-Verfahren [9] realisiert werden.

Welche der Technologien sich für die industrielle Fertigung von TOPCon-Solarzellen am besten eignen war nicht klar. Ein wesentlicher Kostenfaktor war zudem der erhöhte Silberverbrauch der TOPCon Solarzelle im Vergleich zur PERC Solarzelle, die Entwicklungen zur Reduzierung des Silberverbrauchs führen, notwendig machten.

Es bestand daher Bedarf, einen Gesamtprozess zu entwickeln, der die Fragestellungen der Zellherstellung und der Modulintegration zu löst. Wirtschaftliche Prozesse zum Einseitigen Beschichten bzw. Nasschemischen Ätzen sowie eine Weiterentwicklung der Einzelprozesse und des Prozessflusses insgesamt, um eine vergleichbare Kostenstruktur wie die PERC-Solarzelle zu erreichen, waren zu Projektbeginn noch nicht bekannt.

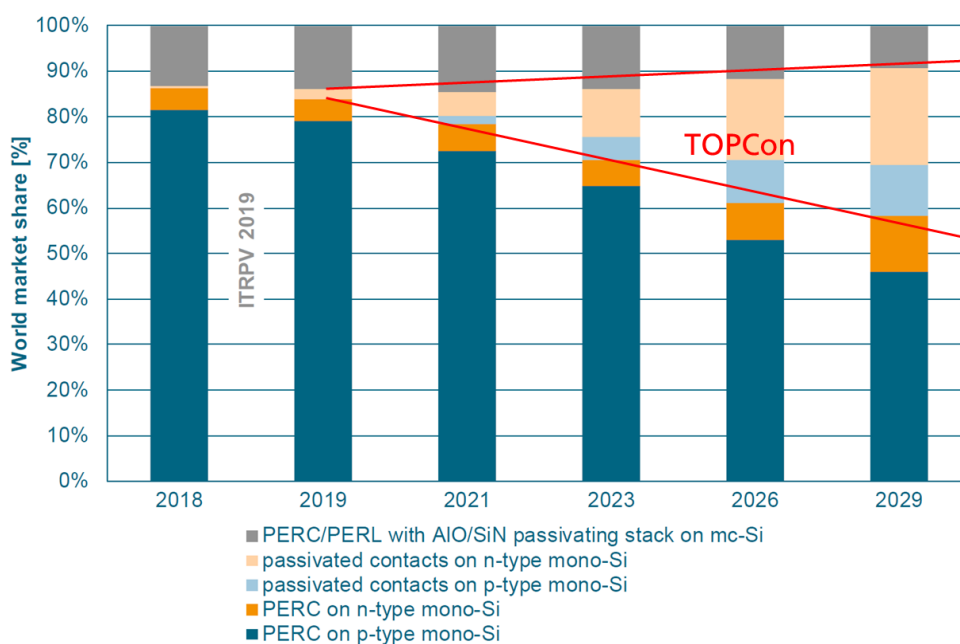


Abbildung 1: Erwarteter Anteil verschiedener Zelltechnologien mit Passivierung entnommen aus ITRPV 2019 [10]. Der von der TOPCon-Technologie adressierbare Anteil ist hervorgehoben.

Eine Absenkung der spezifischen Herstellungskosten sowie eine Erhöhung der Technologiereife war für eine Markteinführung erforderlich [11]. TOPCon Module waren die Ausnahme auf dem Markt, da die Technologie nicht oder kaum wettbewerbsfähig gegenüber der PERC-Technologie war.

1.2.2 Stand der Technik bzgl. Teilvorhaben RENA

Für die Texturierung wurden für die PERC Prozessroute Pyramidengrößen zwischen 2 – 3 µm nasschemisch erzeugt. Es war unklar, ob diese Pyramidengrößen ebenfalls das Optimum für TOPCon Solarzellen sein wir, da der Schichtstapel zur Vorderseitenpassivierung anders aufgebaut ist. Aufgrund der besseren Passivierung der Rückseite durch das TOPCon und dadurch höheres Wirkungsgradpotential (bis über 25%) könnten auch Effekte durch niedrighschwellige Verunreinigungen, die durch die Effizienzlimitierung von PERC nicht sichtbar wurden, möglicherweise sichtbar, die eine verbesserte Reinigungssequenz erfordern.

Übliche Durchsätze bei den industriellen RENA Batchanlagen waren bei Projektbeginn 8000 Wafer pro Stunde.

Für die Rückseitige Emitterentfernung (Chemical Edge Isolation – CEI) war es in der PERC Prozesssequenz zum Projektstart üblich, einen nasschemischen sauren Inline Prozess in einer Ätzlösung aus HF und HNO₃ sowie H₂SO₄ zu verwenden. Typische Durchsätze dieser Lösung lagen bei knapp 5000 Wafern pro Stunde

Für die einseitige Entfernung von TOPCon Schichten aus dotiertem Poly-Silizium gab es zu Projektbeginn noch keine Lösung. Ein Ätzen des Umgriffes auf der Zellvorderseite analog zum oben beschriebenen CEI Prozess in der PERC Route kam jedoch nicht in Frage, da diese Ätzlösung Glasschichten wie das den Emitter schützende Borsilikatglas (BSG) ähnlich stark angreift wie das zu entfernende Poly Silizium. Hierdurch wäre das Prozessfenster – wenn überhaupt vorhanden – sehr klein, um genau den Ätzabtrag einzustellen, der für eine Entfernung des Poly Siliziums ausreichend hoch ist, jedoch ausreichend gering, um den unter dem BSG liegenden Emitter nicht anzugreifen.

1.2.3 Bestehende Schutzrechte (eigene und Dritter)

Es sind dem Konsortium bisher keine Schutzrechte bekannt, die einer Verwertung der angestrebten Ziele im Wege stehen würden. Die Partner des Konsortiums halten selbst Schutzrechte in den spezifischen Technologien, welche die Verwertung unterstützen. Eine detaillierte Patentrecherche soll im Rahmen des Projektes durchgeführt werden. Am Fraunhofer ISE existieren Patente und Patentanmeldungen zu Solarzellenprozessen und Strukturen, die für das Projekt relevant sind. Hier sind insbesondere DE102013219561A1 bzw. US9716204B2 (Verfahren zum Herstellen einer photovoltaischen Solarzelle...) sowie die laufenden Anmeldungen DE102013219564A1 und EP3120391A1 zu nennen.

2 Wissenschaftlich-technische Projektergebnisse

Angestrebt im Teilvorhaben von RENA waren folgende Entwicklungsziele

- Adaption des bestehenden RENA Textur Prozesses und Nachreinigung auf die TOPCon Prozessroute
- Evaluierung und Adaption des nasschemischen Kantenisoliationsprozesses und einer BSG Ätze
- Einseitige Entfernung von Umgriffen abgeschiedener dotierter Siliziumschichten
- Ätzung der Waferkante beim Nasschemischen Kantenisoliationsprozess zur rückseitigen Boremitterentfernung sowie der Entfernung dotierter Siliziumschichten; Charakterisierbar über einen hohen Shuntwiderstand bzw. niedrige Rückwärtsströme $J_{rev,2}$
- Evaluierung der Prozesse für einen Durchsatz von 5000 Wafern/Stunde
- Galvanik Metallisierung von TOPCon Solarzellen
- Evaluation von Prozessen für Galvanik Kontakte

2.1 Tunneloxid und Reinigung (AP2)

2.1.1 Textur und Reinigung (AP2.1)

TOPCon Zellkonzepte zeichnen sich dadurch aus, dass sie neue Texturen mit schärferen Kanten und Winkeln zulassen, welche niedrigere Reflexionen aufweisen. Bisherige Texturen mit klassischen Pyramidengrößen zwischen $1,5\text{-}2,5\mu\text{m}$ und Pyramiden-Winkeln zwischen $50\text{-}60^\circ$, erreichen maximale Reflexionen zwischen 10-11% bei 600 nm Wellenlänge gemessen. Kleinere Pyramiden von $1\text{-}2\mu\text{m}$ Pyramidengröße und Winkel $> 60^\circ$, können Reflexionen $< 8,5\%$ erreichen. Dieser Reflexionsgewinn konnte aber bei bisherigen PERC Zellkonzepten nicht in einen Stromgewinn überführt werden. Grund dafür war die Limitierung von PERC Zellen durch die Vorderseitenpassivierung mit SiNx . Diese limitierte durch ihre maximale Passiviergüte die maximale Stromdichte um $41,2 \text{ mA/cm}^2$. Alles darüber wurde durch

Verlustmechanismen negiert. Egal was man bei der Textur verbessert, dieses Limit begrenzte den maximalen Zellstrom.

Durch die typische TOPCon Vorderseitenpassivierung durch $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiN}_x$ Schichtstapel, können nun diese „schärferen“ Textur Strukturen mit höheren Winkeln, kleineren Pyramiden und geringen Reflexionen besser passiviert werden. Die Limitierungen sind verschwunden und neue Pyramidenformen mit geringeren Reflexionen können zu deutlich höhere Stromdichten beitragen.

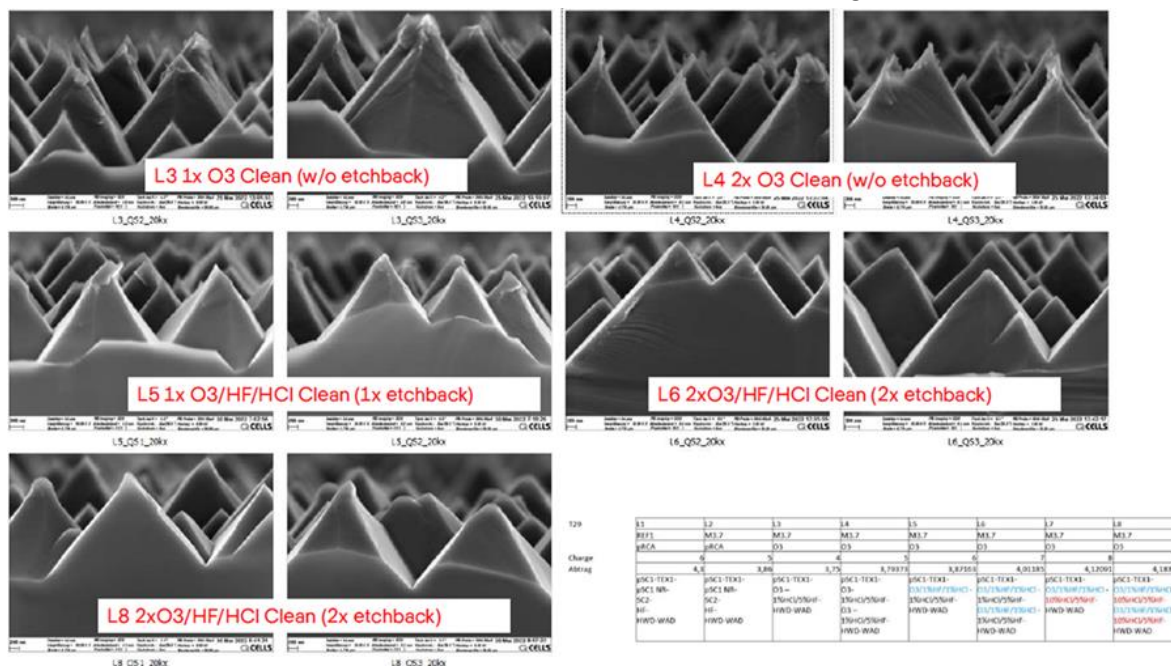


Abbildung 2: TOPCon Textur mit H3.7 Additiv und unterschiedlichen Nachreinigungen. Standard O₃ Clean einfach und doppelt, sowie O₃/HF Etchback Cleans, welche die Pyramidenspitzen langsam abrunden.

Abbildung 2. zeigt eine Additiv Entwicklung für TOPCon Zellkonzepte, namentlich Monotex H3.7. Dieses Additiv zeigt eine angepasste Pyramidenform mit abgerundeten Pyramidenflanken, extremen Spitzen und höheren Pyramidenwinkeln. Diese Textur erreicht Reflexionen von bis zu 8,5 % bei 600 nm Wellenlänge gemessen. Jedoch machen die steilen Flanken an den Spitzen eine Anpassung der Textur Reinigung notwendig. Es besteht die Gefahr, dass die extremen Spitzen dieser Textur die Passivierung „durchstoßen“ und Pinnhole-Effekte bewirken können (Leckstromkanäle). Deswegen wurden unterschiedliche Nachreinigungen getestet, welche diese Spitzen gezielt und kontrolliert abrunden sollen. Dazu verwendet man entweder mehrere Ozon (O₃) basierte Reinigungsbecken mit zwischengelagerten HF Dips zur Entfernung der Ozonoxide in Folge, oder man rundet direkt ab durch einen Einsatz einer Mischung aus Ozon und Flußsäure (HF). Dabei oxidiert das Ozon das

Silizium der Spitzen und das HF entfernt dieses Siliziumoxid und trägt damit die Spitze ab. Abbildung 2 zeigt wie durch mehrere Wiederholungen dieser Clean Schritte dieser sogenannte Rounding Effekt verstärkt wird.

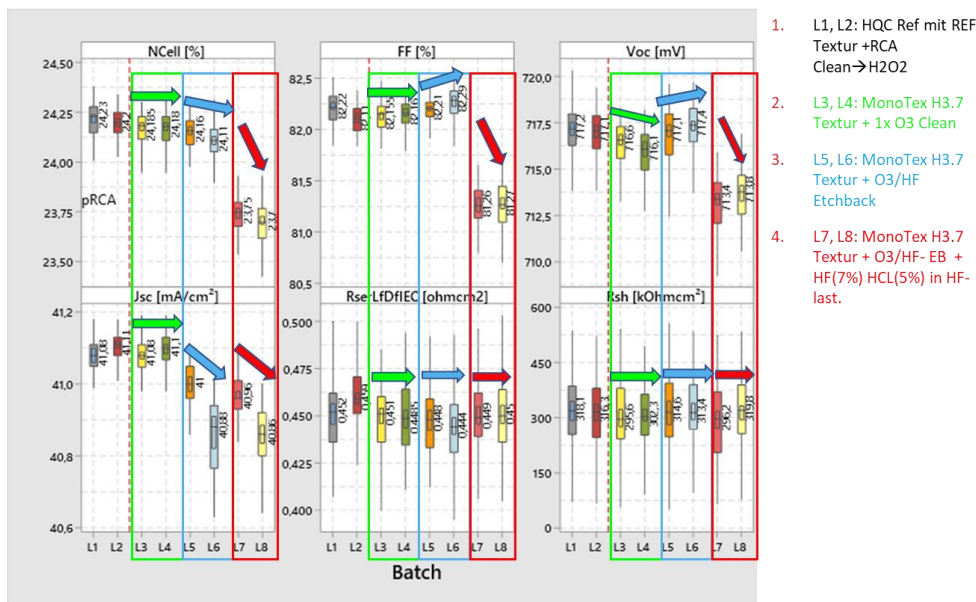


Abbildung 3: Reinigungsschritte nach H3.7 Textur. Unterschiedliche Farben repräsentieren unterschiedliche Nachreinigungen. Grün einfacher oder zweifacher O₃ Clean. Blau HF/O₃ basierter Etchback Clean. Rot HF/O₃ Etchback mit anschließendem hochkonzentrierten HF/HCl Clean

Abbildung 3 zeigt die Zellergebnisse mit dieser neuen Textur und unterschiedlichen Clean Varianten. Die Unterschiedliche Farben der Markierungskästen und der Pfeile repräsentieren unterschiedliche Nachreinigungen. Grün einfacher oder zweifacher O₃ Clean. Blau HF/O₃ basierter Etchback Clean. Rot HF/O₃ Etchback mit anschließendem hochkonzentrierten HF/HCl Clean. Die Ergebnisse sind wie folgt:

1. Die einfach Ozon basierte Nachreinigung (grün) reicht vollkommen um die neuen extremeren Textur Formen abzureinigen und leicht zu runden, sodass die Zelleffizienz nicht leidet. Hier wurden 24,25% Zelleffizienz erreicht mit einem Strom von 41,15 mA/cm². Auf diesem Niveau war der Benefit der stärkeren Reflexion noch nicht vollkommen ersichtlich.
2. HF/O₃ basierte Reinigungen (blau) erhöhen zwar leicht den Voc von 717 auf 718 mV, was auf eine verbesserte Oberflächenreinigung oder Passivierungsqualität schließen lässt, jedoch sinkt der Strom dramatisch von 41,1 auf 40,8-41 mA/cm². Damit sinkt die Zelleffizienz leicht auf unter 24,25%. Dies lässt auf einen negativen Einfluss des HF/O₃ Etchback Cleans auf die Gesamtreflexion und die damit die Lichteinkopplung schließen.

3. Der Einsatz einer nachfolgenden hochkonzentrierten HF/HCl Reinigung (rot) lässt zusätzlich zur blauen HF/O₃ Gruppe den Voc dramatisch absinken von 717 auf 713mV. Damit sinkt die Zelleffizienz auf von 24,25 auf 23,75mV. Zum Vergleich wurde für die grüne und blaue Gruppe eine HF/HCl Konzentration von 5 wt%/0,5 wt% gewählt, also deutlich weniger HCl. Das lässt darauf schließen, dass sich der Einsatz einer hohen HCl Konzentration negativ auf die TOPCon Oberfläche auswirkt und den Voc sinkt.

Die Schlussfolgerungen aus diesem Experiment sind wie folgt:

- I. Die neuen extremen Texturen können mit einfach O₃ Cleans gereinigt und abgerundet werden.
- II. HF/O₃ Cleans bewirken auf diesem Zellniveau einen möglichen Verlust an Strom durch Abrunden der Pyramidenspitzen.
- III. Eine hohe HCl Konzentration im letzten HF/HCl Reinigungsschritt bewirkt eine negative Oberflächenkonditionierung der TOPCon Solarzelle.

Um die Nachreinigung des alkalischen Kantenisoliationsprozesses zu validieren, wurden symmetrische Lebensdauerproben hergestellt. Beide Seiten der Proben wurden nach dem typischen TOPCon Prozessfluss für die Herstellung der Zellrückseite behandelt (siehe auch Abbildung 4, links). Statt zu metallisieren wurde lediglich die Passivierschicht durch thermische Behandlung aktiviert und anschließend Lebensdauerermessungen durchgeführt. Über die Lebensdauerermessungen an Teststrukturen dieser Art kann der Einfluss der Zellrückseite auf die implizierte Leerlaufspannung (*iVoc*) bewertet werden, welcher ein Maß für Reinigung und Passivierbarkeit der Oberflächen darstellt. Es konnte gezeigt werden, dass sich mit der aktuellen Polysilizium Dicke ohne aufwändige zusätzliche Nachreinigung vor Tunneloxid und Poly Abscheidung (G1) bereits *iVoc* Werte von 731 mV erzielen lassen. Hierdurch konnte MS 2.1 bereits erreicht werden. Bei einer Reduktion der Annealtemperatur um 30°C steigt dieser Wert um 7 mV, was sich für die Zukunft bei weiterer Optimierung der Siebdruckpasten als vielversprechender Weg in der TOPCon Route erweisen könnte. Es ist zu anmerken, dass die *iVoc* Werte nur mittig auf dem Wafer gemessen wurden. Da die PL Intensitäten, die mit den *iVoc* Werten korrelieren, gerade bei den dicken Poly Schichten sehr inhomogen sind, liegen die tatsächlichen Werte dieser Gruppen sehr wahrscheinlich niedriger. In der Zukunft wird daher dazu übergegangen, orts aufgelöst *iVoc* Daten über Kopplung mit der PL aufzunehmen.

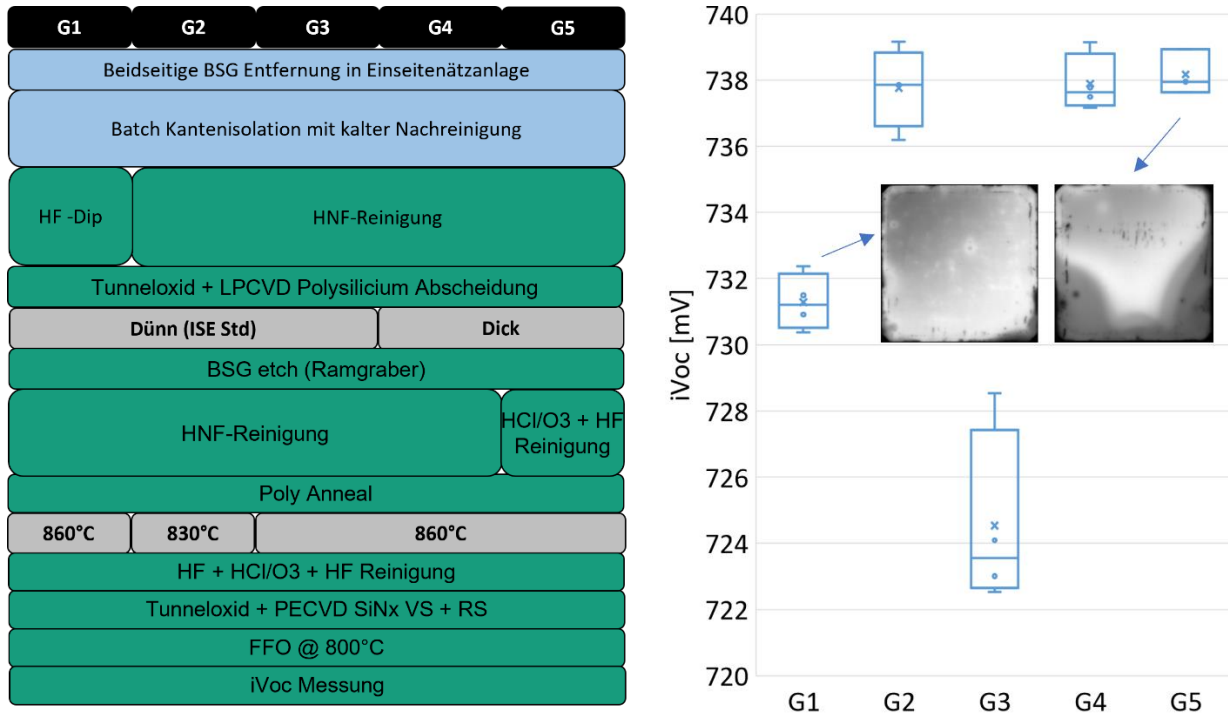


Abbildung 4: Prozessfluss für Lebensdauerproben von symmetrischen TOPCon Rückseitenproben (links) sowie iVoc Ergebnisse mit PL Bildern eines Wafers aus G1 und G5 (rechts).

2.2 Einseitige Ätzprozesse (AP4)

2.2.1 Kantenisolation und BSG Ätze (AP4.1)

Um eine elektrische Isolierung der vorder- und rückseitigen Kontakte der Solarzelle zu erzielen, ist Entfernung des in einem Hochtemperaturschritt im Rohrofen allseitig eindiffundierten Emitters auf Waferrückseiten und- Kanten erforderlich. Diese Kantenisolation (chemical edge isolation, CEI) wird industriell über einem nasschemischen Prozessschritt umgesetzt, unter anderem, da diese zu einer Politur der Waferrückseiten führt, wodurch deren Passivierungseigenschaften verbessert werden. Bisher findet diese CEI in der Regel in Durchlaufanlagen im sauren Milieu statt. Hierbei kommt eine Lösung aus Flusssäure (HF), Salpetersäure (HNO₃) sowie häufig auch Schwefelsäure (H₂SO₄) zum Einsatz. Da jede dieser Chemikalien toxisch sind und die Aufreinigung der entstehenden Stickoxid belasteten Abluft kostenintensiv ist, wurde in diesem Arbeitspaket ein Ansatz untersucht, in welchem die CEI ohne Ein-

satz von HNO_3 oder H_2SO_4 in einer alkalischen Lösung aus heißer Kalilauge (KOH) erfolgt.

Der neuartige Ansatz des alkalischen Kantenisoliationsprozesses der im Rahmen von TOPCon Cluster entwickelt wurde, besteht aus zwei Teilprozessen, die in Abbildung 5 dargestellt sind.

**Einseitige saure BSG Entfernung auf Wafer-
rückseite und Kanten**

**Alkalische Emitterentfernung auf Rückseite und
Kanten sowie Nachreinigung**

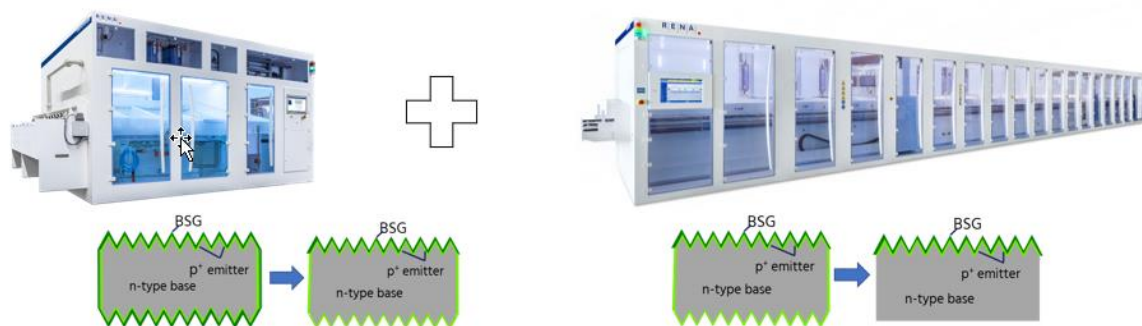


Abbildung 5: Darstellung der Prozessequenz für eine alkalische Batch Cluster Kantenisolation.

Zunächst soll analog zur sauren Kantenisolation die rückseitige Borosilikatglas (BSG) Schicht, die bei der Diffusion eines Boremitters entsteht in einem Inlineprozess entfernt werden. Im Anschluss daran sollen die Wafer in eine Batch Anlage transferiert werden, in welcher die eigentliche alkalische Kantenisolation durch Ätzen des Boremitters auf der Rückseite und an den Kanten der Wafer durch heißalkalisches Ätzen entfernt wird. Das vorderseitige BSG soll hier als Maskierung zum Schutz des vorderseitigen Boremitters genutzt werden. Im Anschluss an die CEI soll in dieser Batchanlage eine Oberflächenreinigung erfolgen, welche eine ausreichende Sauberkeit der Waferoberflächen vor der anschließenden Tunneloxid sowie TOPCon Abscheidung gewährleistet. Diese Art des Prozesses gekoppelt aus Inline- und Batch-Prozessierung wird im Folgenden Batch Cluster CEI genannt.

Ein Vorteil eines in dieser Art abgewandelten Prozessansatzes ist eine Vermeidung von HNO_3 und H_2SO_4 , was in der Folge zu erheblich niedrigeren Entsorgungskosten der Prozesschemikalien führen würde. Zudem kann durch ein Vermeiden eines Inlineprozesses bei der eigentlichen Kantenisolation und der Nachreinigung bleibt ein mechanischer Kontakt der Wafer zum Transportsystem aus, welches mechanische Defekte und potentielle Verunreinigungen durch das Transportsystem vermeidet. Ein

weiterer Vorteil ist, dass sich die Durchsätze im Verhältnis zum Flächenbedarf der Anlage bei Batchanlagen besser steigern lassen, als für Inleanlagen, was somit den Flächenbedarf für die Produktion der Solarzellen verringert.

Um die grundsätzliche Eignung dieses Prozessprinzips sowie die benötigte Ätztiefe bei der Batch Cluster Kantenisolation zu ermitteln, wurden in Kooperation mit dem Fraunhofer ISE TOPCon Zellen erstellt. Der Prozessfluss des Zellexperimentes ist in Abbildung 6 dargestellt.

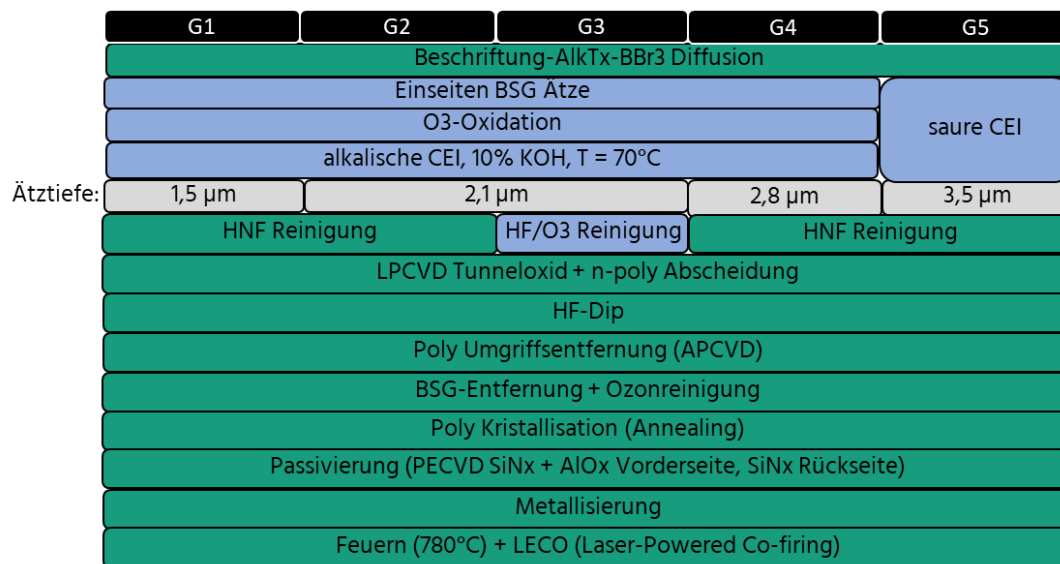


Abbildung 6: Prozessfluss zur Validierung einer alkalischen Batch-CEI im TOPCon Zellprozess. Grün: Prozess am Fraunhofer ISE; Blau: Prozess bei RENA.

Für den alkalischen CEI Schritt wurde eine Abtragsvariation durchgeführt (1.5-2.8 µm). Zur Abreinigung von KOH Rückständen wurden die Wafer anschließend in einer Sequenz aus 110°C HNO₃ gefolgt von einem HF Schritt gereinigt (HNF Reinigung). Um eine kostengünstigere, HNO₃ freie Nachreinigung zu testen wurde zudem eine Gruppe mit alkalischer CEI in einer Ozon-HF Lösung nachgereinigt Als Referenz wurde eine saure CEI mit einem Abtrag von 4 µm sowie einer HNF Nachreinigung prozessiert. Die weiteren Prozessschritte entsprachen der derzeitigen ISE standard-Route für die Fertigung von TOPCon Zellen. Die wichtigsten Solarzellparameter sind in Abbildung 7 zu sehen.

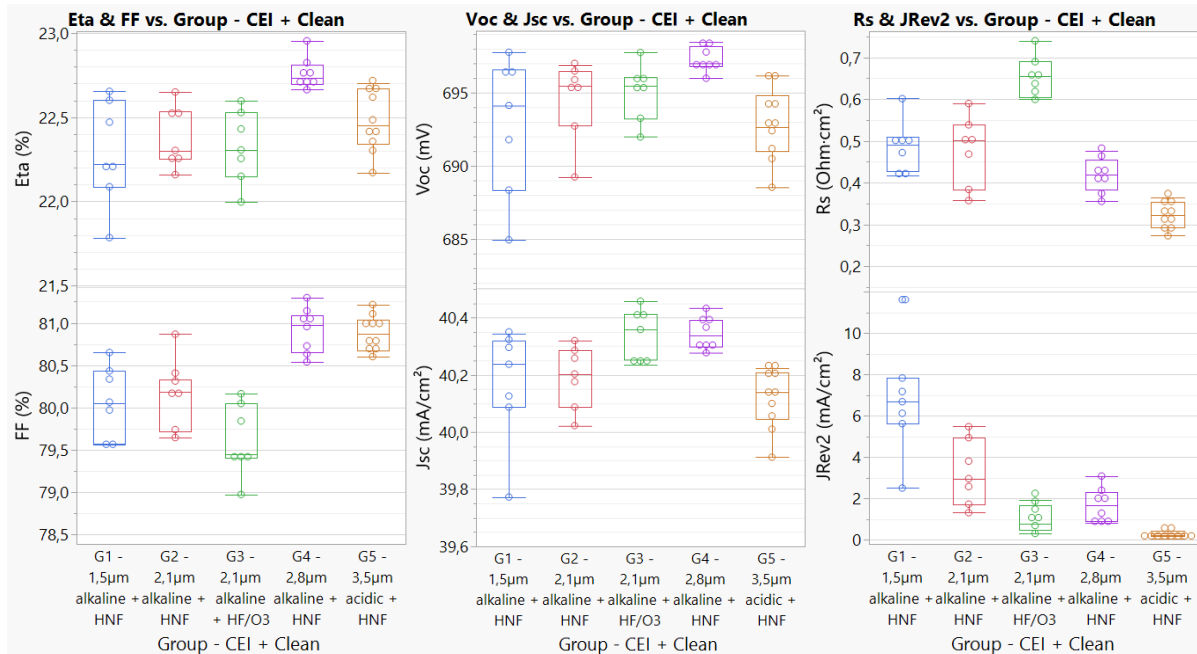


Abbildung 7: Zellparameter der gefertigten TOPCon Zellen; Links: Effizienz η (%) und Füllfaktor FF (%); Mitte: Leerlaufspannung V_{OC} (mV) und Kurzschlussstrom J_{SC} (mA/cm²); Rechts: Serienwiderstand (R_s) und Rückwärtsstromdichte bei Rückwärtsspannung ($J_{rev,2}$).

Sie zeigen, dass die Gruppen, die mit einer alkalischen Batch Cluster-CEI behandelt wurden auf einem vergleichbaren Effizienzniveau liegen, wie die Referenzgruppe. Zudem wird deutlich, dass sich mit einer HF-Ozon Reinigung vergleichbare Effizienzen erreichen lassen wie mit der aufwändigeren HNF Reinigung. Ein höherer Abtrag führt für die alkalische CEI zu einer Effizienzsteigerung. So liegt der mittlere Wirkungsgrad von Gruppe 4 mit 22,76% um 0,3% absolut höher als der der Referenzgruppe. Vorteile der alkalischen Batch-CEI sind zudem durch gesteigerte V_{OC} als auch J_{SC} Werte erkennbar. Allerdings zeigten sich bei den Gruppen 1-3 Verluste im Füllfaktor, deren Ursache sich auf die zu dieser Zeit verwendeten Siebdruckpasten zurückführen lässt. Die Siebdruckpasten waren auf die Oberflächenmorphologie nach saurer CEI eingestellt, jedoch liefert ein alkalische Ätzprozess deutlich andere Oberflächenstrukturen.

Hinsichtlich der Qualität der Kantenisolation kann der Rückwärtsstrom $J_{rev,2}$ verwendet werden, der ein Maß für die elektrische Isolation zwischen Zellvorder- und Rückseite ist. Bei dieser Messung wird eine Spannung in Rückwärtsrichtung an die Zelle angelegt und der fließende Strom von der Rückseite zur Vorderseite gemessen. Je

niedriger dieser Strom ist, desto besser die Isolation zwischen Solarzellen Vorder- und Rückseite. Fällt dieser Wert zu hoch aus, so können im Modul Ströme in Rückwärtsrichtung fließen, die eine Hotspotbildung und im schlimmsten Falle einen Brand verursachen können. Um dieses zu vermeiden, werden für Solarzellen üblicherweise Werte von $J_{rev,2} < 1 - 2 \text{ mA/cm}^2$ als ausreichend niedrig angesehen. Für die Zellergebnisse zeigte sich, dass der $J_{rev,2}$ für die saure Kantenisolation am niedrigsten ausfällt. Allerdings war hier der Abtrag mit $4 \mu\text{m}$ auch am höchsten. Für die alkalischen Batch CEI Gruppen sinken die Rückwärtsströme mit steigendem Abtrag – erst ab einem Abtrag von $2,8 \mu\text{m}$ zeigen sich Werte im Mittel unterhalb von 2 mA/cm .

Um niedrige $J_{rev,2}$ Daten zu erhalten, ist es wichtig, dass das BSG insbesondere von den Kanten der Wafer im Inline Prozess entfernt wird. In der sauren CEI werden Gläser wie BSG durch den HF Anteil ebenfalls geätzt. Im alkalischen Ätzprozess sind insbesondere BSG Ätzraten aber sehr niedrig. Um niedrige $J_{rev,2}$ Werte bei hohem Durchsatz in einer Inline Anlage realisieren zu können, wurde ein weiteres Experiment durchgeführt, in dem insbesondere der Einfluss einer Temperaturerhöhung der HF Lösung in der Einseitenätzanlage untersucht wurde. Die Ergebnisse dieser Zellcharge sind in Abbildung 8 dargestellt.

Hier zeigt sich zunächst, dass eine HF Konzentrationssteigerung bei gleichbleibendem Vorschub in der Inline Ätzanlage zu niedrigeren $J_{rev,2}$ Werten führt und auch zu einem verringerten Kantenleuchten in Thermographie-Aufnahmen führt (siehe Abbildungen oberhalb des Graphen in Abbildung 8). Es lassen sich nun vergleichbare $j_{rev,2}$ Werte im Vergleich zu einer sauer kantenisolierten Referenzgruppe erzielen (G6 und G10). Über eine zusätzliche Temperaturerhöhung lässt sich zudem der Durchsatz bei gleicher Konzentration verdoppeln, ohne dass sich dies nachteilig auf $j_{rev,2}$ auswirkt (G6 und G8). Dies lässt sich auf eine erhöhte BSG Ätzrate zurückführen.

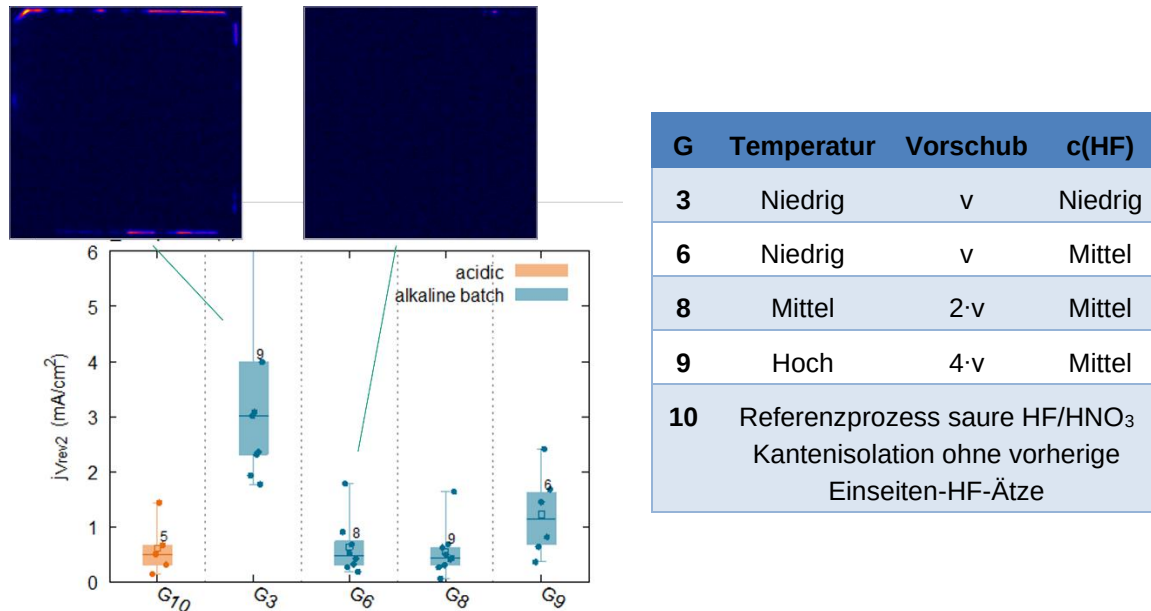


Abbildung 8: Einfluss der einseitigen BSG Entfernung vor alkalischer Batch CEI auf die gemessenen Rückwärtsströme $j_{rev,2}$.

2.2.2 Einseitige Entfernung von LPCVD und PECVD TOPCon Schichten (AP4.2)

Bei Beschichtung des Wafers mit einer dotierten poly-Silizium-Schicht (TOPCon) wird typischerweise auch auf der Frontseite der Zelle parasitär ein gewisser Umgriff am Rand erzeugt, welcher im Anschluss mittels eines Einseiten-Ätzprozesses entfernt werden soll. Abbildung 9 zeigt die beschriebene Situation beispielhaft. Das BSG auf der Frontseite schützt den Boremitter und ein einseitiger Ätzprozess in einer Inline Anlage ermöglicht hierbei ein Ätzen des Umgriffs auf der Vorderseite in heißalkalischer Lösung zu ohne dabei die Rückseite und damit die bereits bestehende poly-Si-Schicht zu schädigen. Zusätzlich soll eine Ätzung der Kanten eine Reduzierung des Rückwärtsstroms erzielen und verhindern – wie schon in Kapitel 3.2.1 beschrieben – dass Rückwärtsstrom induzierte Probleme im Modul auftreten.

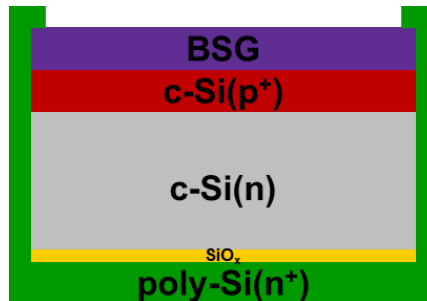


Abbildung 9: Schema eines Wafers vor Durchführung des einseitigen Ätzprozesses, in grün dargestellt die poly-Si-Schicht mit zu entfernendem Umgriff auf die Frontseite.

Um diesen Prozess in einer Inline Anlage zu realisieren, wurde ein Anlagenkonzept entwickelt, welches in Abbildung 10 schematisch dargestellt ist. Ein kurzes, als „Precon“ bezeichnetes HF-Bad zur Entfernung von Oxiden von der vorderseitigen Oberfläche ist notwendig, dass Oxide nicht den anschließenden heißalkalischen Prozess für zur Entfernung des poly-Si-Umgriffs verzögern. Im Anschluss an die alkalischen Ätzbecken folgen ein HF/HCl-Becken zur möglichen Entfernung von PSG- bzw. BSG-Schichten und ein weiteres HF/HCl-Bad zur zusätzlichen Reinigung vor Abscheidung des Passivierstacks aus Aluminiumoxid und Siliziumnitrid.

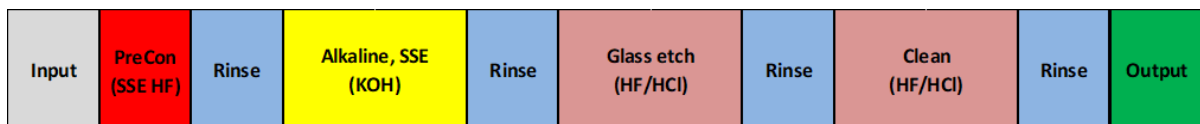


Abbildung 10: Anlagenkonzept von RENA für die exklusive Einseitenätze von z.B. poly-Si-Umgriff auf der Frontseite von TOPCon-basierten Solarzellen.

In ersten Experimenten wurde der Einfluss der Prozesstemperatur und der KOH-Konzentration auf den Ätzabtrag im alkalischen, einseitigen Ätzprozess untersucht. Hierfür wurden zunächst kristalline Siliziumwafer statt poly Siliziumschichten untersucht, da davon ausgegangen wurde, dass die Ätzraten der dotierten Poly-Si Schichten ähnlich ausfallen werden.

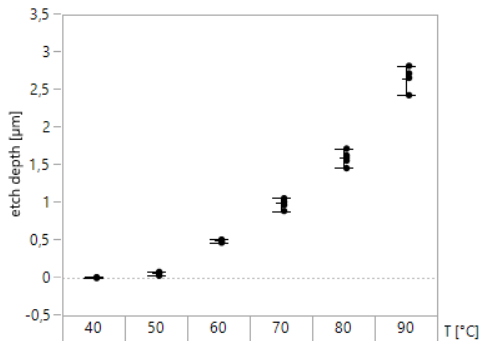


Abbildung 11: Ätzabtrag in μm als Funktion der Prozesstemperatur im Bereich von 40-90 °C.

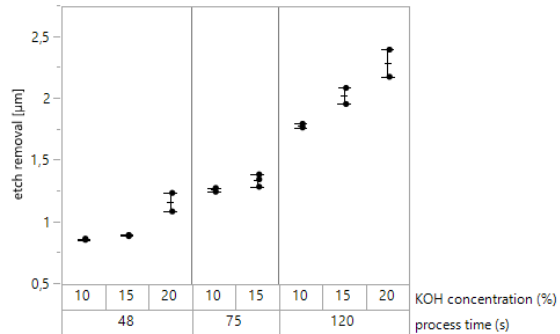


Abbildung 12: Ätzabtrag in μm als Funktion der KOH-Konzentration für drei Prozesszeiten (48, 75, 120 s).

In **Abbildung 11** ist der Ätzabtrag in μm für verschiedene Prozesstemperaturen dargestellt. Zunächst ist zu erkennen, dass eine gewisse Mindesttemperatur für die Reaktion notwendig ist, da bei $T < 50\text{ °C}$ kein nennenswerter Abtrag generiert wird. Im Bereich von 60 bis 90 °C ist jedoch ein signifikanter Anstieg von ca. 0,5 μm bei 60 °C bis auf $> 2,5\text{ }\mu\text{m}$ im Falle von 90 °C zu erkennen. Daraus folgt, dass die Prozesstemperatur ein signifikanter Parameter zur Erhöhung des Ätzabtrags ist. **Abbildung 12** stellt den Einfluss der KOH-Konzentration auf den Ätzabtrag für verschiedene Prozesszeiten dar. Es zeigt sich ein Anstieg der Abhängigkeit der Ätzrate von der KOH-Konzentration für höhere Prozesszeiten (48 s vs. 120 s). Im Bereich der Prozesszeit von 48 bzw. 75 s (beziehungsweise für Abträge im Bereich von ca. 1 μm) ist kein wesentlicher Unterschied für KOH-Konzentrationen im Bereich von 10-15 % zu erkennen. Daher kann hier zur Kosteneinsparung auf eine KOH-Konzentration von 10 % reduziert werden. Im Bereich von Abträgen $> 2\text{ }\mu\text{m}$ wird der Einfluss der KOH-Konzentration jedoch signifikant und stellt dort durchaus einen Parameter zur Prozessoptimierung dar. Für die Poly Silizium Umgriffsentfernung sind jedoch Abträge unterhalb von 1 μm erforderlich, womit eine Konzentration von 10 wt% KOH als ausreichend angesehen werden kann.

Unterhalb der Poly-Si Schicht befindet sich insbesondere an den Kanten der Wafer eine Tunneloxidschicht, die als zwischenzeitlicher Ätzstopp im KOH Prozess wirken könnte. Über diese könnte der Ätzprozess verzögert, d.h. die unter dem Oxid liegende n-dotierte Si-Schicht, die zur Isolation der Waferkante ebenfalls entfernt werden muss, nicht geätzt werden.

Aus diesem Grund wurde ein Experiment mit Einzel- und Doppelsequenzen von HF- und KOH-Ätzschritten durchgeführt. Tabelle 1 zeigt die Sequenzen, wobei die Zahlen

1-5 in den Gruppen für unterschiedliche per Beschichtung aufgebrauchte Schutzschichten der Rückseite (thermische bzw. Plasma-Oxide) stehen und die Buchstaben symbolisieren die Prozessvariationen. Es wurden sowohl HF-KOH-Einzel- (Gruppen d/e), als auch Doppelsequenzen (Gruppen a/b/c) mit unterschiedlichen Prozesszeiten und auch bei höher Prozesstemperatur (c/d/e) durchgeführt. Gruppe 1 und 2 sind Referenzprozesse zum Vergleich der Solarzellenparameter mit dem aktuellen Standardprozess.

Tabelle 1: Übersicht über die prozessierten Gruppen mit Einzel- und Doppelsequenzen und Variation der Prozesszeiten von HF- und KOH-Schritt.

Gruppe	HF-1	KOH-1	HF-2	KOH-2	Kommentare
1	-	-	-	-	Referenz 1
2	-	-	-	-	Referenz 2
3a	t1	t2	t1 -5s	t2	-
3b					-
4a/5a				t2 + 30s	-
4b/5b		t2 + 20s	-	t2 + 20s	-
4c/5c		t2 + 20s, höhere T			-
4d/5d		t2 + 40s, höhere T		-	-
4e/5e		t2 + 30s, höhere T	-	-	-

Verwendet wurde industrielles Cz-Silicium-Material, welches einen diffundierten Emitter und ein BSG auf der Vorderseite der späteren Solarzelle besitzt. Die Beschichtung der poly-Silicium-Schicht auf der Rückseite verursacht bereits erwähnten parasitären Umgriff auf der Vorderseite, welcher entfernt werden soll. Jede Gruppe erhielt vor dem alkalischen Ätzschritt eine Behandlung mit HF (9 %, Prozesszeit t1), um die Oberfläche auf das Ätzen vorzubereiten (z.B. Entfernung native Oxidschicht). Danach folgen die bereits gezeigten Variationen (siehe Tabelle 1).

In Abbildung 13 sind die erzielten Zellparameter dargestellt. Die Referenzen erreichten eine Effizienz von knapp 22,9%. Es zeigen sich keine signifikanten Trends bzw. Abhängigkeiten zwischen den verschiedenen Gruppen. Die besten Effizienzen erreichten die Gruppen mit den kürzesten Doppelsequenzen (Gruppe 3a und 3b) mit 22,95 % bzw. 22,98 %. Weitere Analyse mittels Elektrolumineszenz zeigte jedoch, dass diese Gruppen einen Kurzschluss von Vorder- und Rückseite durch nicht vollständig entfernte Beschichtung an den Substratkanten besaß. Weiterhin unterliegen

einige Gruppen großen Schwankungen, welche näher analysiert werden sollen. Allgemein liegen sämtliche Proben allerdings bereits in dieser frühen Phase der Experimente auf einem sehr guten Niveau ($\eta > 22,5\%$). Im weiteren sollen die Prozesszeiten der Einzel- und Doppelsequenzen genauer untersucht werden. Weiterhin gilt es den Einfluss der unterschiedlichen Schutzschichten auf der Rückseite auf die Effizienz zu untersuchen. Ein dritter Fokus ist die detailliertere Analyse des Rückwärtsstromverhaltens und der Charakteristik der Elektrolumineszenzbilder hinsichtlich Kurzschlüssen an den Substratkanten.

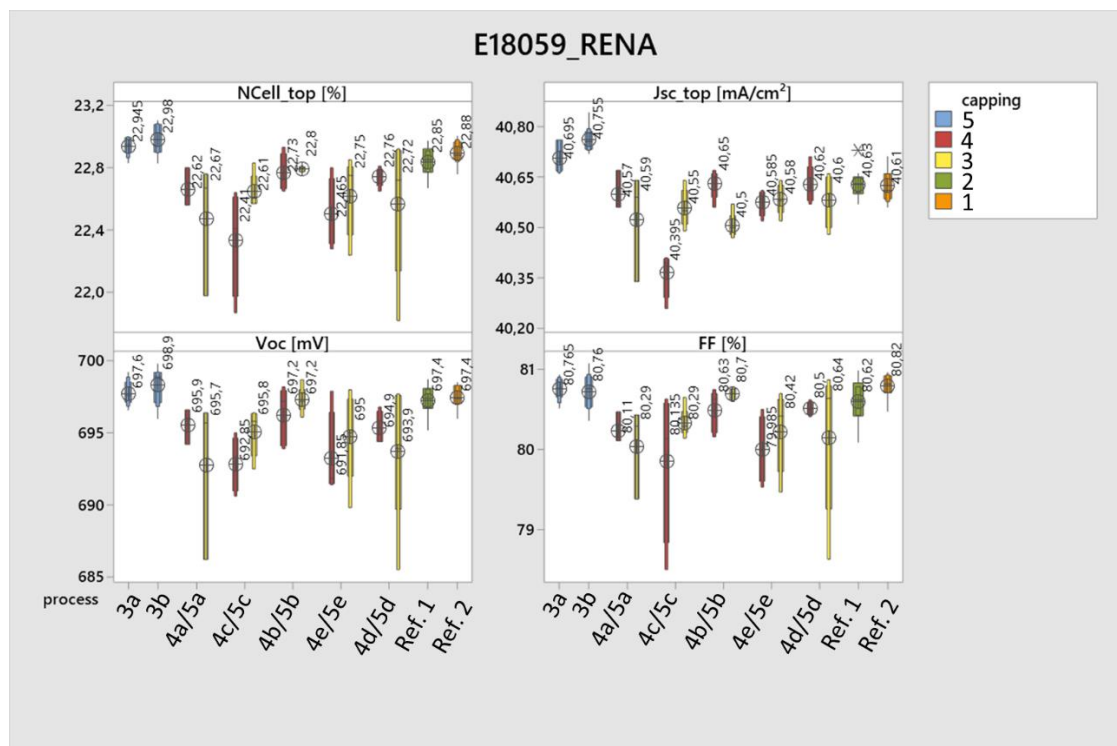


Abbildung 13: Effizienz η (%), Kurzschlussstrom J_{sc} (mA/cm²), Leerlaufspannung V_{oc} (mV) und Füllfaktor FF (%) der fertiggestellten Solarzellen.

Es konnte im untersuchten Bereich kein Vorteil einer Sequenz KOH-HF-KOH gezeigt werden. Das könnte darauf zurückgeführt werden, dass das unter dem Poly Si liegende Tunneloxid ebenfalls phosphordotiert ist und so wie ein sehr dünnes PSG wirkt, welches in KOH im Vergleich zu thermischen Oxiden oder BSG Schichten eine deutlich erhöhte Ätzrate aufweist.

Um herauszufinden, wie sich die Qualität der nasschemischen Poly Si Ätze charakterisieren lässt, wurde ein Experiment durchgeführt, indem zwei verschiedene Kantenisoliationsprozesse (sauer und alkalisch) mit zwei Ätzdauern des Poly Si im inline Prozess über Kreuz verglichen wurden. Zur Analyse der Kantenisoliationsqualität

wurde - wie auch bei der Batch Cluster CEI (siehe Kapitel 3.2.1) – der Rückwärtsstrom ($j_{rev,2}$) herangezogen. Es zeigte sich, dass die Dauer der Umgriffsentfernung $j_{rev,2}$ ebenfalls erhöht, wenn die Ätzdauer in der Poly Siliciumätze nicht ausreichend ist (siehe Abbildung 2). Über die saure Referenz können Einflüsse der Einseiten-BSG-Ätze hierauf ausgeschlossen werden. Eine zu geringe Ätzdauer wird beim Poly Ätzen in der Inline Anlage ebenfalls durch eine geringere Photoluminiszenz (PL) Intensität deutlich (Abbildung 14, rechts).

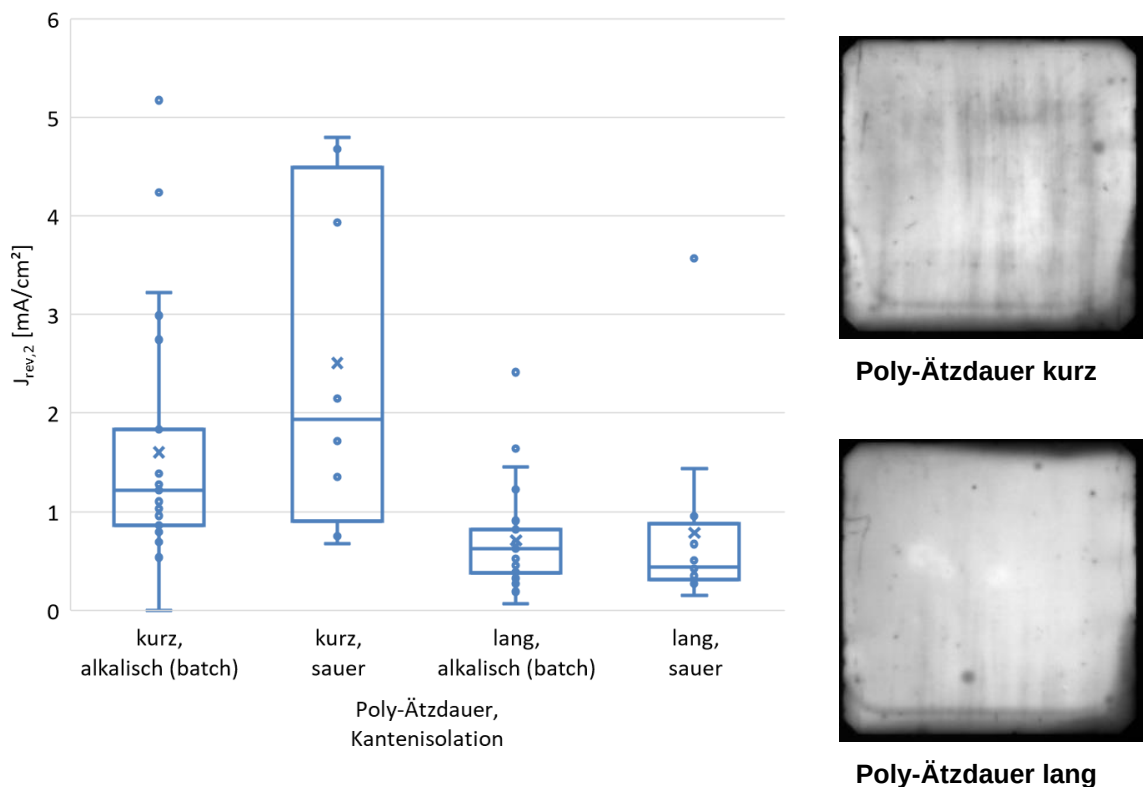


Abbildung 14: Einfluss der nasschemischen Polyätzdauer auf $j_{rev,2}$ (links) sowie auf PL Intensitäten (rechts)

Bei einer vollflächigen LPCVD Polyabscheidung auf beiden Seiten des Wafers, wie im beschriebenen Experiment erfolgt, ist eine Verlängerung des Poly-Ätzprozesses für die Zellvorderseite unkritisch. Anders verhält es sich, wenn die Wafer in den Booten der LPCVD Polyabscheidung front-to-front gemeinsam in einem Slot platziert werden, um den Durchsatz zu erhöhen. Hierbei ist der Großteil der Vorderseite nicht von Polysilicium bedeckt und dem Angriff des Ätzmediums zur Poly-Entfernung ausgesetzt. Gerade in Verbindung eines zunächst intrinsisch abgeschiedenen Polysiliciums welches anschließend phosphordotiert wird, ätzen die so entstehenden Boro-Phosphorsilikatglas Schichten vergleichsweise schnell in alkalischen Medien. Hier-

durch reduziert sich die maximale Ätzdauer um den vorderseitigen Emitter nicht zu schädigen erheblich.

Um Inline und auch Batchverfahren auch für diese Prozesssequenzen zu entwickeln, wurden erste Versuche zu Additiven durchgeführt, die zum einen die Ätzrate von Silicium, zum anderen die Selektivität der Ätzung von Silicium und dotierten Siliciumoxidschichten erhöhen sollen. Erste Versuche im Becherglas haben zeigen können, dass Additive durchaus eine Ätzratenverringerung von dotierten Glasschichten bewirken können (siehe Abbildung 15). Auch ein leichter Anstieg der Siliciumätzrate ist zu verzeichnen.

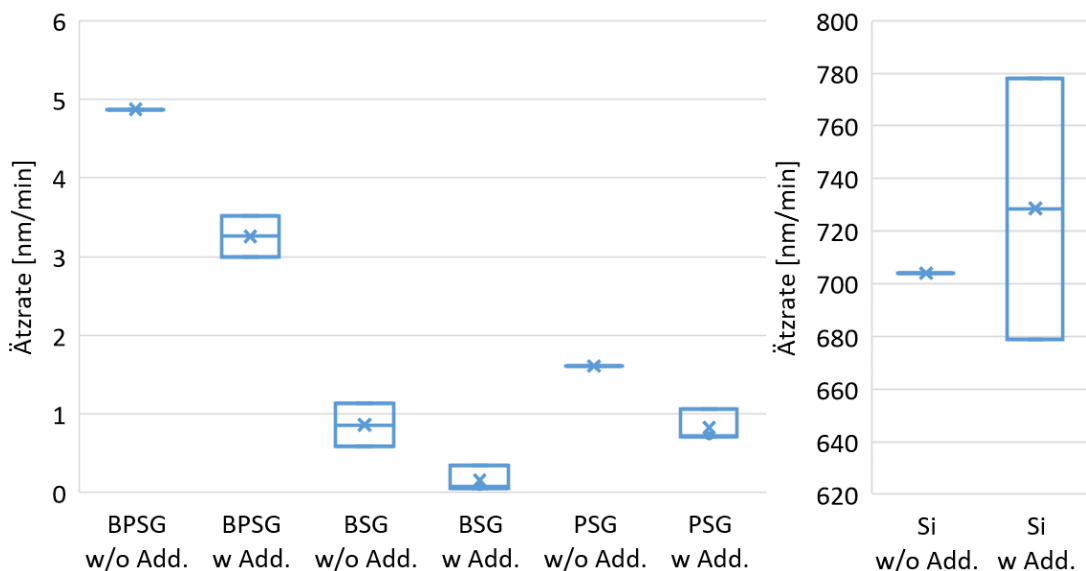


Abbildung 15: Ergebnisse von Becherglasversuchen zu unterschiedlich dotierten Oxidschichten und Silizium mit und ohne Zugabe von Additiv.

Im weiteren Verlauf des Projektes wurde eine Zellcharge mit ex situ abgeschiedenem LPCVD Polysilicium durchgeführt, um einen Prozess zur nasschemischen Umgriffsentfernung im Batch Cluster Verfahren zu validieren. Die Wafer wurden in der Polysilicium Abscheidung „single slot“ prozessiert, d.h. auf beiden Seiten der Wafer wurde vollflächig Polysilicium abgeschieden, wie es auch in industriellen Prozessen ein gängiges Verfahren ist. Auf diese Art kann die Bildung von BPSG (Bor-Phosphosilikatgläser) vermieden werden, welche durch eine ungünstige Abstimmung des Polyabscheidungs- und POCl_3 Diffusionsprozesses entstehen können, und welche deutlich schneller ätzen, als BSG oder PSG Schichten. Dies kann im schlimmsten Fall eine nasschemische Umgriffsentfernung ohne den vorderseitigen Emitter anzugreifen, sehr aufwändig gestalten. Der durchgeführte Versuchsplan zur Herstellung der TOPCon Solarzellen ist in Abbildung 16 gezeigt.



Abbildung 16: Prozessfluss des Experiments von TOPCon Zellen mit ExSitu Poly Abscheidung sowie Photolumineszenz (PL) Aufnahmen je eines Wafers pro Gruppe mit gleicher Skalierung.

Hierbei wurde die im ExSitu Poly Prozess aufgewachsene Phosphorsilikatglas (PSG) Schicht auf der Wafervorderseite zunächst in einem einseitigen Inline Prozess in Flusssäure entfernt. Die nun freiliegende vorderseitige Poly-Silizium Schicht wurde im Becherglas unter Variation der Prozessbedingungen (G01 – G06) geätzt. Zum Einen wurde die Ätzdauer in der heißalkalischen Lösung Variiert, zum Anderen wurde die Prozessdauer der vorderseitigen Borsilikatglas (BSG) – Ätze variiert.

Als Referenzgruppe wurde die vorderseitige Poly-Silizium Entfernung mittels Atmospheric Dry Etch (ADE) Verfahren realisiert, der derzeitige Standardprozess in der ISE TOPCon Route. Für G01 – G05 wurde der Ätzlösung ein hochsiedendes organisches Additiv beigelegt. Durch dieses sollte die Ätzrate von Siliziumoxiden reduziert und somit die Maskierung der rückseitigen Poly-Silizium-Schicht durch das PSG verbessert werden. In G06 wurde auf die Verwendung des Additives verzichtet. Im Vergleich zwischen G03 und G06 zeigt sich deutlich die Wirksamkeit des Additivs: Die Intensität, die als Maß für die Oberflächenpassivierungsqualität der Solarzellen dient, ist für G06 erheblich geringer als für G03. Dies ist darauf zurückzuführen, dass ohne Additiv die PSG Schicht als Maskierung nicht ausreichte und somit die rückseitige Poly-Silizium Schicht entfernt wurde. Die PL Intensitäten aller anderen Gruppen sind auf ähnlichem Niveau, hier wurde die rückseitige Poly-Silizium Schicht nicht angegrif-

fen. Eine Variation der BSG-Ätzdauer zeigte keinen signifikanten Einfluss auf die PL Intensität.

In Abbildung 17 sind die wichtigsten Zellparameter der gefertigten TOPCon Solarzellen dargestellt. G06 wurde wegen der unzureichenden Rückseitenmaskierung im Poly-WARP nicht weiter betrachtet. Es wird deutlich, dass mit steigender Ätzdauer im Poly-WARP $J_{rev,2}$ reduziert wird. Dieser Effekt zeigt sich bei den Gruppen mit kurzer (G01-G03) sowie mit langer BSG Ätze (G04-G05) gleichermaßen. Für G03 ließen sich Werte unterhalb von 2 mA/cm² erzielen. Es ist anzumerken, dass für die kürzeste Poly-WARP Ätzdauer (G01, G04), die $J_{rev,2}$ -Werte zu hoch für eine Messung waren. Die Werte wurden hier zu 15 mA/cm² angenommen. Es fällt zudem auf, dass Wirkungsgrade (η) sowie Füllfaktoren (FF) für die niedrigen Poly-Warp Ätzdauern reduziert sind. Dieses ergibt sich aus einem erhöhten Serienwiderstand (R_s). Begründet werden kann dies damit, dass die Metallisierung auf relativ niedrigen Temperaturen gefeuert wurden, um eine hohe Passivierqualität zu erhalten. Die Metall-Halbleiterkontakte werden erst im Anschluss durch LECO (Laser Enhanced Contact Optimization) vollständig ausgebildet. Es wird davon ausgegangen, dass erhöhte $J_{rev,2}$ -Werte ebenfalls negative Auswirkungen auf diesen Prozess haben, da der hierfür nötige Stromfluss zu einem größeren Anteil statt über die Kontakte über die Waferkanten fließt. Es lässt sich zudem erkennen, dass die G03 niedrigere $J_{rev,2}$ Werte als der Referenzprozess G07 aufweist. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass der Referenzprozess auf die InSitu Route eingestellt ist und weitere Parameteroptimierungen für die ExSitu Poly Route erforderlich sind.

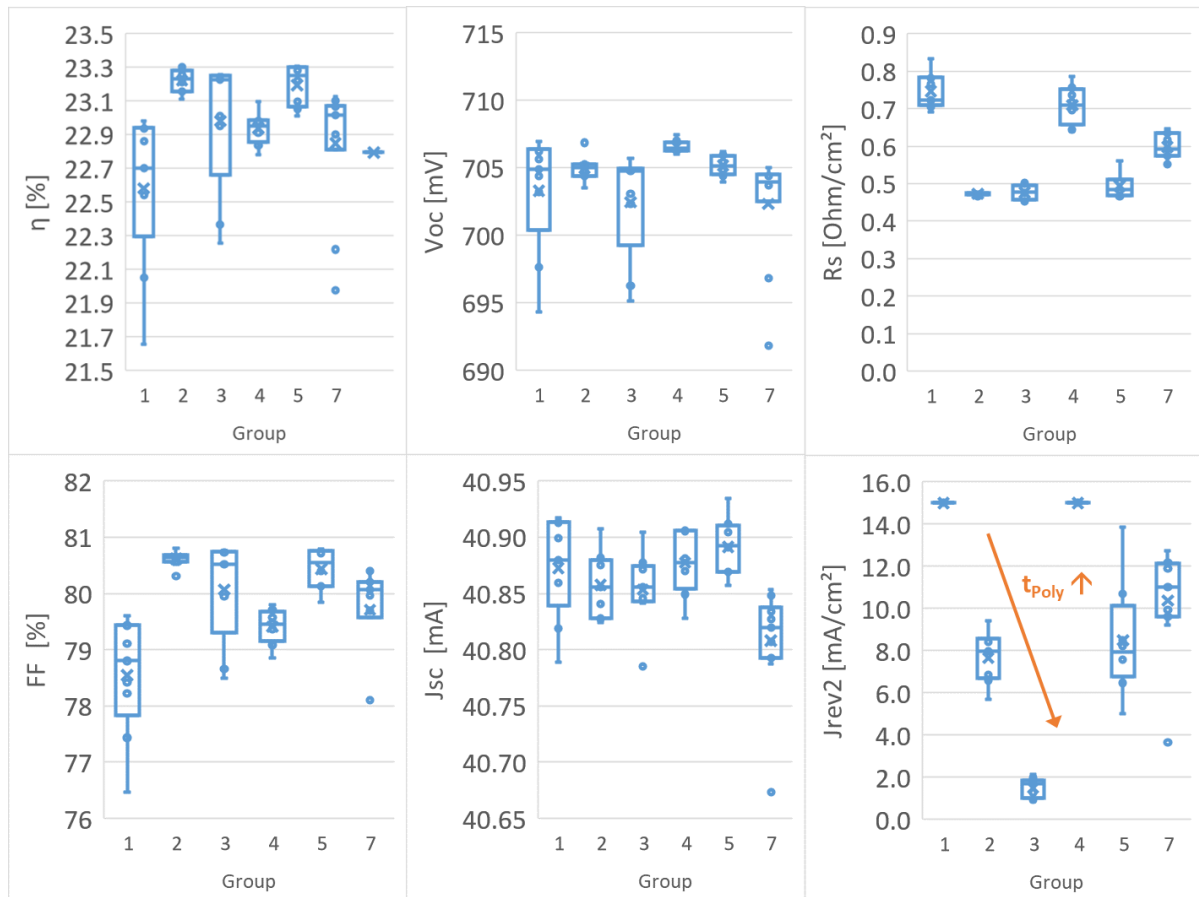


Abbildung 17: Zellparameter der TOPCon Zellen nach RENA in-house Messung.

Hierüber konnte gezeigt werden, dass der Poly-WARP Prozess im Batch Verfahren mit Additiv für singleslot Ex-Situ-Poly-Si Wafer möglich ist. Werte von $J_{rev,2} < 2 \text{ mA/cm}^2$ konnten erzielt werden.

Um den Poly-WARP (Wrap Around Removal Process) zu validieren und weiter zu optimieren wurde im Anschluss der in Abbildung 18 dargestellte Versuchsplan für eine weitere TOPCon Zellcharge mit ExSitu Poly Si durchgeführt. Nach der Entfernung des vorderseitigen Phosphorsilikatglases, welches bei der Dotierung der Poly-Schichten entsteht, wurde der vorderseitige Poly-Si Umgriff in einem alkalischen Batch Prozess unter Verwendung eines hoch siedenden organischen Additivs entfernt. Hierbei wurden Prozesszeiten sowie Temperaturen variiert, um niedrige $J_{rev,2}$ Werte bei möglichst geringen Prozesszeiten zu erzielen, um die Anlagendurchsätze zu erhöhen.

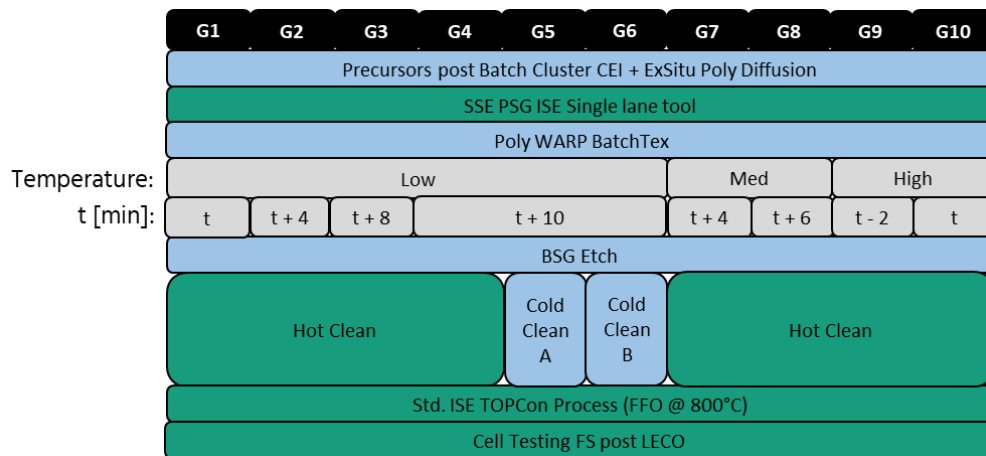


Abbildung 18: Prozessfluss des Versuchsplanes für TOPCon Solarzellen mit Variationen des Poly-WARP Prozesses nach dem Batch-Cluster Ansatz mit Variationen in Prozessdauer, Temperatur und Nachreinigung.

Hierbei fiel zunächst auf, dass das von uns verwendete Wafermaterial offenbar recht inhomogene Lebensdauern aufweist, wie sich in den Photoluminiszenzdaten (PL) in Abbildung 19 erkennen lässt.

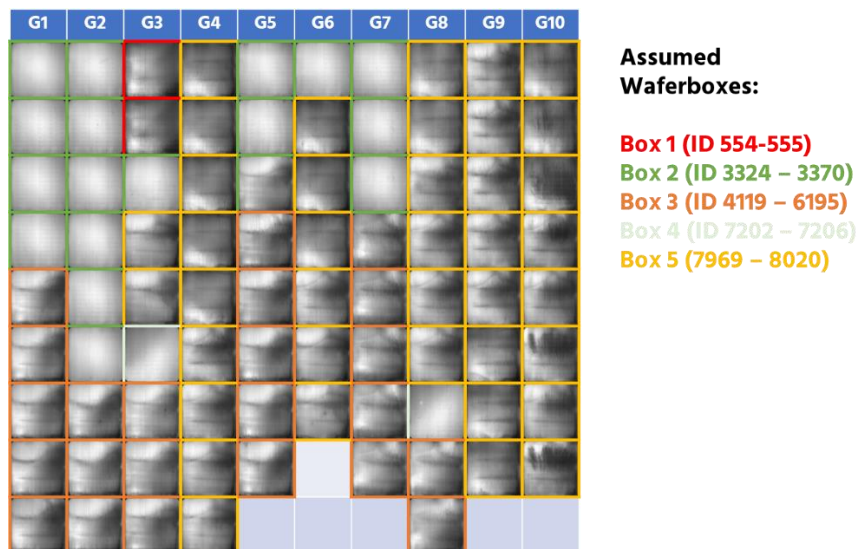


Abbildung 19: Über die Gruppen verteilte, unterschiedliche PL Intensitäten die sich auf das verwendete Basismaterial zurückführen lassen.

Die hierdurch induzierten starken Schwankungen in den Zellparametern, wie in Abbildung 20 exemplarisch anhand der Wirkungsgrade der Zellen aus Gruppe 1 gezeigt.

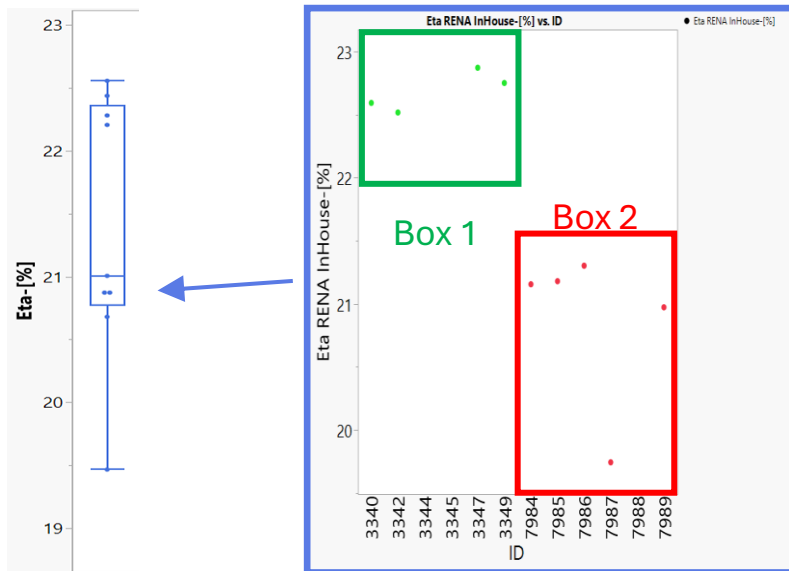


Abbildung 20: Zuordnung der stark schwankenden Effizienzen zu den Boxen des Ausgangsmaterials.

Nach aussortieren der Zellen aus Boxen niedriger Ladungsträgerlebensdauern im Basismaterial verblieben nur noch wenige Zellen im Experiment, die Schwankungen der Parameter konnten jedoch deutlich reduziert werden (Abbildung 21). Es wurden Effizienzen zwischen 22,5 und 23,3 % erzielt, wobei sich zeigt, dass auch und insbesondere mit industrienäheren, kalten Nachreinigungen gute Leerlaufspannungen (U_{OC}) erreichen lassen.

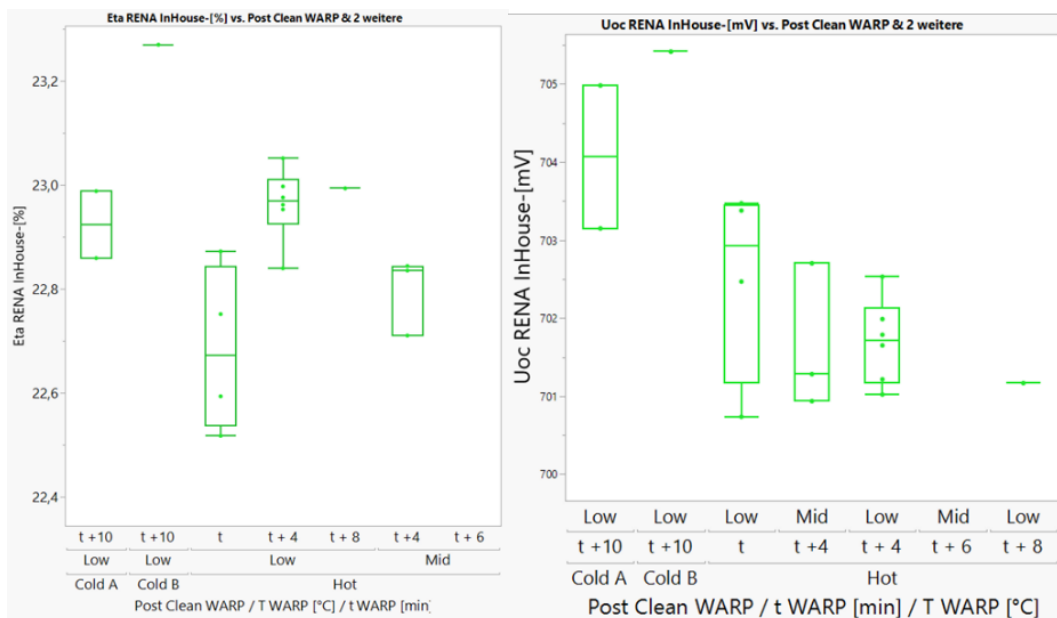


Abbildung 21: Zellergebnisse von Wafern mit guter PL-Intensität (Ausgangsmaterial mit hoher Ladungsträgerlebensdauer)

Trotz der Herausforderungen hinsichtlich der Materialqualität ließ sich der wichtigste Parameter für die Charakterisierung des Poly-WARP Prozesses, $J_{rev,2}$, für alle Solarzellen verwerten, da dieser weitgehend entkoppelt von der Zellspannung ist. Die hierbei erhaltenen Daten sind in Abbildung 22 gezeigt. Hier wird deutlich, dass $J_{rev,2}$ mit steigender Prozessdauer im alkalischen Ätzbecken sinkt. So werden bei der niedrigsten Prozessstemperatur bei drei von vier Gruppen Werte unterhalb von 1 mA/cm^2 erreicht. Bei etwas erhöhter Temperatur des Prozessmediums ($T = \text{Mid}$) können die Prozessdauern für gleichbleibende $J_{rev,2}$ Werte reduziert werden. Wird die Temperatur hingegen noch weiter erhöht ($T = \text{High}$) lassen sich keine $J_{rev,2}$ Werte unterhalb von 2 mA/cm^2 erzielen, ohne dass das rückseitige Poly-Si angegriffen wird. Bei dieser Temperatur scheint das Additiv nicht mehr ausreichende Schutzwirkung gegen das Ätzen des rückseitigen Schutzoxides zu bieten. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass sich bei den beiden getesteten kalten Reinigungen nach Poly-WARP nicht nur mit der heißen Reinigungssequenz vergleichbare Leerlaufspannungen einstellen sondern sich ebenfalls sehr niedrige Rückwärtsströme von $J_{rev,2} < 0,5 \text{ mA/cm}^2$ realisieren lassen.

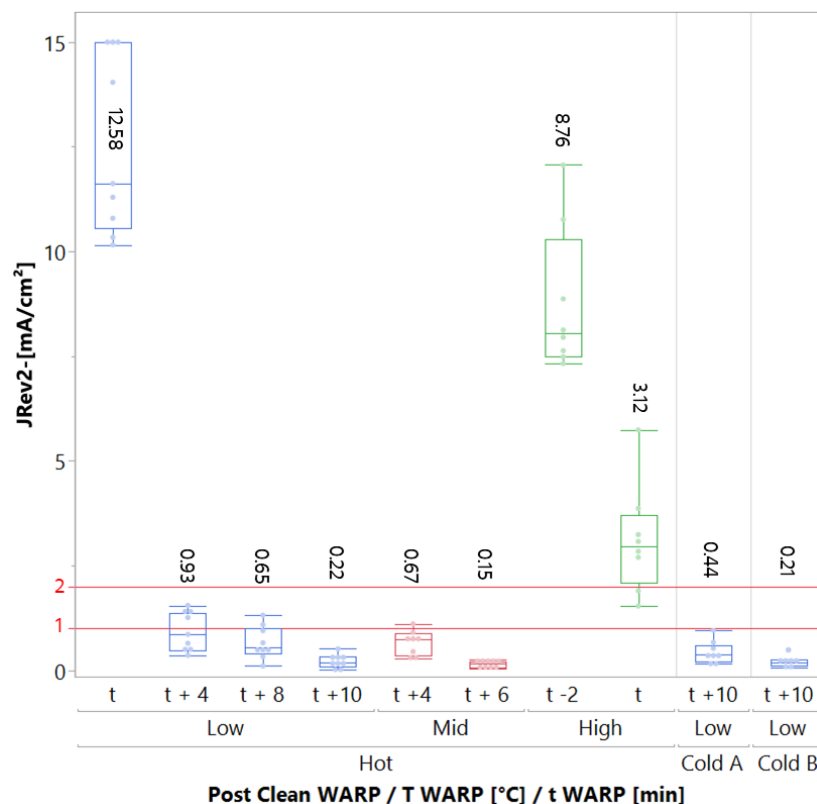


Abbildung 22: Rückwärtsströme des TOPCon Zellexperiments nach Gruppen dargestellt.

2.3 Galvanikmetallisierung (AP6)

Vergleich von Inline und Batch Plating

Während des Projektzeitraums gewann das Thema Ni-Cu Plating von TOPCon und SHJ Solarzellen zunehmend an Bedeutung. Ein Teil der Entwicklungsansätze fokussierte sich auf Batch Basierte Plating Verfahren. Aus diesem Grund wurde eine Detaillierte Analyse im erarbeitet. Abbildung 23 behandelt den Vergleich zwischen Inline- und Batch-Plating-Methoden.

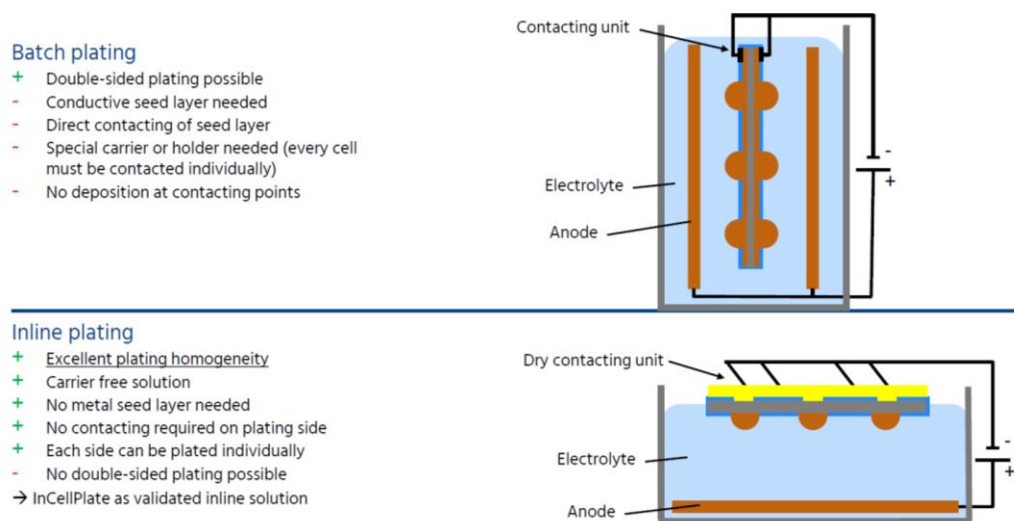


Abbildung 23: Vergleich von Batch-Plating und Inline-Plating für Solarzellen. Batch-Plating ermöglicht zweiseitige Beschichtung mit einer leitfähigen Seed-Schicht, benötigt jedoch spezielle Träger sowie eine direkte Kontaktierung beider Seiten. Inline-Plating bietet hervorragende Homogenität und trägerfreie Lösung ohne Seed-Schicht, aber keine zweiseitige Beschichtung. Beide Methoden verwenden Elektrolyte und Anoden.

Beide Verfahren kamen bereits in der Vergangenheit bei der Herstellung von Solarzellen zum Einsatz. Batch-Plating ermöglicht eine doppelseitige Beschichtung und erfordert eine leitfähige Seed-Schicht sowie spezielle Halterungen, um jede Zelle individuell zu kontaktieren. Dies bedeutet, dass an den Kontaktstellen keine Abscheidung erfolgt, was die Homogenität der Beschichtung beeinträchtigt. Demgegenüber bietet das Inline-Plating eine hervorragende Homogenität der Beschichtung ohne Träger, wodurch keine metallische Seed-Schicht notwendig ist und die Kontaktierung auf der Plating-Seite entfällt. Jede Seite der Solarzelle kann individuell beschichtet werden, jedoch ist eine doppelseitige Beschichtung im Inline-Verfahren nicht möglich. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Inline-Plating durch seine prozessbedingten Vorteile, wie eine bessere Beschichtungshomogenität und die Vermeidung

von metallischen Seed-Schichten, eine vielversprechende Alternative zum traditionellen Batch-Plating darstellt.

Hybrid und Bifacialplating

Abbildung 24 stellt die Hybride und Bifacial geplatete TOPCon-Zelle vor, die eine einseitige Beschichtung für die Vorder- oder Rückseite vorsieht. Die direkten Kontakte durch siebgedrucktes Silber dienen als Referenzprozess.

Hybrid

- Single side plating for front or rear side
- Direct contacting of screen printed pattern

Front side plating

- Advantages
 - Low cost and abundant materials (mainly copper)
 - Narrow plated contacts → high FF and J_{sc}
- Challenges
 - Narrow laser opening < 15 μm (to reach high V_{oc})

Rear side plating

- Advantages
 - Low cost and abundant materials (mainly copper)
 - Contacting of thin TOPCon layers
- Challenges
 - Adhesion on alkaline etched rear side
 - Passivated/insulated wafer edges

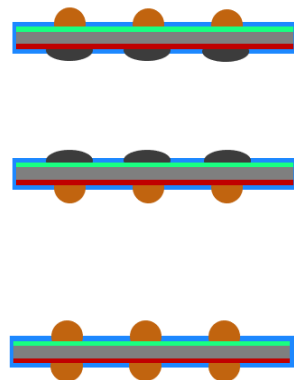


Abbildung 24: Es sind die drei Kombinationen von Plating- und Siebdrucktechnologie dargestellt die im Projekt untersucht wurden: 1) Plating auf der Vorderseite und Siebdruck auf der Rückseite. 2) Plating auf der Rückseite und Siebdruck auf der Vorderseite. 3) Beidseitig geplatete TOPCon Solarzellen.

Die Solarzellen die ausschließlich auf der Vorderseite geplatet wurden erlauben schmale plattierte Kontaktfinger, die zu einem hohen Füllfaktor (FF) und einem hohen Kurzschlussstrom (J_{sc}) führen. Eine der Herausforderungen besteht darin, die Laseröffnungen auf weniger als 15 Mikrometer zu reduzieren, um eine hohe Leerlaufspannung (V_{oc}) zu erreichen.

Auf der Rückseite ergeben sich möglicherweise Vorteile durch die Kontaktierung dünner TOPCon-Schichten (ohne V_{oc} Verlust) mit Ni-Cu-Kontakten. Hierbei stellt allerdings die Haftung auf alkalisch geätzten Rückseiten und die passivierten/isolierten Waferkanten eine besondere Herausforderung dar. Weiterführende Untersuchungen im Projekt beschäftigten sich mit dem Ziel die Haftung durch Anpas-

sung des Laserprozesses zu verbessern, um die Effizienz und die Stabilität der Solarzellen weiter zu steigern.

Vorderseitenplating

Abbildung 25 beschreibt die Herausforderungen des Vorderseitenplatings bei der Herstellung von Solarzellen. Es ist wichtig, dass die Kupferbeschichtung eine starke Haftung aufweist, um mechanische Belastungen während der Lebensdauer der Solarzelle zu überstehen. Um dies zu erreichen, wird die Oberfläche der Zelle speziell vorbehandelt, um die Haftung des Kupfers zu verbessern. Eine systematische Variation der Laserparameter hat dazu geführt, dass optimale Parameter gefunden werden konnten die sowohl eine hohe Effizienz als auch eine sehr gute Haftung der Finger ermöglichen (Gruppe3)

Group	Isc [A]	Voc [mV]	FF [%]	Eta [%]
1	18.2	715	81.5	24.0
2	18.3	715	81.6	24.1
3	18.3	715	81.9	24.2
4	18.2	715	81.8	24.1

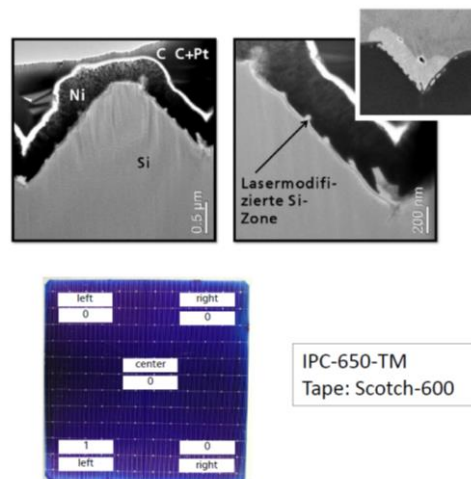


Abbildung 25: Die Tabelle zeigt IV Daten ein Variation von Laserparametern auf der Vorderseite von Solarzellen. Im untern Teil der Abbildung sind Ergebnisse sowie die Bereiche dargestellt an denen Haftungstest (Taptest nach der IPC-650-TM Standards) durchgeführt wurden. Im Mittleren Teil der Abbildung sind REM Aufnahmen dargestellt die den Mechanismus zur Realisierung einer ausreichenden Fingerhaftung veranschaulichen.

Rückseitenplating

In diesem Abschnitt werden die im Projekt durchgeführten Untersuchungen bzgl. der Vorteile und Herausforderungen des Rückseitenplatings bei der Herstellung von TOPCon Solarzellen dargestellt. Ähnlich wie beim Front Side Plating werden kostengünstige und reichlich vorhandene Materialien, hauptsächlich Kupfer, verwendet. Eine der größten Herausforderungen besteht in der Haftung auf der alkalisch geätzten Rückseite der Solarzellen. Die chemische Struktur und die Oberflächenbeschaffenheit der Rückseite machen die Haftung des Kupfers schwierig, was zu mechanischen und elektrischen Problemen führen kann.

Die Untersuchungen zeigen, dass die Haftung durch eine Vergrößerung der lasergeöffneten Fläche und durch die Anpassung des Laserprozesses verbessert werden kann, um eine rauere Oberfläche zu erzeugen, die die Haftung erhöht (siehe Abbildung 26). Diese Anpassungen sind notwendig, um sicherzustellen, dass die Solarzellen den Anforderungen an Effizienz und Langlebigkeit gerecht werden. Um die Haftung weiter zu verbessern, können zusätzliche Schritte wie das Aufbringen einer Zwischenschicht oder spezielle Nachbehandlungen in Betracht gezogen werden.

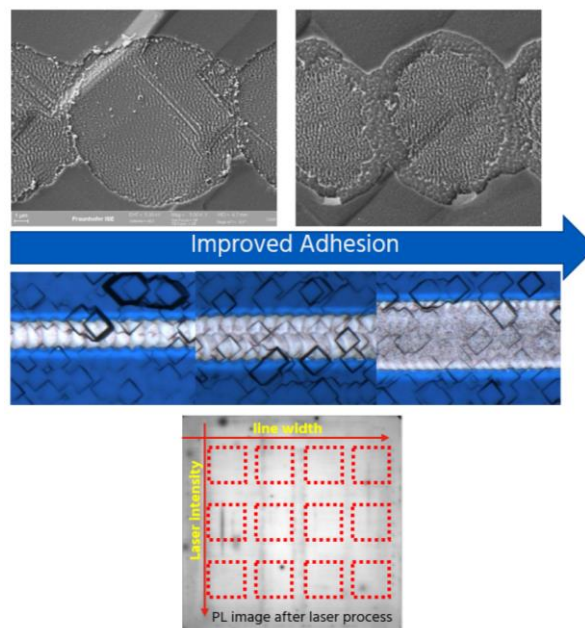


Abbildung 26: Dargestellt ist eine Variation der Laserparameter auf der Rückseite von TOPCon Solarzellen. Oben: REM Bilder unterschiedlicher Laserparametern in der Draufsicht. Mitte: Zunahme der Breite der geöffneten Fingerbreite. Unten: PL Bild einer TOPCon Lebensdauerprobe mit einer systematischen Variation der Fingerbreite und Laserintensität.

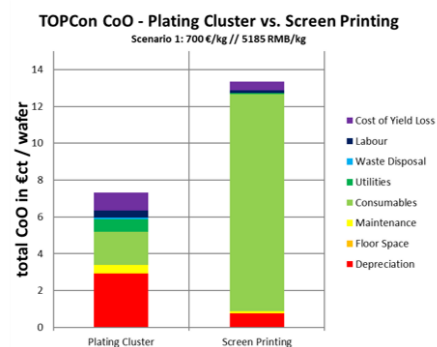
Kostenanalyse

Die in Abbildung 27 dargestellte Kalkulation der Betriebskosten bei der Herstellung von geplateten und Silber-Siebgedruckten TOPCon Solarzellen führt zu den folgenden Schlussfolgerungen:

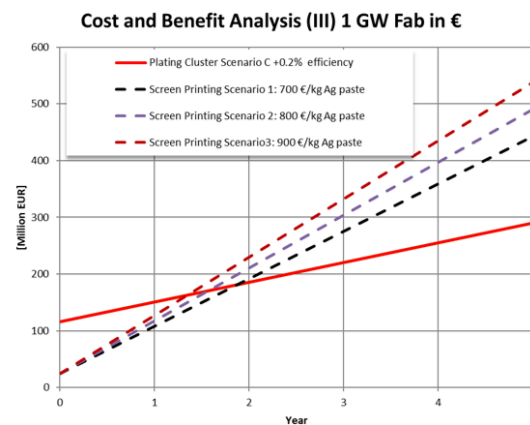
- Beidseitig geplatet TOPCon Solarzellen können mind. um 40% günstiger kontaktiert werden (Abbildung 27 links).
- Der höhere Investitionsbedarf in die Anlagentechnologie ist bereits nach 1 bis 2 Jahren ausgeglichen (abhängig von Silberpreis, Abbildung 27 rechts)

Calculation for G12 TOPCon solar cells

- Screen Printing vs. Plating on TOPCon
 - 700 € (5.200 RMB) / kg paste price
 - 160 mg Ag paste / cell (210mm, G12)



→ **Cost saving > -40%**



Cost calculation for plating and screen printing for 1 GW Fab production at different silver price scenarios.

Abbildung 27: Dargestellt ist eine Kalkulation aller Betriebskosten bei der Herstellung von geplateten und Silber-Siebgedruckten TOPCon Solarzellen.

Zusammenfassung und Ausblick:

Ein wesentlicher Vorteil des Inline-Beschichtungsansatzes ist seine Eignung für industrielle Anwendungen. Diese Methode ist besonders effektiv für die Beschichtung von TOPCon- Zellen ohne Metallsaat-Schicht, was sie zu einer praktischen und effizienten Lösung für die Massenproduktion macht. Das InCellPlate-Tool hat die Machbarkeit sowohl hybrider als auch vollständig beschichteter Ansätze für TOPCon-Solarzellen demonstriert und dabei Effizienzen von über 24 % auf M6- und G12-Wafern erreicht (siehe Bericht von Fraunhofer ISE für mehr Details bzgl. der Solarzellenergebnisse). Es besteht jedoch weiterer Optimierungsbedarf hinsichtlich der Haftung auf der Rückseite der Zellen. Der Übergang vom Silbersiebdruck zur Kupferbeschichtung bietet erhebliche Kosteneinsparungen von über 40 %, was ein entscheidender Faktor für die Kommerzialisierung dieser Technologie ist.

2.4 Zusammenfassung

Im Rahmen des Projektes TOPCon Cluster wurden für TOPCon Solarzellen mehrere Prozesse für die nasschemische Prozessierung in industriellem Maßstab entwickelt und verbessert. Im Bereich der alkalischen Textur und Nachreinigung konnten die Oberflächenstrukturen aufgrund der für TOPCon andersartigen Vorderseitigen Passivierung optimiert werden, was zu einer verbesserten Lichteinkopplung und somit erhöhten Kurzschlussströmen der Solarzellen führte. Der Meilenstein MS 2.1 aus dem Arbeitspaket 2 konnte erreicht werden, indem gezeigt werden konnte, dass die Nachreinigung nach der in AP4 entwickelten nasschemischen Kantenisolation für TOPCon Solarzellen ausreicht, um für symmetrische Rückseitenproben einen $iVoc > 730$ mV nach SiNx Passivierung erzielen zu können. Für die Nasschemische Kantenisolation konnte ein Batch-Cluster Prozess entwickelt werden. Dieser besteht aus einer Kombination aus einseitiger Borsilikatglasätze im inline Verfahren und alkalische Kantenisolation sowie Nachreinigung im Batch Verfahren. Durch die hierdurch im Vergleich zur vormals dominierenden sauren Kantenisolation entstehenden abweichenden Rückseitenstrukturen können höhere Voc Werte bei vergleichbarem Abtrag erzielt werden. Durch die hieraus resultierende Anlagenentwicklung lassen sich nun Kantenisolutionsprozesse mit Durchsätzen von bis zu 13.800 Wafern pro Stunde Brutto für vollformatige Wafer erzielen. Dies ist ebenfalls mit ausschließlich kalten Nachreinigungen nach dem Kantenisolutionsprozess möglich, wodurch Kosten weiter reduziert werden konnten. Der MS 4.1 „Prozess Kantenisolation und BSG-Ätze etabliert, BSG VS und Emitter auf RS vollständig entfernt, bei Durchsatz 5000 wph (mind. M2-Format)“ konnte somit ebenfalls erreicht werden. Für die Entfernung des LPCVD Poly-Silicium Umgriffs auf Zellvorderseite und -kanten wurden umfangreiche Studien durchgeführt. Es konnten Inline Prozesse sowie eine Batch Cluster Prozesssequenz entwickelt werden, die den Prozessanforderungen genügen, wie durch Charakterisierung der Rückwärtsströme gezeigt werden konnte. Hierdurch ließ sich MS 4.2. zur Etablierung eines Prozesses zur einseitigen Entfernung von Poly Si Schichten ebenfalls realisieren. Die in diesem Projekt entwickelten Prozessverbesserungen zur Kantenisolation, LPCVD-Poly Si Entfernung sowie deren Nachreinigung wurden bereits auf industrielle Anlagenkonzepte transferiert und befinden sich in der Markteinführung. In der Backendprozessierung wurden Prozesse zur galvanischen Metallisierung von TOPCon Solarzellen untersucht. Hierbei wurden sowohl Verfahren im Batch als auch im Inline Verfahren getestet. Es wurde gezeigt, dass eine galvanische Metallisierung von TOPCon Solarzellen ein erhebliches Potential zur Silberverbrauchsreduktion aufweisen. Bei der Vorderseitenmetallisierung konnten Ansätze zur Haftungsverbesserung durch Anpassung des Laserablationsprozesses zur Öffnung der vorderen Passivierschicht, welcher Voraussetzung für eine galvanische Schichtabscheidung ist, gefunden werden. Zur galvanischen Metallisierung auf alkalisch polierten Zellrückseiten konnten ebenfalls neue Erkenntnisse zur Verbesserung der Rückseitenhaftung gewonnen werden.

3 Fortschreibung der Verwertungsplanung

Die in diesem Projekt entwickelten Technologien haben zur Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Photovoltaik-Industrie beitragen. Gerade für den Spezialmaschinenbau ist es entscheidend, neue Prozesstechnologien für zukünftige Zellarchitekturen zu entwickeln, um die Wettbewerbsfähigkeit gegenüber der auch in diesem Bereich wachsenden asiatischen Konkurrenz zu stärken. Die Kombination aus einer Weiterentwicklung der bestehenden Standardprozessschritte und grundlegend neuen Ansätzen wird als sehr erfolgsversprechend gewertet. Dieses Vorhaben legte damit wichtige Grundlagen und Weiterentwicklungen, den technologischen Vorsprung für die europäische Industrie zu erhalten. Im Verlauf des Projekts wurden die Verwertungsmöglichkeiten der Projektergebnisse ständig überprüft und evaluiert. Die Ergebnisse aus diesem Projekt haben entscheidend zu der Entwicklung neuer Anlagentypen beigetragen. Insbesondere die Batch Cluster Prozessanlagen sind maßgeblich durch dieses Projekt realisiert worden. So wurde eine sehr kompakte Hochdurchsatzanlage zum einseitigen Ätzen von Silikatglasschichten (InEtchSide) als auch die Anlagen zur alkalischen Boremitterentfernung (BatchEtch) und der alkalischen Batch Poly Si Entfernung (BatchPolyClean) auf Grundlage dieser Projektergebnisse entwickelt.

3.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten und Anschlussfähigkeit

Die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten wurden als sehr hoch eingeschätzt und insbesondere die entwickelten Prozesse und Anlagen zur einseitigen Emitterentfernung sowie LPVCVD Poly-Si Umgriffsentfernung im Batch Cluster Verfahren sind aufgrund ihrer hohen Durchsätze (13.800 wph) attraktiv für den Markt. Durch die Abkehr von den typischen sauren inline Prozessen können toxische Chemikalien eingespart und potentielle Umweltrisiken vermindert sowie anfallende Entsorgungskosten reduziert werden. Der Durchsatz bei den BatchCluster Systemen sowohl für nasschemische Kantenisolation als auch zur Entfernung von parasitären LPCVD Poly-Si Schichten konnte im Vergleich zu den herkömmlichen Inline Systemen um ca. Faktor 2.5 gesteigert werden. Da die Kosten vergleichsweise niedriger liegen, konnte dadurch die Wirtschaftlichkeit der Anlagen gesteigert werden.

Der Markt für TOPCon Solarzellen ist in den vergangenen Jahren weiter gestiegen, und durch die Entwicklung von konkurrenzfähigen Prozess- und Anlagentypen für die industrielle TOPCon Zellfertigung sind die Chancen gestiegen, sich in diesem Markt besser durchsetzen zu können. Die RENA Technologies GmbH rechnet demnach damit in den kommenden Jahren zunehmend Anlagen im Kontext von PERC- und TOPCon-Solarzellen verkaufen zu können, welche hohe Ansprüche an die Oberflächenreinigung für die Herstellung von höchsteffizienten Solarzellen haben.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die hier entwickelten Technologien zur wirtschaftlichen Zukunft der Solartechnologie beigetragen haben und bereits für Anpassungen/Optimierungen der im Markt platzierten Anlagentechnologie sowie Neuentwicklungen und entsprechenden Anlagenverkäufen in der RENA Technologies GmbH gesorgt haben.

3.2 Wissenschaftliche und technische Anschlussfähigkeit

Die Entwicklung von BatchCluster Prozessen ist ein entscheidendes Ergebnis dieses Projektes. Durch die Untersuchung von verschiedenen Poly Si Schichten und Glaschichten im Zusammenhang mit der dazugehörigen Prozessentwicklung konnten wissenschaftliche und technisch chemische Grundlagen, die für die Prozessfindung notwendig waren, erlangt werden. Es ist geplant, auf den in diesem Projekt erzielten Ergebnissen in einem Folgeprojekt aufzubauen. Hierzu zählen zum Beispiel Untersuchungen zu wirtschaftlich attraktiven Inline Prozessmöglichkeiten der alkalischen Kantenisolation im TOPCon Prozess als auch Prozesslösungen zur Entfernung des Umgriffs von mittels PECVD Verfahren abgeschiedenen dotierten Poly Si Schichten.

4 Arbeiten die zu keiner Lösung geführt haben

5 Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer

Die Arbeit an der nasschemischen Prozessentwicklung in diesem Projekt hat auch in der engen Kooperation mit dem Fraunhofer ISE maßgeblich zu zwei Konferenzbeiträgen sowie zwei wissenschaftlichen Journal Veröffentlichungen geführt [12,13].

6 Einhaltung der Ausgaben-/Kosten- und Zeitplanung

Das Verbundprojekt wurde für die RENA um sechs Monate kostenneutral verlängert, da im Laufe des Projektes im Entwicklungslabor am Standort Freiburg die bestehenden Batch und Inline Prozessanlagen durch neue Prozessanlagen ersetzt wurden. Hierdurch wurde es ermöglicht, auch in AP 4.2 alle Meilensteine erfolgreich abschließen zu können.

7 Literaturverzeichnis

- 1 Kwark, Y.H. and Swanson, R.M. (1987) N-type SIPOS and poly-silicon emitters. *Solid State Electron*, **30** (11), 1121–1125.
- 2 Seto, J.Y.W. (1975) The electrical properties of polycrystalline silicon films. *J. Appl. Phys.*, **46** (12), 5247.
- 3 Richter, A., Benick, J., Feldmann, F., Fell, A., Hermle, M., Glunz, S.W. (2017) n-Type Si solar cells with passivating electron contact: Identifying sources for efficiency limitations by wafer thickness and resistivity variation. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **173**, 96–105.
- 4 Chen, Y., Chen, D., Liu, C., Wang, Z., Zou, Y., He, Y., Wang, Y., Yuan, L., Gong, J., Lin, W., Zhang, X., Yang, Y., Shen, H., Feng, Z., Altermatt, P.P., Verlinden, P.J. (2019) Mass production of industrial tunnel oxide passivated contacts (i-TOPCon) silicon solar cells with average efficiency over 23% and modules over 345 W. *Prog Photovolt Res Appl*, 1–8.
- 5 TRINA Solar Trina Solar meldet neuen Effizienzrekord von 24,58% für monokristalline Silizium i-TOPCon Solarzellen. <https://www.trinasolar.com/de/resources/newsroom/tue-05282019-1224> (13 February 2020).
- 6 Mack, S., Schube, J., Fellmeth, T., Feldmann, F., Lenes, M., Luchies, J.-M. (2017) Metallisation of Boron-Doped Polysilicon Layers by Screen Printed Silver Pastes. *Phys. Status Solidi RRL*, **214**, 1700334.
- 7 Moldovan, A., Feldmann, F., Zimmer, M., Rentsch, J., Benick, J., Hermle, M. (2015) Tunnel oxide passivated carrier-selective contacts based on ultra-thin SiO₂ layers. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **142**, 123–127.
- 8 Feldmann, F., Schön, J., Niess, J., Lerch, W., Hermle, M. (2019) Studying dopant diffusion from Poly-Si passivating contacts. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **200**, 109978.

- 9 Di Yan, Phang, S.P., Wan, Y., Samundsett, C., Macdonald, D., Cuevas, A. (2019) High efficiency n-type silicon solar cells with passivating contacts based on PECVD silicon films doped by phosphorus diffusion. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **193**, 80–84.
- 10 ITRPV consortium (2019) International Technology Roadman for Photovoltaic (ITRPV): Results 2018, 10th edition. 10th Edition.
- 11 Jochen Rentsch, Frank Feldmann, Martin Hermle, Ralf Preu, Stefan W. Glunz (2019) *TOPCon – Poly-Si based Passivating Contacts*, Penang, Malaysia.
- 12 Tobias Dannenberg, Jan Vollmer, Michael Passig, Caroline Scheiwe, Damian Brunner, Alexis Padiaditakis, Ulrich Jäger, Iron Wang, Weiwei Xie, Sufan Xu, Jim Wu, Katrin Krieg, Christopher Teßmann, Martin Zimmer und Holger Kühnlein, „*Past, Present and Future Outlook for Edge Isolation Processes in Highly Efficient Silicon Solar Cell manufacturing*“, Solar RRL, 2022
- 13 Katrin Krieg, Sebastian Mack, Jan Vollmer, Tobias Dannenberg, Damian Brunner und Martin Zimmer, „*Wet chemical poly-Si(n) wrap-around removal for TOPCon solar cells*“, EPJ Photovoltaics, 2023