

Optimierung der Vorderseitenmetallisierung und des Emitters für hocheffiziente industrielle Silizium Solarzellen

Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informatik
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur
Dr.-Ing.

genehmigte Dissertation
von

Dipl.-Phys. Helge Hannebauer

geboren am 17.11.1984 in Nienburg/Weser

2016

1. Referent: Prof. Dr. H. Jörg Osten
2. Referent: Prof. Dr. Giso Hahn
Tag der Promotion: 25.02.2016

Kurzzusammenfassung

Diese Arbeit behandelt sowohl Optimierungsmöglichkeiten der Vorderseitenmetallisierung mittels Siebdrucktechnik als auch die Implementierung von verbesserten Diffusionsprozessen im Vergleich zu einer neuartigen Herstellungstechnik für einen selektiven Emitter.

Als Technik für die Vorderseitenmetallisierung auf Silizium Solarzellen wird hauptsächlich der Einfachdruck (Single Print) mit silberhaltigen Siebdruckpasten in der industriellen Produktion verwendet. In dieser Arbeit werden als alternative Techniken der Doppeldruck (Print-on-Print) und Zweifach-Druck (Dual Print) mit dem Single Print verglichen. Experimentelle Variationen der verwendeten Sieb- und Schablonenparameter führen zum höchsten Wirkungsgrad von 19,1% durch Anwendung des Dual Print auf Solarzellen mit ganzflächigem Al-BSF bei gleichzeitig niedrigstem Silberpastenverbrauch von 75 mg für die gesamte Vorderseite.

Anhand des Dual Print Prozesses, der für den Druck der Kontaktfinger eine Schablone statt eines Siebes verwendet, wird erstmals eine systematische Analyse der geometrischen und elektrischen Solarzellenparameter in Abhängigkeit vom Silberpastenverbrauch der Kontaktfinger gezeigt. Durch Messungen mittels Transferlängen Methode wird eine Abhängigkeit des spezifischen Kontaktwiderstandes ρ_c auf der Vorderseite vom Silberpastenverbrauch beobachtet, die in dieser Art in der Literatur noch nicht gezeigt wurde. Weiteres Einsparpotenzial des Silberverbrauchs wird durch Veränderung des Busbardrucks erzielt. Durch Verwendung spezieller, sogenannter nicht-durchfeuernder Silberpasten für den Busbardruck und eines segmentierten Busbar Layouts, statt eines standardmäßig rechteckigen Busbars mit normaler Silberpaste, wird der Silberpastenverbrauch ohne Wirkungsgradverluste um 56 mg gesenkt. Dies entspricht einer Ersparnis von \$0,59 Cent/ W_p bei einem Silberpreis von \$500/kg und einem Zellwirkungsgrad von 20%.

Zur Erhöhung des Wirkungsgrades wird ein Layout mit 5 Busbars und 0,5 mm Breite je Busbar auf PERC (*engl.* Passivated Emitter and Rear Cell) Solarzellen angewendet, um durch Reduzierung der Metallisierungsfläche und des Abstandes zwischen zwei Busbars den generierten Strom zu erhöhen beziehungsweise die Widerstandsverluste zu verringern. Der dadurch erzielte unabhängig bestätigte Wirkungsgrad von 21,2% stellt zum Zeitpunkt der Entstehung einen neuen Weltrekordwirkungsgrad für Silizium Solarzellen mit beidseitig gedruckten Metallkontakten dar.

Teile der experimentell erzielten Ergebnisse werden durch numerische Simulationen mittels Sentauros Device in Kombination mit einer SPICE Netzwerksimulation nachgestellt. Der Wirkungsgrad wird in Abhängigkeit von der Höhe und Rauigkeit der Finger beziehungsweise vom Silberpastenverbrauch simuliert und bestätigt die experimentellen Ergebnisse mit Dual Print. Die Simulationen zeigen, dass mit mehr Busbars die Sensitivität

des Wirkungsgrades durch die Rauigkeit der Fingerhöhe abnimmt.

Zur Optimierung des POCl_3 diffundierten Emitters werden erstmals die Emittersättigungsstromdichten $J_{0e,\text{met}}$ unter industrietypischen siebgedruckten Silberkontakten anhand der kamerabasierten dynamischen Infrarot Lebensdauer Messung orts aufgelöst für verschiedene Schichtwiderstände direkt gemessen, um eine vollständige Beschreibung der gesamten Emittersättigungsstromdichte zu ermöglichen.

Für die Weiterentwicklung von PERC Solarzellen wird eine neue Technologie zur Herstellung eines selektiven Emitters eingeführt: der sogenannte Gas Phase Etch Back (GEB) Prozess. Der GEB Prozess verwendet die vorhandene Gasphase eines einseitigen Polierprozesses der Rückseite zum Ätzen der Emitteroberfläche, wodurch im Optimalfall nur das Aufbringen einer Ätzbarriere als zusätzlicher Prozessschritt im Vergleich zu einem industriellen PERC Prozess benötigt wird, um den selektiven Emitter herzustellen. Der zurückgeätzte Emitter resultiert in ca. 40 fA/cm^2 niedrigeren Emittersättigungsstromdichten als ein homogen diffundierter POCl_3 Emitter für gleiche Schichtwiderstände. Im abschließenden Experiment wird der GEB Prozess mit industrietypischen Prozessen und Anlagen gefahren und zusätzlich die Erkenntnisse aus den Optimierungen der Kontaktfinger und Busbars angewendet. Dies führt zum besten in dieser Arbeit erzielten Wirkungsgrad von 21,6% mit einem Gewinn von $0,3\%_{\text{abs}}$ gegenüber einem homogen diffundierten Emitter.

Schlagwörter: Silizium Solarzelle, Siebdruck, Print-on-Print, Dual Print, selektiver Emitter, Gas Phase Etch Back

Abstract

This work presents some options for optimizing front side metallization by screen printing, and a comparison of improved diffusion processes with a new fabrication technology for a selective emitter.

The technique used for front side metallization of silicon solar cells in the industrial production is mainly the single print with silver containing screen printing pastes. In this work, the single print is compared to the alternative techniques of print-on-print and dual print. Experimental variations of the used screen and stencil parameters lead to the highest efficiency of 19,1% and simultaneously to the lowest silver paste consumption of 75 mg for the whole front side by using dual print on solar cells with full-area Al-BSF. By application of the dual print process, which uses a stencil instead of a screen for printing the contact fingers, a systematical analysis of the geometrical and electrical solar cell parameters in dependence on the silver paste consumption was performed for the first time. The measurement of the specific contact resistance ρ_c on the front side using the transfer length method indicates a dependence on the silver paste consumption which has not yet been shown in publications in this way.

An additional possible reduction of the silver consumption is achieved by changing the busbar print. By using a special non-firing through silver paste for the busbars as well as a segmented busbar layout instead of a standard rectangular shaped busbar with normal silver paste, the silver paste consumption is lowered by 56 mg. This corresponds to a cost saving of \$0,59 Cent/ W_p with a silver price of \$500/kg and a cell efficiency of 20%.

For increasing the efficiency a layout with 5 busbars and 0,5 mm width per busbar is used on PERC (Passivated Emitter and Rear Cell) solar cells to increase the generated current and respectively to decrease the resistance losses by reducing the metallization area and the pitch between two busbars. Thus, an independently confirmed efficiency of 21,2% was achieved, which is the new world record in efficiency of silicon solar cells with printed metal contacts on both sides at the time of development.

Parts of the experimental results are modeled by numerical simulations using Sentaurus Device in combination with a SPICE network simulation. The efficiency was simulated in dependence of the height and roughness of the finger respective to the silver paste consumption and confirms the experimental results with dual print. Additionally, the simulations show a decreased sensitivity in the efficiency due to the roughness of finger height with more busbars.

For optimization of the POCl_3 diffused emitter, the emitter saturation current density $J_{0e,met}$ under typical industrial screen printed silver contacts was measured directly for the first time for different sheet resistances with the camera-based dynamic infrared lifetime method to enable a complete characterisation of the total emitter saturation current density.

For further development of PERC solar cells a new fabrication technology for a selective emitter was introduced: the so-called gas phase etch back (GEB) process. The GEB process uses the available gas phase from a single sided polishing process of the rear side to etch back the emitter surface. Optimally this process needs only the deposition of the etch barrier as an additional process step to form a selective emitter in comparison to an industrial PERC process. The etched back emitter results in about 40 fA/cm² lower emitter saturation current density compared to a homogeneously diffused POCl₃ emitter for the same sheet resistance. In the final experiment the GEB process was applied with industrial type processes and equipment together with the findings of the optimization of contact fingers and busbars. This leads to the highest cell efficiency of 21,6% in this work and a gain of 0,3%_{abs} compared to a homogeneously diffused emitter.

Keywords: Silicon solar cell, screen printing, print-on-print, dual print, selective emitter, gas phase etch back

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Die Silizium Solarzelle	5
2.1	Industrietypische Solarzelle mit ganzflächigem Al-BSF	5
2.2	Passivated Emitter and Rear Cell (PERC)	6
2.2.1	Prozessierung der PERC Solarzelle	7
2.3	Selektiver Emitter	9
3	Metallisierung mittels Siebdruck	17
3.1	Siebdruckprozess	17
3.2	Single Print	22
3.3	Print-on-Print	24
3.4	Dual Print	27
4	Serienwiderstand der Solarzelle	31
4.1	Emitterwiderstand	31
4.2	Kontaktwiderstand	32
4.3	Fingerwiderstand	34
4.4	Serienwiderstandsanteile	34
4.5	Serienwiderstandsmessung und Auswirkung auf den Füllfaktor einer Solarzelle	35
5	Verbesserte Feinlinienmetallisierung	37
5.1	Single Print	37
5.2	Print-on-Print	41
5.3	Dual Print	46
5.3.1	Einfluss der Fingerhöhe auf die Widerstandsverluste und den Silberpastenverbrauch	48
5.3.2	Ergebnisse PERC Solarzellen	50
5.3.3	Analyse der Widerstandsverluste	51
5.4	Vergleich der Drucktechniken	56
5.4.1	Verwendete Siebe und Schablonen	56
5.4.2	Analyse der Fingergeometrien	57
5.4.3	Ergebnisse Solarzellen	59
5.4.4	Simulation der Rauigkeit der Fingerhöhe	61
5.5	Zusammenfassung des Kapitels	68

6	Neue Busbar Layouts für Reduzierung des Ag Verbrauchs und hohe Wirkungsgrade	69
6.1	Verwendung von nicht-durchfeuernden Silberpasten	69
6.1.1	Ergebnisse PERC Solarzellen	70
6.1.2	Analyse der Emittersättigungsstromdichte und des Silberpastenverbrauchs	72
6.2	Segmentierter Busbar	76
6.2.1	Ergebnisse PERC Solarzellen und Reduzierung Silberpastenverbrauch	78
6.3	Multi-Busbar Layout	81
6.3.1	Prozessierung PERC Solarzellen	81
6.3.2	Analyse der Fingergeometrien	82
6.3.3	Ergebnisse PERC Solarzellen	83
6.3.4	Modellierung des Wirkungsgradpotenzials für ein Multi-Busbar Layout	85
6.3.5	Simulation der Kontaktfinger in Multi-Busbar Layouts	87
6.4	Zusammenfassung des Kapitels	92
7	Selektiver Emitter mittels Gas Phase Etch Back	95
7.1	Analyse und Weiterentwicklung des homogenen Emitters	95
7.2	Einfluss des spezifischen Kontaktwiderstandes	98
7.3	Gas Phase Etch Back Prozess	101
7.4	Analyse verschiedener Ätzbarrieren	103
7.5	Gas Phase Etch Back als Laborprozess	105
7.5.1	Emittercharakterisierung	108
7.5.2	Ergebnisse PERC Solarzellen	110
7.6	Gas Phase Etch Back als Industrieprozess mit Dual Print und 5 Busbars	112
7.6.1	Analyse des zurückgeätzten Emitters	114
7.6.2	Ergebnisse PERC Solarzellen	117
7.7	Zusammenfassung des Kapitels	119
8	Zusammenfassung	121
	Literaturverzeichnis	125

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
Al-BSF	Aluminium Back Surface Field
ALD	Atomic Layer Deposition
BB	Busbars
Cz	Czochralski
DP	Dual Print
ECV	Electrochemical Capacitance-Voltage
EL	Elektrolumineszenz
EOM	Emulsion Over Mesh
FZ	Float-Zone
GEB	Gas Phase Etch Back
ILM	Infrared Lifetime Mapping
IQE	Interne Quanteneffizienz
ISFH	Institut für Solarenergieforschung Hameln/Emmerthal
KOH	Kaliumhydroxid
LCO	Laser Contact Opening
MPP	Maximum Power Point
PC-PLI	Photoconductance Calibrated Photoluminescence Lifetime Imaging
PECVD	Plasma-Enhanced Chemical Vapour Deposition
PERC	Passivated Emitter and Rear Cell
POCl ₃	Phosphoroxchlorid
PoP	Print-on-Print
PSG	Phosphorsilikatglas
QSSPC	Quasi-Steady-State Photoconductance
RCA	Radio Corporation of America
REM	Rasterelektronenmikroskop

Abkürzung	Beschreibung
SIMS	Secondary Ion Mass Spectroscopy
SiN _x	Siliziumnitrid
SP	Single Print
SPICE	Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis
SRV	Surface Recombination Velocity
TLM	Transferlängen Methode

1 Einleitung

Bei heutigen Solarmodulen auf Siliziumbasis teilen sich die Kosten ca. zur Hälfte in die Herstellung der Solarzellen und zur anderen Hälfte in die Modulverarbeitung [1]. Auf Seiten der Zellherstellung ist der Metallisierungsprozess mit Silber ein bedeutender Kostenfaktor [1], dessen Anteil durch die Abhängigkeit vom Silberpreis schwankt. Eine Reduzierung der Kosten pro Watt Leistung ist ebenso über die Steigerung des Wirkungsgrades möglich.

Die Metallisierung der Silizium Solarzellen erfolgt heutzutage zu über 95% [1] mittels Siebdruck. Es existieren verschiedene alternative Metallisierungstechniken [2], um den Silberverbrauch zu senken. Diese benötigen größtenteils spezielle Geräte und Maschinen zur Implementierung, wodurch im Voraus zusätzliche Kosten zum Umbau der industriellen Produktionslinien verursacht würden.

Der Fokus dieser Arbeit liegt daher auf der Reduzierung des Silberverbrauchs der Kontaktfinger und Busbars der Vorderseite mittels Siebdrucktechnik, um den Ergebnissen eine zeitnahe industrielle Umsetzung zu ermöglichen, die zur Kostensenkung in der Solarzellenherstellung beiträgt. Dabei wird insbesondere das doppelte Drucken der Kontaktfinger und das Drucken der Kontaktfinger und Busbars in zwei Schritten untersucht. Für die Kontaktfinger wird als Alternative zum Sieb eine Metallschablone evaluiert, um die Rauigkeit der Fingerhöhe zu verringern und dadurch das Verhältnis Linienwiderstand zu Pastenverbrauch zu verbessern. Für die Busbars werden neue Layouts verwendet sowie spezielle Silberpasten, deren Einsatz durch das unabhängig von den Kontaktfingern ausgeführte Drucken möglich ist.

Für Silizium Solarzellen war in den letzten Jahren das Konzept der Passivated Emitter and Rear Cell (PERC) [3] zur Reduzierung der Rekombinationsverluste auf der Rückseite ein wichtiger Baustein zur Erhöhung des Wirkungsgrades auf Werte zwischen 20,0% und 21,0% [4–9]. Durch die voranschreitende Implementierung dieses Prozesses in die Produktion [1] rückt die Solarzellenvorderseite als jetzt größter Verlustmechanismus der Rekombination in den Fokus der Forschung. Neben der Verbesserung des homogenen Emitters lässt sich die Rekombination der Vorderseite auch durch das Konzept des selektiven Emitters [3, 10, 11] verringern, das jedoch zusätzliche Prozessschritte benötigt. Bestehende Techniken erzielen größtenteils zu geringe Wirkungsgradsteigerungen im Bereich von 0,1%_{abs} oder benötigen zu kostenintensive Herstellungsprozesse gegenüber dem homogenen Emitter, so dass heutzutage noch über 90% der Silizium Solarzellen einen homogenen Emitter verwenden [1].

Für die industrielle Umsetzbarkeit wird ein im Rahmen dieser Arbeit neu entwickelter Prozess zur Herstellung eines selektiven Emitters gezeigt, der im Optimalfall nur einen zusätzlichen Prozessschritt im Vergleich zu einem industriellen PERC Prozess mit homogen diffundiertem Emitter benötigt. Gleichzeitig bietet der *Gas Phase Etch Back* ge-

nannte Prozess das Potenzial zur Wirkungsgradsteigerung im Bereich von $0,3\%_{\text{abs}}$. Durch den Einsatz aller Vorderseitenoptimierungen hinsichtlich der Kontaktfinger, Busbars und des Emitters ist das Ziel, den Wirkungsgrad von PERC Solarzellen auf über $21,5\%$ zu steigern.

Die Gliederung dieser Arbeit ist wie folgt:

Kapitel 2 gibt eine Einführung in die beiden verwendeten Zelltypen ganzflächiges Aluminium Back Surface Field (Al-BSF) und Passivated Emitter and Rear Cell (PERC), die in dieser Arbeit auf Basis von Silizium verwendet werden. Anhand der PERC Solarzellen wird der Herstellungsprozess der Silizium Solarzellen am ISFH erläutert. Als Möglichkeit zur Reduzierung der Rekombinationsverluste auf der Solarzellenvorderseite wird die Technik des selektiven Emitters durch drei schon existierende Konzepte beschrieben. Mit Hilfe der 1-Dioden-Gleichung als vereinfachte Beschreibung einer Solarzelle werden die Rekombinationseffekte in Form der Sättigungsstromdichte und deren Einfluss auf die Leerlaufspannung V_{oc} erläutert.

In **Kapitel 3** wird als wesentlicher Bestandteil dieser Arbeit die Siebdrucktechnik zur Metallisierung der Solarzellenvorderseite beschrieben. Neben verschiedenen Einflussgrößen des Siebdruckprozesses werden die Kontaktausbildung und die verschiedenen Theorien der Strompfade der Vorderseite erläutert. Es werden die drei Drucktechniken Single Print, Print-on-Print und Dual Print vorgestellt und die bisher in der Literatur berichteten Ergebnisse bis zum Anfang dieser Arbeit diskutiert. Diese Ergebnisse dienen als Ausgangspunkt für die eigenen Optimierungen der Drucktechniken.

Kapitel 4 gibt eine theoretische Beschreibung und Herleitung der Serienwiderstandsanteile der Solarzellenvorderseite. Es wird das in dieser Arbeit genutzte Verfahren zur Bestimmung des Serienwiderstands R_s durch die Strom-Spannungsmessung der Solarzelle und der Einfluss von R_s auf den Füllfaktor FF erläutert.

Kapitel 5 zeigt die Ergebnisse der Experimente zur Optimierung des Single Prints, Print-on-Prints und Dual Prints. In einer Gegenüberstellung der Drucktechniken wird anhand des erzielten Wirkungsgrades, der verbrauchten Silberpaste und der geometrischen und elektrischen Parameter für verschiedene Fingeröffnungsbreiten ein Vergleich gezogen. Durch eine systematische Veränderung des Silberpastenverbrauchs der Kontaktfinger beim Dual Print wird der Einfluss auf den Wirkungsgrad und die Eigenschaften der Kontaktfinger in Form der Fingerhöhe, Linienwiderstand R_L und spezifischen Kontaktwiderstand ρ_c untersucht. Zusätzlich wird der Einfluss der Rauigkeit der Fingerhöhe auf den Wirkungsgrad einer PERC Solarzelle mit einem 3 Busbar Layout numerisch simuliert, um Rückschlüsse auf die Verluste durch erreichbare Fingerhöhen und die Fingerprofile der drei Drucktechniken ziehen zu können.

In **Kapitel 6** werden zur Komplettierung der Vorderseitenmetallisierung Verbesserungen der Busbars untersucht. Die Konzepte zur Nutzung einer speziellen Silberpaste für die Busbars, die einen niedrigen Silbergehalt enthält und die Rekombination unter den Me-

tallkontakten verringert, und eines segmentierten statt durchgezogenen Busbars sollen in erster Linie zur Reduzierung des Silberverbrauchs beitragen, um die Kosten in der Solarzellenherstellung zu senken. Als drittes Konzept wird ein Multi-Busbar Layout mit 5 Busbars auf PERC Solarzellen zur Wirkungsgradsteigerung experimentell untersucht und mit einem 3 Busbar Layout verglichen. Abschließende Simulationen zeigen den Einfluss der Rauigkeit der Fingerhöhe und des Silberpastenverbrauchs auf den Wirkungsgrad für Multi-Busbar Layouts und vergleichen die Ergebnisse mit denen für 3 Busbars aus dem vorherigen Kapitel.

Kapitel 7 befasst sich mit der Optimierung des Emitters auf der Solarzellenvorderseite. Anhand von verschiedenen homogenen POCl_3 Diffusionen werden die Emittersättigungsstromdichten im passivierten ($J_{0e,\text{pass}}$) und metallisierten ($J_{0e,\text{met}}$) Bereich mittels dynamischer Infrarot Lebensdauer Messung (ILM) bestimmt sowie der Einfluss der Diffusionen auf den spezifischen Kontaktwiderstand ρ_c zum Emitter untersucht. Es wird eine neue Technologie zur Herstellung eines selektiven Emitters vorgestellt, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde. Diese Technologie verwendet das Konzept des Emitterrückätzens im nicht metallisierten Bereich zwischen den Kontaktfingern nach einer homogenen POCl_3 Diffusion. Dieser *Gas Phase Etch Back* (GEB) genannte Prozess verwendet die vorhandene Gasphase eines industriellen Rückseitenpolierprozesses für die Herstellung von PERC Solarzellen und benötigt dadurch im Optimalfall nur einen zusätzlichen Prozessschritt im Vergleich zum homogenen Emitter. Das Potenzial dieses selektiven Emitter Prozesses wird auf Basis eines Laborprozesses gezeigt. Im abschließenden Experiment werden die Optimierungsergebnisse dieser Arbeit kombiniert und in einem industriellen PERC Prozess mit Dual Print, Multi-Busbar Layout und selektivem Emitter mittels GEB das Wirkungsgradpotenzial untersucht.

Kapitel 8 fasst abschließend die Resultate dieser Arbeit zusammen.

2 Die Silizium Solarzelle

Dieses Kapitel gibt eine Einleitung in die verwendeten Solarzellenkonzepte dieser Arbeit. Neben den für einige wenige Experimente benutzten Aluminium Back Surface Field Solarzellen mit vollflächigem Rückkontakt wird der Fokus auf das Passivated Emitter and Rear Cell Konzept gelegt und anhand dieser Zellstruktur die Prozessierung der Solarzellen beschrieben. Zusätzlich wird ein Überblick über verschiedene Technologien zur Herstellung eines selektiven Emitters gegeben, um im späteren Verlauf dieser Arbeit ein neu entwickeltes Verfahren mit den vorhandenen zu vergleichen.

2.1 Industrietypische Solarzelle mit ganzflächigem Al-BSF

Die am meisten genutzte Technologie für Silizium Solarzellen basiert auf dem Konzept des Aluminium Back Surface Field (Al-BSF) [12–14], welches heutzutage noch für ungefähr 80% der weltweit produzierten kristallinen Silizium Solarzellen verwendet wird [1]. Der Aufbau der Al-BSF Solarzelle ist in Abbildung 2.1 dargestellt. Dieser Zelltyp zeichnet sich durch seinen einfachen Prozessfluss mit hohem Durchsatz aus. Typischerweise wird dafür ein Bor-dotierter multi- oder monokristalliner Siliziumwafer genutzt. Für die Al-BSF Solarzellen in dieser Arbeit werden ausschließlich mittels Czochralski-Verfahren gezogene monokristalline p -Typ Wafer mit einer Fläche von $125 \times 125 \text{ mm}^2$ oder $156 \times 156 \text{ mm}^2$ im Pseudo-square Format verwendet. Zur Verbesserung des Lichteinfangs ist die Vorderseite der Solarzellen texturiert. Ein homogen diffundierter Phosphor-dotierter Emitter erzeugt den pn -Übergang auf der Zellvorderseite, welche zur Oberflächenpassivierung und als Antireflexionsschicht mit einem Siliziumnitrid (SiN_x) beschichtet wird. Mittels Siebdruck wird auf die Vorderseite ein Kontaktgrid mit einer Silberpaste und auf die Rückseite ganzflächig eine Aluminiumpaste aufgebracht [15–18]. Im folgenden Hochtemperaturschritt wird der elektrische Kontakt auf der Vorderseite hergestellt. Gleichzeitig bildet sich auf der Rückseite eine hochdotierte p^+ -Region, das sogenannte Aluminium Back Surface Field, welches die Oberflächenrekombination reduziert [19]. Bei einer Temperatur von $577 \text{ }^\circ\text{C}$ erzeugt das Silizium (Si) mit dem Aluminium (Al) auf der Rückseite ein Eutektikum. Mit steigender Temperatur löst sich Silizium im Aluminium und es entsteht eine flüssige Al-Si-Schmelze. Während des Abkühlens rekristallisiert das Silizium am nicht gelösten Silizium der Basis. Die hochdotierte p^+ -Region wird durch eingebaute Aluminium Atome im Kristallgitter des rekristallisierten Siliziums gebildet [20]. Die Solarzellen mit ganzflächigem Al-BSF benötigen eine Kantenisolierung, um den elektrischen Kontakt der n -Region mit der p -Region über die Ecken des Wafers zu verhindern. Dies geschieht entweder nasschemisch nach der Phosphordiffusion oder mittels Laser am Ende

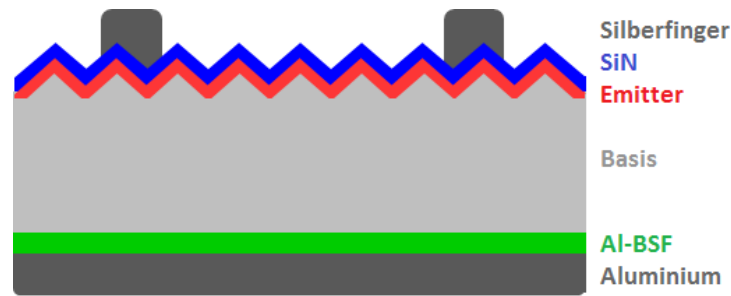


Abb. 2.1: Schemazeichnung einer Aluminium Back Surface Field (Al-BSF) Solarzelle.

der Prozessfolge. Typische Wirkungsgrade von monokristallinen Silizium Solarzellen mit ganzflächigem Al-BSF und homogen diffundiertem Emitter sowie Siebdruckkontakten liegen zwischen 18,5% und 19,4% [8, 21–23].

Neben der Optimierung der einzelnen Prozessschritte existieren zwei Zellkonzepte zur Erhöhung des Wirkungsgrades auf Basis der Al-BSF Solarzelle. Zum einen ist dies die Passivierung der Rückseite mit einer dielektrischen Schicht mit lokaler Aluminiumkontaktierung und zum anderen die Verwendung eines selektiven statt eines homogenen Emitters auf der Vorderseite.

2.2 Passivated Emitter and Rear Cell (PERC)

Solarzellen mit ganzflächigem Al-BSF werden durch die Reflexion und Rekombination auf der Rückseite limitiert [20]. Der ganzflächige Aluminium-Metallkontakt auf der Rückseite dient als Spiegel, der aber nur eine interne Reflexion von ca. 65% [24, 25] ermöglicht, wodurch der Lichteinfall besonders im langwelligen Bereich limitiert ist. Am Grenzflächenübergang zwischen Metall und Halbleiter ist die Rekombination von Elektron-Loch-Paaren sehr groß; das BSF dient nur als moderate Passivierung auf der Rückseite und erreicht Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeiten S_{rear} der Rückseite im Bereich von 200 cm/s bis 600 cm/s [26–29].

Durch die Anwendung einer dielektrischen Passivierung mit lokalen Kontakten auf der Rückseite der Silizium Solarzelle können die beiden genannten Verlustmechanismen verringert werden. Als dielektrische Passivierung gibt es verschiedene Möglichkeiten und Kombinationen, die gängigsten sind Schichtstapel aus $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiN}_x$ [30–33] oder $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$ [28, 34]. Die dielektrische Schicht zwischen Silizium und dem Metall auf der Rückseite erzeugt eine erhöhte Reflexion im Bereich von 90% [28, 29, 35], wodurch mehr Photonen in der Solarzelle absorbiert werden. Dies führt zu einer höheren Kurzschlussstromdichte J_{sc} . Zudem sorgt das Dielektrikum auf der Rückseite für eine verbesserte Passivierung im Vergleich zum Al-BSF und ermöglicht in Kombination mit der verringerten Metallkontaktfläche durch die lokalen Kontakte eine Verringerung der Rekombinationsgeschwindigkeit S_{rear} der gesamten Rückseite auf 40 cm/s bis 90 cm/s [28, 29, 35, 36], wodurch die Leerlaufspannung V_{oc} sowie J_{sc} erhöht werden.

Das Zellkonzept der Passivated Emitter and Rear Cell (PERC) [3] mit einer passivier-

ten und lokal kontaktierten Rückseite erzeugt die oben beschriebenen Verbesserungen der Rückseite und wird von vielen Zellherstellern und Forschungsinstituten als nächste Generation in der industriellen Herstellung angesehen [1]. Typische Wirkungsgrade liegen im Bereich von 20,0% bis 21,0% [4–9]. Bis November 2014 lag der Weltrekordwirkungsgrad einer PERC Solarzelle aus monokristallinem Czochralski (Cz) Silizium und beidseitig siebgedruckten Kontakten bei 21,2% [37], erzielt am ISFH im Rahmen dieser Doktorarbeit.

Neben den Verbesserungen in V_{oc} und J_{sc} gibt es auch negative Einflüsse durch die lokal kontaktierte Rückseite. Durch den horizontalen Transport haben die Ladungsträger im Vergleich zur vollflächigen Rückseitenkontaktierung eine längere Strecke zu diffundieren. Dieser Effekt erhöht den Serienwiderstand R_s , der wiederum den Füllfaktor FF verringert [38]. Durch diesen Zusammenhang hat der spezifische Widerstand des Basismaterials einen größeren Einfluss auf den Gesamtserienwiderstand der PERC Solarzelle. Die Herstellung einer PERC Solarzelle erfordert somit neben der Wahl der Passivierschicht eine Optimierung der Rückseitengeometrie, um das Optimum zwischen Rekombinations- und Widerstandsverlusten zu erzielen.

2.2.1 Prozessierung der PERC Solarzelle

Die Prozessierung der Solarzellen in dieser Arbeit wird im Folgenden anhand des Basisprozesses für PERC Solarzellen am ISFH [28, 37] beschrieben. Für die Herstellung der PERC Solarzellen werden als Ausgangsmaterial p -dotierte Cz-Wafer mit einer Basisdotierung von $2 \Omega\text{cm}$ auf einer Fläche von $156 \times 156 \text{ mm}^2$ im pseudo-square Format verwendet. Die Ausgangsdicke der Wafer vor der nasschemischen Prozessierung beträgt $180 \mu\text{m}$ bis $190 \mu\text{m}$. Das Flussdiagramm in Abb. 2.2 zeigt die Hauptprozesse der produzierten PERC Solarzellen.

Der Herstellungsprozess startet mit der Waferreinigung, welche in drei Schritte unterteilt ist. Zuerst durchlaufen die Wafer eine Puratron Reinigung, bei der Rückstände vom Sägen und Verunreinigungen auf der Waferoberfläche entfernt werden, gefolgt von einer auf Kaliumhydroxid (KOH) basierenden Damageätze. Abschließend folgt eine nasschemische RCA [39] oder HF/HCl Reinigung zur Entfernung von organischen und metallischen Rückständen, bevor auf die Rückseite der Wafer eine Schicht aus SiN_x mittels plasmaunterstützter chemischer Gasphasenabscheidung (PECVD, *engl.* Plasma-Enhanced Chemical Vapour Deposition) abgeschieden wird. Die Texturierung der Wafer erfolgt durch eine alkalische Lösung. Nach einer erneuten RCA Reinigung folgt ein Ofenprozess bei Temperaturen über $800 \text{ }^\circ\text{C}$, bei dem die Wafer Phosphoroxychlorid (POCl_3) ausgesetzt werden. Der dabei eindiffundierte Phosphoremitter erzeugt verschieden hohe Schichtwiderstände, je nach Dauer und Temperatur des Ofenprozesses. Der Emitterschichtwiderstand auf den finalen Solarzellen beträgt $70 \pm 5 \Omega/\text{sq}$, wenn in den jeweiligen Experimenten kein anderer Wert aufgeführt wird. Die auf der Rückseite aufgebraute dielektrische Schicht dient als Schutz vor Textur und Diffusion, wodurch diese Prozesse nur auf der Vorderseite stattfinden. Das Schutznitrid auf der Rückseite sowie das von der Diffusion zurückbleibende Phosphorsilikatglas (PSG) auf der Vorderseite werden in einem Ätzschritt mit Flußsäure (HF) entfernt. Vor der Passivierung werden die Wafer nochmals RCA gereinigt. Die



Abb. 2.2: Prozessfluss mit Auflistung der Hauptelemente des PERC Basisprozesses am ISFH.

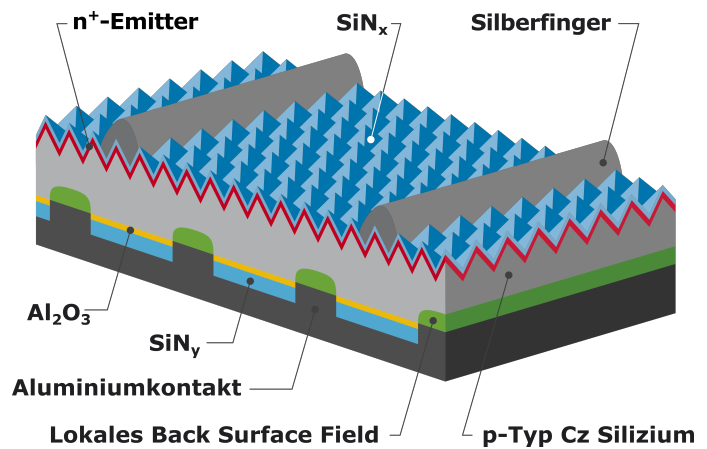


Abb. 2.3: Schemazeichnung der fertigen PERC Solarzelle am ISFH.

Rückseite der Wafer wird mit einem Schichtstapel aus $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiN}_y$ passiviert. Das Al_2O_3 wird mittels Atomlagenabscheidung (ALD, *engl.* Atomic Layer Deposition) aufgebracht. Die Dicke liegt je nach verwendeter Anlage bei 5 nm oder 10 nm. Die SiN_y Schicht hat eine Dicke von 200 nm und wird mittels PECVD Verfahren auf die Rückseite abgeschieden. Die Vorderseite wird mit einem SiN_x mit einem Brechungsindex von 2,05 beschichtet. Um optimale Antireflexionseigenschaften zu erhalten, beträgt die Dicke hier 70 nm auf Textur. Der Schichtstapel auf der Rückseite wird lokal linienförmig durch Laserablation (LCO, *engl.* Laser Contact Opening [40, 41]) bei einer Wellenlänge von 532 nm mit einem gepulsten Laser mit Pulsdauern zwischen 8 ps und 9 ps geöffnet, um die spätere Kontaktierung zu ermöglichen. Der Metallisierungsgrad auf der Rückseite der fertigen PERC Solarzellen beträgt ca. 12%.

Die Kontaktierung der Wafer wird durch Siebdruck erzeugt. Der Siebdruckprozess und die verschiedenen Techniken, um das Vorderseitengrid zu optimieren, werden ausführlich in den folgenden Kapiteln beschrieben. Für die Vorderseite wird eine Silberpaste verwendet, um die Fingerstruktur mit Busbars aufzubringen. Die Rückseite der Wafer wird ganzflächig mit einer Aluminiumpaste bedruckt, deren Schichtdicke je nach verwendeter Paste 30 μm oder 60 μm beträgt. Nach jedem Druckschritt folgt eine Trocknung der Siebdruckpaste in einem Infrarotdurchlaufofen bei ungefähr 200 °C. In der Industrie würden zur späteren Modulverschaltung auf der Rückseite noch lötbare Silber (Ag) Pads integriert, wohingegen die in dieser Arbeit beschriebenen Zellen ohne Löt pads auf der Rückseite hergestellt wurden. Der folgende Hochtemperaturschritt in einem Infrarotdurchlaufofen, das sogenannte Feuern, schließt den Prozess der PERC Solarzellen ab. Bei

Temperaturen bis 500 °C werden zuerst die Lösungs- und Bindemittel aus den Siebdruckpasten verbrannt. Während des Feuerprozesses bildet sich in den Kontaktöffnungen auf der Rückseite ein lokales Al-BSF sowie auf der Vorderseite der elektrische Kontakt zum Emitter mittels Ätzen der Silberpaste durch das SiN_x. Dies geschieht durch ein schnelles Aufheizen auf Temperaturen von ungefähr 800 °C, die für wenige Sekunden auf den Wafer einwirken. Weitere Erläuterungen zur Kontaktausbildung zum Emitter folgen in Kapitel 3. Abbildung 2.3 zeigt eine schematische Zeichnung der fertigen PERC Solarzelle.

Der beschriebene PERC Basisprozess des ISFH ist ein industrienaher Referenzprozess. Im Vergleich dazu wird in einem industriellen PERC Prozess keine Schutzschicht vor der Textur und Diffusion aufgebracht. Stattdessen wird ein ein- oder zweistufiger Polierprozess verwendet. Im einstufigen Prozess wird nach der Textur und Diffusion die Rückseite poliert, um den Emitter zu entfernen und die Rauigkeit zu reduzieren [42]. Der zweistufige PERC Industrieprozess besteht aus einer rückseitigen Politur nach der Textur und einer nasschemischen Kantenisolation nach der Diffusion [43]. Ein weiterer Unterschied sind die verwendeten Reinigungsprozesse. Die für den ISFH Prozess verwendete RCA Reinigung vor Passivierung ist teuer und wird daher in industriellen PERC Prozessen weggelassen oder stattdessen werden andere Reinigungssequenzen, wie z.B. HF/O₃ oder HF/HCl, benutzt [44].

2.3 Selektiver Emitter

Durch die Reduzierung der Ladungsträgerrekombination auf der Rückseite der PERC Solarzellen wird der Emitter auf der Vorderseite zum größten Verlustmechanismus der Rekombination [45]. Für eine weitere Steigerung des Wirkungsgrades von PERC Solarzellen in der Zukunft ist eine Optimierung des POCl₃ diffundierten Emitters nötig. Eine Option ist die Technologie des selektiven Emitters [3, 10, 11]. Diese Technologie zielt darauf ab, unter den Metallkontakten einen hochdotierten Emitter und zwischen den Kontakten einen niedrigdotierten Emitter zu erzeugen. Eine Übersicht der verschiedenen existierenden selektiven Emitter Technologien kann der Veröffentlichung von *Hahn* [46] entnommen werden.

Es folgt eine Beschreibung der Rekombination in der Solarzelle und deren Einfluss auf die Leerlaufspannung V_{oc} . Anschließend werden exemplarisch drei existierende Technologien zur Herstellung eines selektiven Emitters vorgestellt, die eine POCl₃ Diffusion verwenden.

Einfluss der Rekombination

Die beleuchtete Solarzelle lässt sich analytisch über ein 2-Dioden-Modell beschreiben [2]:

$$J(V) = J_{01} \left[\exp \left(\frac{V - JR_s}{n_1 \cdot V_{th}} \right) - 1 \right] + J_{02} \left[\exp \left(\frac{V - JR_s}{n_2 \cdot V_{th}} \right) - 1 \right] + \frac{V - JR_s}{R_p} - J_{ph}. \quad (2.1)$$

Die Stromdichte J ist dargestellt als Funktion der Spannung V und der Temperaturspannung V_{th} . Die Temperaturspannung V_{th} berechnet sich aus dem Produkt der Boltzmann-Konstante k_B und der Temperatur T dividiert durch die Elementarladung q zu einem

Wert von 25,7 mV bei $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$. J_{ph} ist die Photostromdichte, R_s der Serienwiderstand und R_p der Parallelwiderstand. Die Sättigungsstromdichte J_{01} beschreibt die Rekombinationsstromdichten im Emitter und der Basis, J_{02} die in der Raumladungszone. Für die Idealitätsfaktoren gilt im Idealfall $n_1 = 1$ und $n_2 = 2$.

Um den Einfluss der Rekombination im Emitter zu beschreiben, lässt sich das 2-Dioden-Modell vereinfachen. Der Serienwiderstand R_s und der Parallelwiderstand R_p werden vernachlässigt, was für kleine $R_s \leq 5 \text{ } \Omega\text{cm}^2$ und große $R_p \geq 10000 \text{ } \Omega\text{cm}^2$ annehmbar ist. Zudem wird die Rekombination in der Raumladungszone als vernachlässigbar angenommen ($J_{02} = 0$) und eine ideale Rekombination ($n_1 = 1$) in der Basis und der Oberfläche vorausgesetzt.

Daraus ergibt sich die Beschreibung der Solarzelle im 1-Dioden-Modell als beleuchteter pn -Übergang mit

$$J = J_0 \left[\exp \left(\frac{V}{V_{\text{th}}} \right) - 1 \right] - J_{\text{ph}}. \quad (2.2)$$

Die Rekombination in der Solarzelle ist gegeben durch die Sättigungsstromdichte J_0 . Unter V_{oc} Bedingungen fließt kein Strom ($J(V_{\text{oc}}) = 0$) und es gilt für die meisten Solarzellen $J_{\text{ph}} \approx J_{\text{sc}}$ [38]. Dann gilt nach Umformung von Gleichung 2.2

$$V_{\text{oc}} = \frac{k_B T}{q} \ln \left(\frac{J_{\text{sc}}}{J_0} + 1 \right). \quad (2.3)$$

Um die Leerlaufspannung und damit den Wirkungsgrad einer Solarzelle zu erhöhen, muss die Rekombination in Form von J_0 reduziert werden. Die Sättigungsstromdichte J_0 setzt sich folgendermaßen zusammen:

$$J_0 = J_{0b} + J_{0e}. \quad (2.4)$$

J_{0b} beschreibt die Sättigungsstromdichte in der Basis und an der Rückseite und J_{0e} im Emitter.

In Niedriginjektion ($\Delta n \ll N_A$) gilt für Basis- und Rückseitenrekombination

$$J_{0b} = \frac{q D n_i^2}{L_{\text{eff}} N_A}. \quad (2.5)$$

D ist der Diffusionskoeffizient der Minoritätsladungsträger in der Basis, n_i die intrinsische Ladungsträgerkonzentration, L_{eff} die effektive Diffusionslänge und N_A die Dotierkonzentration der Basis. L_{eff} ist definiert als

$$L_{\text{eff}} = L_b \cdot \frac{1 + S_{\text{rear}} L_b / D \cdot \tanh(W / L_b)}{S_{\text{rear}} L_b / D + \tanh(W / L_b)}, \quad (2.6)$$

wobei $L_b = \sqrt{D \cdot \tau_b}$ die Diffusionslänge der Minoritätsladungsträger und τ_b die Ladungsträgerlebensdauer in der Basis ist. W ist die Waferdicke und S_{rear} die Oberflächenrekombinationgeschwindigkeit der Rückseite.

Die Sättigungsstromdichte des Emitters setzt sich zusammen aus der Sättigungsstromdichte unter den Metallkontakten ($J_{0e,met}$) und der passivierten Fläche ($J_{0e,pass}$):

$$J_{0e} = f \cdot J_{0e,met} + (1 - f) \cdot J_{0e,pass}. \quad (2.7)$$

f ist definiert als die Metallisierungsfläche der Vorderseite. Die Berechnung der Sättigungsstromdichte im Emmitter ist aufgrund des vorhandenen Dotierprofils komplexer als für die Basis. Wie im späteren Verlauf dieser Arbeit gezeigt wird, lassen sich $J_{0e,pass}$ und $J_{0e,met}$ anhand verschiedener Messmethoden direkt bestimmen. Allgemein gilt, dass die Emittersättigungsstromdichte von dem Dotierprofil, der Oberflächenkonzentration der Dotierung, der Eindringtiefe des Emitters und der Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeit S_{front} der Vorderseite abhängt [47].

Im Fall von $J_{0e,pass}$ führt beispielsweise eine geringere Oberflächendotierkonzentration zu einem Ansteigen der Diffusionslänge im Emmitter und dadurch zur Reduzierung der Sättigungsstromdichte. Ebenso kann durch Verkleinerung der Emittertiefe der Verlust durch die Emittersättigungsstromdichte reduziert werden. Durch das Zusammenspiel von Oberflächenkonzentration der Dotierung und Emittertiefe ist der Emitterschichtwiderstand eine gute Größe zur Beurteilung der Emittersättigungsstromdichte.

Das umgekehrte Verhalten zeigt sich für $J_{0e,met}$, bei dem allgemein tiefe und hochdotierte Emmitter kleinere Emittersättigungsstromdichten erzeugen. Der Grund dafür liegt im unterschiedlichen S_{front} der passivierten und metallisierten Flächen des Emitters. Während für einen Emmitter mit einer Oberflächendotierkonzentration im Bereich von $2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ mit SiN_x Passivierung $S_{front,pass}$ in der Größenordnung 10^4 cm/s [45] bis 10^5 cm/s [48] erreicht werden, ist die Rekombination unter den Metallkontakten in der Größenordnung 10^7 cm/s durch die thermische Geschwindigkeit der Minoritätsladungsträger im Metall-Silizium Kontakt. Je größer S_{front} , desto weiter verschiebt sich die minimal erreichbare Emittersättigungsstromdichte zu höheren Oberflächendotierkonzentrationen [47]. Daher lässt sich durch einen selektiven Emmitter die Emittersättigungsstromdichte J_{0e} verringern und nach Gleichung 2.3 die Leerlaufspannung V_{oc} vergrößern.

Laserdotieren mit Phosphorsilikatglas

Das Laserdotieren mit Phosphorsilikatglas [49, 50] wurde vom Institut für Photovoltaik der Universität Stuttgart entwickelt und hat einen seiner Vorteile im einfachen Prozessablauf. Das nach der Phosphordiffusion auf der Vorderseite entstandene PSG dient als Dotierquelle und wird mittels Laserprozess strukturiert, siehe Abbildung 2.4 a). Es wird nur der Bereich unter den später aufgebrachten Kontaktfingern mit einem Laser beschossen, um dort einen hochdotierten Emmitter zu erzeugen. Dadurch kann für die Zwischenfingerbereiche eine schwache Dotierung verwendet werden, während die Kontaktierung des hochdotierten Emmitterbereichs zu einer Verringerung des spezifischen Kontaktwiderstandes führt. Nach dem Laserprozess kann mit dem normalen Prozessablauf fortgefahren werden, so dass nur ein zusätzlicher Prozessschritt für die Herstellung des selektiven Emitters mittels Laserdotieren nötig ist.

Das Prinzip dieser Technik besteht darin, dass durch die einwirkende Laserenergie das Silizium lokal aufgeschmolzen wird und zusätzliche Phosphoratome von der PSG Schicht

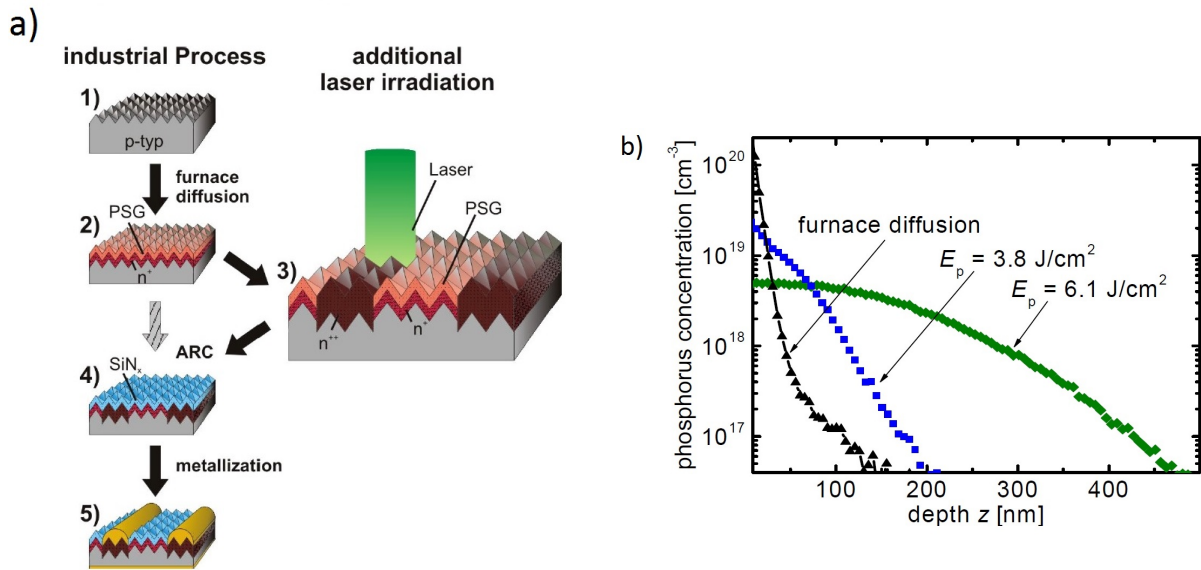


Abb. 2.4: a) Prozessfluss von Solarzellen mit ganzflächigem Al-BSF und selektivem Emitter durch Laserdotieren. Nach der Herstellung eines schwach dotierten Emitters mit Phosphorsilikatglas (PSG) durch eine POCl_3 Diffusion folgt der zusätzliche Prozessschritt im Vergleich zum Basisprozess. Eine Strukturierung der Vorderseite mittels Laserbestrahlung führt zu einer Erhöhung der Phosphorkonzentration im Emitter, das PSG dient dabei Dotierquelle. b) Vergleich des SIMS Dotierprofils einer POCl_3 Ofendiffusion zu zwei unterschiedlich laserdotierten Profilen. Die Laserbestrahlung erhöht die Emittertiefe und verringert die Peakkonzentration des Phosphors durch Aufschmelzen des Siliziums bei hohen Pulsenergie-dichten. Aus dem PSG diffundieren zusätzliche Phosphoratome in die Schmelze. Abbildungen aus [49].

in die Schmelze diffundieren [49, 50]. Des Weiteren werden bereits durch die Diffusion vorhandene Phosphoratome auf den Zwischengitterplätzen aktiviert. Mittels der eingestrahelten Energiedichte des Laserpulses kann die Oberflächenkonzentration und Tiefe des Dotierprofils eingestellt werden [50], wie in Abbildung 2.4 b) gezeigt.

Die Limitierung dieses Prozesses liegt in der erreichbaren Emittersättigungsstromdichte J_{0e} durch die verwendete POCl_3 Diffusion. Durch die Weiterentwicklung der Silbersiebdruckpasten für die Kontaktfinger auf der Vorderseite verringert sich der Wirkungsgradgewinn durch diesen Prozess, wenn der spezifische Kontaktwiderstand auf einem hochohmigen homogenen POCl_3 Emitter näherungsweise den gleichen Wert annimmt wie nach dem Laserdotieren. Diese Entwicklung des spezifischen Kontaktwiderstandes für verschieden dotierte Emitterprofile mit den neuesten Pastengenerationen wird in Kapitel 7.2 untersucht.

Druck einer Dotierpaste

Die Verwendung von phosphordotierten Pasten mit unterschiedlichem Phosphoranteil und anschließendem Hochtemperaturprozess zur Herstellung eines selektiven Emitters ist ein bekanntes Konzept [51], welches mehrere zusätzliche Prozessschritte erfordert. Eine

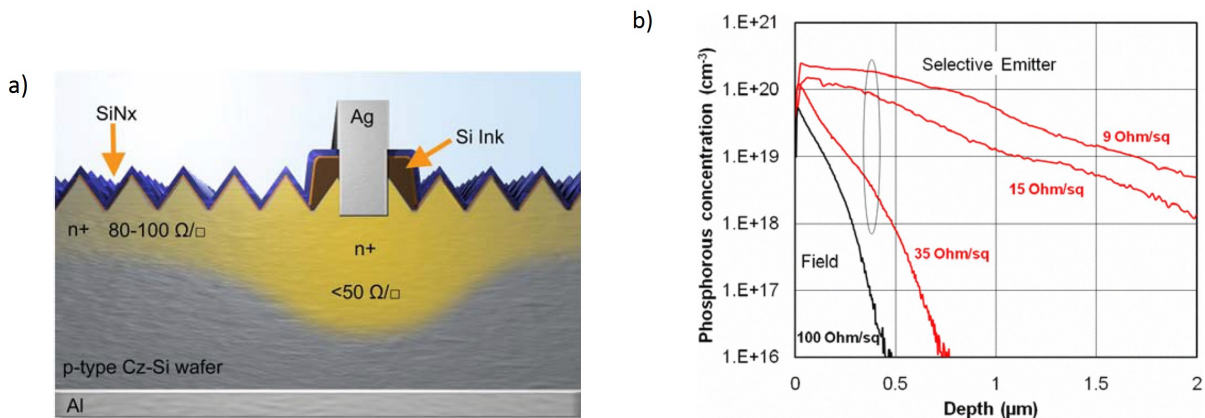


Abb. 2.5: a) Schematische Zeichnung einer Al-BSF Solarzelle im Querschnittsprofil mit selektivem Emittter mittels aufgedruckter Tinte, die hochdotierte Silizium Nanopartikel enthält. Abbildung aus [53]. b) SIMS Profil einer $100 \Omega/\text{sq}$ Diffusion im Vergleich zu drei beispielhaften Dotierprofilen, die zusätzliches Phosphor durch die aufgedruckte Tinte mit hochdotierten Silizium Nanopartikeln erhalten. Abbildung aus [52].

weniger aufwendige Technologie wurde von Innovalight, Inc. (Sunnyvale, U.S.) entwickelt. Dabei werden hochdotierte Silizium Nanopartikel in einer Tinte mittels Siebdruck oder Inkjet vor der Diffusion auf den Wafer aufgebracht [52, 53]. Die Tinte wird dabei nur in den Bereichen der späteren Vorderseitenkontakte aufgedruckt. Eine nachfolgende schwache Diffusion ($80 \Omega/\text{sq}$ - $100 \Omega/\text{sq}$) treibt die Phosphoratome der Tinte mit ein und sorgt für die Selektivität mit einer starken Dotierung ($30 \Omega/\text{sq}$ - $50 \Omega/\text{sq}$) unter den Kontakten, wie in Abbildung 2.5 a) dargestellt. Neben dem Druckschritt benötigt diese Technologie noch einen weiteren zusätzlichen Prozessschritt: die Trocknung der Tinte, um die enthaltenen Lösungsmittel nach dem Aufbringen zu verdampfen.

Abbildung 2.5 b) zeigt das SIMS (*engl.* Secondary Ion Mass Spectroscopy) Profil einer verwendeten $100 \Omega/\text{sq}$ Diffusion für die Bereiche zwischen den Kontaktfingern. Zusätzlich sind drei mögliche Dotierprofile unter den Kontakten dargestellt, die durch Verwendung von Tinten mit unterschiedlichen Phosphoranteilen in Kombination mit dem Eintreiben durch die Diffusion entstehen. Durch die erhöhte Oberflächenkonzentration des Phosphors lassen sich diese Emittterbereiche einfacher kontaktieren bzw. erzeugen einen geringeren Kontaktwiderstand [54].

Ebenso wie im vorher beschriebenen Prozess des Laserdotierens ist auch hier der Wirkungsgradgewinn limitiert durch die Emittersättigungsstromdichte J_{0e} der verwendeten POCl_3 Diffusion. Der Unterschied zwischen den beiden Verfahren besteht darin, dass die Oberflächenkonzentration des Phosphors bei Verwendung der dotierten Tinte im Vergleich zur Diffusion ansteigt, während sie beim Laserdotieren abnimmt.

Nasschemisches Rückätzen

Das Prinzip des nasschemischen Rückätzens zur Herstellung eines selektiven Emitters basiert auf dem Prozess von *Zerga et al.* [55] und wurde von der Universität Konstanz

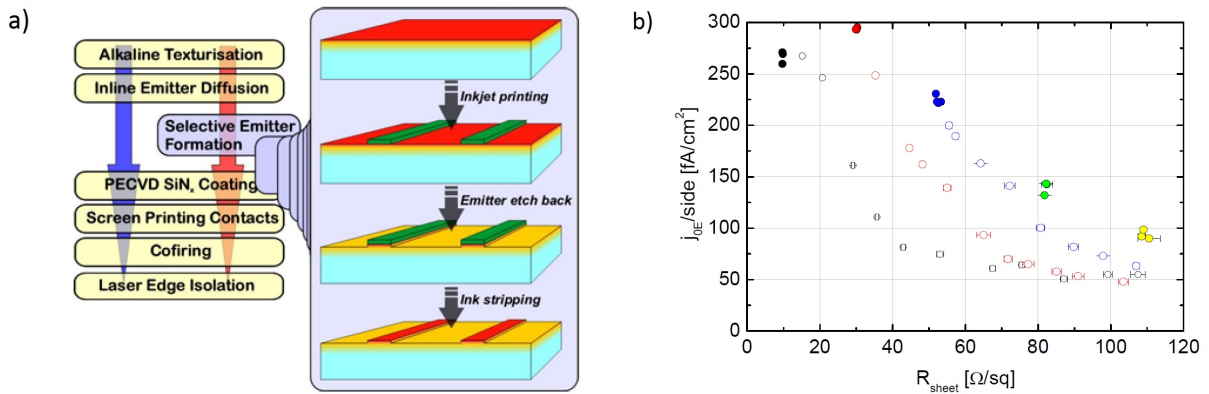


Abb. 2.6: a) Vergleich der Prozesssequenz für Solarzellen mit ganzflächigem Al-BSF und homogen diffundiertem POCl_3 Emitter (blauer Pfeil) zu einem selektivem Emitter mittels naschemischen Rückätzverfahren (roter Pfeil). Für die Herstellung des selektiven Emitters wird nach der Diffusion lokal eine Ätzmaske aufgedruckt. Der Emitter wird in einer naschemischen Lösung zurückgeätzt und abschließend die Ätzmaske wieder entfernt. Abbildung aus [57]. b) Emittersättigungsstromdichten J_{0e} von POCl_3 Diffusionen (ausgefüllte Kreise) und zurückgeätzten Emitttern (offene Kreise). Für den selben Emitterschichtwiderstand erzielen die zurückgeätzten Emitter eine geringere J_{0e} als eine herkömmliche Diffusion durch die Reduzierung der Oberflächenkonzentration des Phosphors im Emitter. Abbildung aus [59].

weiterentwickelt [56, 57]. Bei dieser Technologie wird nach einer starken Phosphordiffusion mit einem Schichtwiderstand im Bereich von $30 \text{ } \Omega/\text{sq}$ bis $50 \text{ } \Omega/\text{sq}$ [57] eine Ätzbarriere mittels Siebdruck oder Inkjet aufgedruckt, die lokal unter den späteren Kontakten das Rückätzen des Emitters in der nachfolgenden naschemischen Prozedur verhindert, wie in Abbildung 2.6 a) dargestellt. Das Rückätzen des Emitters im Bereich von einigen zehn Nanometern in den Zwischenfingergebieten sorgt für eine geringere Oberflächenkonzentration des Phosphors bei einem dennoch tiefen Emitterprofil und lässt den Emitterschichtwiderstand ansteigen. Nach dem Rückätzen wird die Ätzbarriere entfernt, so dass je nach Art der PSG Entfernung zwei bis drei zusätzliche Prozessschritte benötigt werden. Die oberste hochdotierte Schicht des Emitters, der sogenannte Dead Layer, ist rekombinationsreich durch die mit der Dotierung anwachsende Auger-Rekombination [58]. Durch die Entfernung der obersten Schicht des Emitters verringert sich die Emittersättigungsstromdichte J_{0e} im passivierten Bereich in den Zwischenfingergebieten. Ein Vergleich der erreichbaren J_{0e} Werte von POCl_3 Diffusionen und zurückgeätztem Emitter ist in Abbildung 2.6 b) dargestellt. Bei gleichem Emitterschichtwiderstand erzielen die zurückgeätzten Emitter (offene Kreise) immer eine geringere Emittersättigungsstromdichte als eine herkömmliche POCl_3 Diffusion (ausgefüllte Kreise) [46, 56, 57].

Beim Vergleich der drei Techniken zeigt sich, dass alle den Silberfingern eine gute Kontaktausbildung zum Emitter ermöglichen. Dagegen ist das Emitterrückätzen nicht durch die erreichbare J_{0e} einer POCl_3 Diffusion limitiert. Die ausgefüllten gelben Kreise aus Abbildung 2.6 b) mit einer J_{0e} von ca. $90 \text{ fA}/\text{cm}^2$ können als Referenzwert für eine POCl_3 Diffusion angesehen werden, wie sie für das Laserdotieren und den Druck einer Dotierpaste im passivierten Bereich der Vorderseite verwendet wird. Das Emitterrückät-

zen erzielt dagegen Werte von minimal 50 fA/cm^2 . Im passivierten Bereich, der über 90% der Emitterfläche einnimmt, erzielt die Technologie des Emitterrückätzens folglich eine deutlich geringere Rekombination und höhere Leerlaufspannung V_{oc} . Der Nachteil beim Emitterrückätzen liegt im komplexeren Prozess, der mehr Prozessschritte erfordert, um den selektiven Emitter herzustellen.

In Kapitel 7 wird eine neu entwickelte Technik zur Herstellung eines selektiven Emitters gezeigt, die auf dem Emitterrückätzen basiert und zudem den Vorteil weniger Prozessschritte besitzt.

3 Metallisierung mittels Siebdruck

Dieses Kapitel beschreibt die Grundlagen des Siebdruckprozesses. Zusätzlich zu den damit verbundenen Einzelprozessen werden die Kontaktformierung zum Emitter und der Stromtransport auf der Vorderseite behandelt. Anhand dreier Varianten des Siebdrucks wird der aktuelle Stand der Forschung zur Optimierung der Vorderseitenkontakte erläutert.

3.1 Siebdruckprozess

Die am häufigsten in der Industrie eingesetzte Metallisierungstechnologie für die Kontakte auf Silizium-Solarzellen ist der Siebdruckprozess [1], der für alle in dieser Arbeit hergestellten Solarzellen verwendet wird. Abbildung 3.1 zeigt schematisch den Siebdruckprozess sowie die Siebstruktur im vergrößerten Ausschnitt. Das Druckraket, bestehend aus einem Rakelhalter und einem Rakelgummi aus Polyurethan, fährt über das Sieb mit den Öffnungen für die gewünschte Kontaktstruktur und drückt eine metallhaltige Paste auf den unter dem Sieb liegenden Siliziumwafer. Diese Paste besteht für die Solarzellen in dieser Arbeit aus Silberpartikeln für die Vorderseite und Aluminiumpartikeln beim Rückseitendruck. Charakterisiert wird das Rakelgummi über den Härtegrad, welcher standardmäßig in dieser Arbeit bei Shore 75A liegt, soweit nichts anderes beschrieben wird. Zudem gibt es verschiedene Rakelgeometrien. In dieser Arbeit wird für die Metallisierung auf der Solarzellenvorderseite ein Schleppraket verwendet, so wie in Abb. 3.1 schematisch dargestellt. Die Aluminiumrückseite wird dagegen mit einem sogenannten Diamantraket gedruckt. Für die Vorderseitenmetallisierung wird bevorzugt ein Schleppraket eingesetzt, da es durch eine höhere Nachgiebigkeit Unebenheiten z.B. auf dem Wafer besser ausgleichen kann. Im Gegensatz dazu ist ein Diamantraket relativ steif in die Halterung eingebaut und kann bei Unebenheiten keinen gleichmäßigen Druck ausüben. Die unterschiedliche Wahl der Rakelform ist auf den Einsatz zwei verschiedener Siebdruckmaschinen für die Metallisierung der Vorder- und Rückseite zurückzuführen. Während des Druckprozesses wird ein vertikaler Druck durch das Rakel ausgeübt, der das Sieb mit der Waferoberfläche in Kontakt bringt und gleichzeitig die Paste durch die Sieböffnungen drückt, um den Pastentransfer auf den Wafer zu ermöglichen. Die dabei verwendete Paste bleibt durch Adhäsionskräfte auf der Oberfläche des Wafers haften, während sich das Sieb im fortlaufenden Druckprozess wieder vom Wafer löst und in seine Ursprungsposition geht. Je nach gewähltem Prozess ist für die Bewegung des Rakelhalters in die entgegengesetzte Richtung zusätzlich zum Druckraket entweder ein sogenanntes Flutraket montiert, welches keinen mechanischen Druck auf das Sieb ausübt und nur die Paste in die Sieböffnungen verteilt, oder ein zusätzliches Druckraket, wodurch der

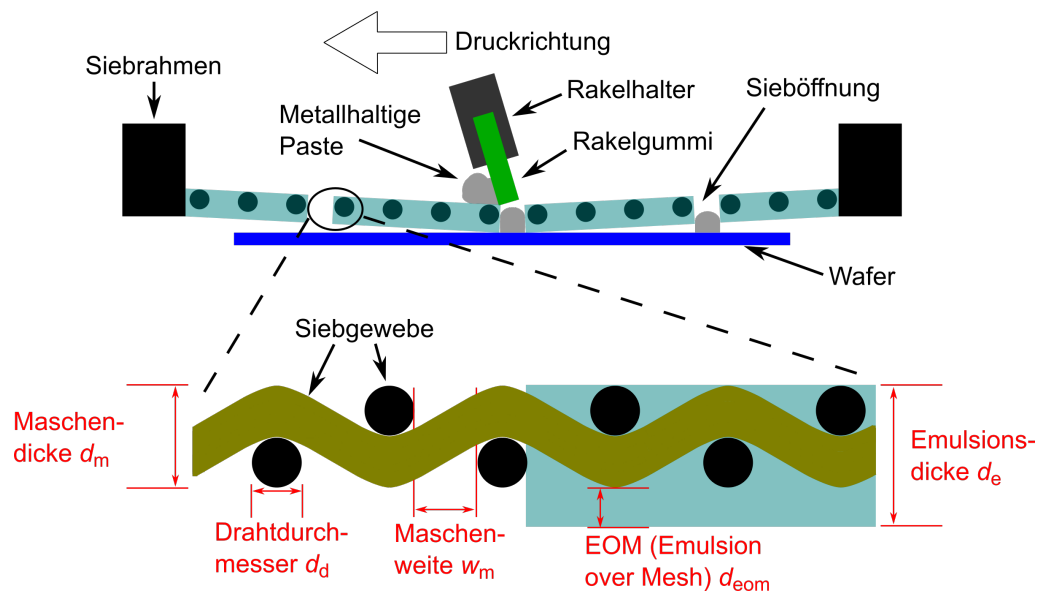


Abb. 3.1: Schematische Darstellung des Siebdruckprozesses. Das Druckraket, bestehend aus Rakethalter und Raketgummi, fährt während des Druckprozesses über das Sieb mit den Öffnungen für die gewünschte Kontaktstruktur. Ein vertikaler Druck bringt das Sieb in Kontakt mit dem darunter liegenden Wafer. Gleichzeitig wird die Paste durch die Öffnungen für die Kontaktstruktur gedrückt. Die Paste bleibt durch Adhäsionskräfte auf dem Wafer haften, während das Sieb im Verlauf des Druckprozesses wieder in seine Ursprungsposition übergeht.

nachfolgende Siliziumwafer bedruckt wird.

Das verwendete Sieb spielt insbesondere für die Qualität des Druckbildes der Fingerstruktur auf der Vorderseite eine zentrale Rolle. Wie in Abbildung 3.1 dargestellt, ist das Sieb in einem Rahmen befestigt. Die Befestigung des Siebgewebes wird unter hoher Spannung ausgeführt; die Kenngröße nennt man Sieb- oder Gewebespannung. Das Sieb selbst besteht aus einem Edelstahldraht- oder Polyestergewebe, welches durch die Maschenweite w_m und den Drahtdurchmesser d_d definiert ist, sowie einer Emulsionsschicht der Dicke d_e . Als Siebparameter der Emulsion wird meistens die Dicke EOM (*engl.* Emulsion Over Mesh) angegeben, die sich aus der Differenz der Emulsionsdicke d_e und der Maschendicke d_m berechnet. Die Maschendicke ist immer geringfügig kleiner als der doppelte Drahtdurchmesser, da die Drähte durch die Siebspannung eng aneinander gepresst werden [60]. Die Emulsion wird photolithographisch mit dem gewünschten Kontaktgrid strukturiert, in dem eine photosensitive flüssige Emulsion auf das Maschendrahtgewebe aufgebracht und durch Beleuchtung ausgehärtet wird. Dabei verdeckt ein Bild des Kontaktgrids die Bereiche der späteren Sieböffnung. Dadurch bleibt die Emulsion in diesen Bereichen auch nach der Beleuchtung flüssig und kann mit einer auf Wasser basierenden Lösung ausgewaschen werden. Für die Qualität des Druckes spielen vor allem die Emulsionsdicke d_e , die Maschendicke d_m , der Drahtdurchmesser d_d und die Maschenweite w_m eine Rolle [61]. Eine typische Kenngröße für das spätere Druckbild ist die offene Siebfläche a_o , welche prozentual den Anteil aller Maschenöffnungen an der gesamten Siebfläche

beschreibt:

$$a_o = \frac{w_m^2}{(w_m + d_d)^2}. \quad (3.1)$$

Für den Vorderseitensiebdruck ist eine große offene Siebfläche a_o von Vorteil. Insbesondere beim Druck von schmalen Fingern unter 50 μm kann eine a_o unter 60% zu Fingerunterbrechungen führen, wenn die Fingeröffnungsbreite im Sieb stellenweise komplett durch das Siebgewebe verdeckt wird. Dünne Drähte und eine große Maschenweite wären daher die gewünschten Siebparameter, welche sich aber negativ auf die Haltbarkeit der Siebe und Stabilität der Siebspannung auswirken. Die Haltbarkeit - die Anzahl der durchführbaren Drucke pro Sieb - wirkt sich unmittelbar auf die Prozesskosten aus. Eine dauerhaft hohe Siebspannung wirkt sich hingegen positiv auf das erzeugte Druckbild aus. Um die Abdeckung der zu druckenden Fingerstruktur an einzelnen Stellen nicht zu groß werden zu lassen und damit Unterbrechungen der Kontaktfinger zu riskieren, werden bei schmalen Fingeröffnungsbreiten kleine Drahtdurchmesser d_d und eine große Anzahl von Maschen pro Zoll verwendet, das heißt eine kleine Maschenweite. Dies sorgt für eine hohe offene Siebfläche a_o bei gleichzeitig guter Stabilität des Siebes.

Die Qualität des Druckbildes der Vorderseite ist neben dem Sieb auch abhängig von den folgenden Prozessparametern beim Siebdruck [61]:

a) Rakeldruck

Der Kontakt zwischen Sieb und Waferoberfläche wird durch Anlegen einer vertikalen Kraft auf das Druckrakel, dem Rakeldruck, erzielt. Der Rakeldruck muss mindestens so groß gewählt werden, dass die Siebspannung überwunden wird und das Sieb während des Druckvorgangs den Wafer berührt. Ein typischer Rakeldruck für den Siebdruck, ausgedrückt in Masse, ist 5 kg [62] für den verwendeten DEK Eclipse Drucker. Allgemein führt eine Erhöhung des Rakeldrucks zu einer Verringerung des Aspektverhältnisses von Höhe zu Breite der Kontaktfinger [63]. Ein größerer Rakeldruck erzeugt eine stärkere Rakelverformung und damit durch einen verringerten effektiven Rakelwinkel eine Erhöhung des Staudrucks auf die Silberpaste [60]. Dies kann zu einem Verschmieren der Paste auf dem Wafer und damit zu einer Verbreiterung der Kontaktfinger führen. Gleichzeitig bewirkt ein hoher Rakeldruck eine stärkere Abnutzung von Rakelgummi und Sieb.

b) Rakelgeschwindigkeit

Die Rakelgeschwindigkeit kennzeichnet die Geschwindigkeit, mit der das Rakel während des Druckprozesses über das Sieb fährt. Die optimale Rakelgeschwindigkeit hängt dabei hauptsächlich von der Pastenrheologie ab. Ein typischer Wert für die Rakelgeschwindigkeit liegt bei 200 mm/s [62]. Da die Rakelgeschwindigkeit die Dauer des Druckprozesses und damit den Durchsatz mitbestimmt, wird in der Industrie eine hohe Rakelgeschwindigkeit bevorzugt. Eine Erhöhung der Rakelgeschwindigkeit erzeugt größeren Druck auf die Paste, was eine Reduzierung der Pastenviskosität zur Folge hat. Dies führt allgemein zu einem verbesserten Einbringen der Paste in die Fingeröffnungen und dadurch vergrößertem Aspektverhältnis auf Kosten der

Homogenität der Höhe entlang des Fingers [63]. Eine zu hohe Rakelgeschwindigkeit führt zu einer geringeren Haftung der Paste auf dem Sieb und damit unvollständig gefüllten Fingeröffnungen.

c) Absprung

Der Absprung ist definiert als die Distanz zwischen der Unterseite des Siebes und der Oberfläche des Wafers. Der Absprung ist ein entscheidender Faktor für das Auslöseverhalten der Paste aus dem Sieb [60]. Der Wertebereich für den gewählten Absprung beim Siebdruck liegt normalerweise zwischen 1,0 mm und 2,0 mm, ein gebräuchlicher Wert ist 1,5 mm [62]. Eine Erhöhung des Absprungs lässt typischerweise das Aspektverhältnis ansteigen. Ebenso wie bei der Rakelgeschwindigkeit erfolgt dies aber auf Kosten der Homogenität der Höhe entlang des Fingers [63]. Daraus folgt ein höherer Silberpastenverbrauch bei möglicherweise nur geringer Reduzierung des Linienwiderstandes. Ist die Distanz zwischen Sieb und Wafer zu groß, bewirkt dies ein schnelles Ablösen des Siebes von der Waferoberfläche, wodurch die Paste nicht komplett aus den Fingeröffnungen fließen kann und Unterbrechungen der Kontaktfinger entstehen.

Für die Metallisierung von Phosphor-dotierten Emittlern werden üblicherweise silberhaltige Pasten verwendet. Silber hat einen geringen spezifischen Widerstand ($\rho_{\text{Ag}} = 1,62 \mu\Omega\text{cm}$ bei 25°C [64]), verursacht aber durch den hohen Preis ($\$500/\text{kg}$, Stand Oktober 2015) neben dem Siliziumwafer die größten Materialkosten in der Solarzellenproduktion [65]. Die Silberpasten sind eine der prozesskritischsten Materialien, da sie den Wirkungsgrad maßgeblich beeinflussen und eine gute Haftung auf der Siliziumoberfläche erzeugen müssen. Das Druckbild der Vorderseite ist abhängig von der Rheologie der Silberpaste [66]. Durch die Druckbarkeit und damit die Breite der Kontaktfinger wird die Abschattung und infolgedessen die Kurzschlussstromdichte J_{sc} beeinflusst. Die Rekombination im Emitter unter den Metallkontakten wirkt sich wiederum auf die Leerlaufspannung V_{oc} aus. Der Kontaktwiderstand zum Emitter, sowie der spezifische Widerstand der Silberpaste in Verbindung mit dem Fingerquerschnitt, bestimmen den Füllfaktor FF mit. Alle in dieser Arbeit verwendeten Pasten wurden von Herstellern aus der Industrie zur Verfügung gestellt. Dabei wurden kommerziell erhältliche Pasten sowie vereinzelt Entwicklungspasten für die verschiedenen Experimente verwendet.

Silberpasten bestehen im Wesentlichen aus den drei Hauptkomponenten [67] Silberpulver, Glasfritte sowie Lösungs- und Bindemittel. Die Silberpartikel haben eine Größe von wenigen Mikrometern, um bei einer Agglomeration nicht die Fingeröffnungen im Sieb zu verstopfen. Die Lösemittel in den Pasten dienen dazu, die Interaktion von Silberpartikeln untereinander zu verhindern. Die Lösungs- und Bindemittel bestimmen auch die Rheologie der Silberpaste. Die Silberpasten zeigen ein sogenanntes thixotropisches Verhalten, was bedeutet, dass sich die Viskosität mit Einwirken eines mechanischen Drucks ändert. Der Staudruck auf die Paste durch die Bewegung des Rakels sowie der vertikal ausgeführte Rakeldruck führen zu einer stark reduzierten Viskosität während des Pastentransfers durch die Sieböffnungen auf den Wafer. Nach Beendigung des mechanischen Drucks, in dem Fall nach dem Auslösen der Paste aus dem Sieb, steigt die Viskosität wieder an. Dieses verhindert das Zerfließen der Paste auf dem Wafer.

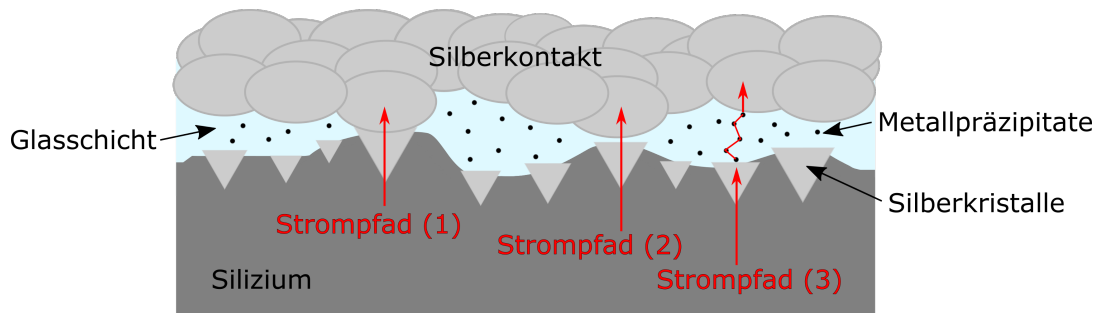


Abb. 3.2: Schematische Darstellung der möglichen Strompfade zwischen Silizium und den Silberkontakten auf der Vorderseite, ausgehend von verschiedenen Modellen [70–78]. Der Stromtransport ist möglich über lokale, direkte Verbindungen von Silizium und Silberkontakt (Strompfad (1)), über quasi-direkte Verbindung von Silizium und Silberkontakt mit einer wenige Nanometer dünnen Schicht aus Glas (Strompfad (2)) und über Multi-tunneln vom Silizium zum Silberkontakt durch die isolierende Glasschicht via Metallpräzipitate (Strompfad (3)).

Die Silberpartikel in Verbindung mit den Glasfritten, die typischerweise aus bleioxidhaltigem Silikatglas bestehen, sind für den Prozess der Kontaktformierung im Hochtemperaturschritt verantwortlich. Umfassende Untersuchungen und Erklärungen zu den chemischen und physikalischen Prozessen während der Kontaktformierung wurden von *Schubert et al.* [67, 68] durchgeführt. Die Glasfritte ätzt bei Temperaturen über 700 °C durch die SiN_x Schicht und reduziert zusätzlich den Schmelzpunkt der Silberpartikel. An den Stellen, wo kein Siliziumnitrid mehr vorliegt, kommt es zu einer Redoxreaktion zwischen den bei hohen Temperaturen geschmolzenen Glasfritten und dem Silizium. Durch den Kontakt mit den flüssigen Glasfritten schmelzen ebenso die Silberpartikel und es entsteht eine flüssige Silber-Blei-Phase. Bei Kontakt der Silber-Blei-Schmelze mit der Siliziumoberfläche kommt es zur Ausbildung von invertierten Pyramidenstrukturen im Silizium. Während des Abkühlens rekristallisiert das Silber epitaktisch an den Ebenen der invertierten Pyramiden. Zusätzlich entsteht eine Glasschicht zwischen den Silberkontakten auf der Vorderseite und den Silberkristallen im Silizium.

Nach der Theorie der Kontaktformierung auf der Vorderseite während des Hochtemperaturschrittes [67, 68] gibt es einen optimalen Temperaturbereich, in dem der spezifische Kontaktwiderstand durch den besten Kompromiss zwischen der Dicke der Glasschicht und der Anzahl der Silberkristalle im Silizium und der Glasschicht minimal ist [69]. Bei einer niedrigeren Temperatur als dem optimalen Bereich wird das Siliziumnitrid unvollständig geätzt und das Wachsen der Silberkristalle im Silizium ist ungenügend. Bei zu hohen Temperaturen steigt die Anzahl und die Größe der Silberkristalle im Silizium an, aber es entsteht eine dickere Glasschicht zwischen den Silberfingern und den Silberkristallen, die im direkten Kontakt zum Emitter stehen [67]. Beide Effekte der zu niedrig oder zu hoch gewählten Temperatur lassen den spezifischen Kontaktwiderstand ansteigen [67]. Neben der Kontaktausbildung ist auch der Strompfad auf der Vorderseite der Siebdruck-solarzellen ein kontrovers diskutiertes Thema. Für den Stromtransport zwischen Emitter und Silberkontaktfinger werden in der Literatur [69, 79–81] drei verschiedene Wege beschrieben, die in Abbildung 3.2 dargestellt sind. Die drei möglichen Strompfade sind:

lokale, direkte Verbindung von Silberkontakt und Silizium [70, 73, 75, 76], quasi-direkte Verbindung von Silberkontakt und Silizium mit einer wenige Nanometer dünnen Zwischenschicht aus Glas [73, 74, 77, 78] und Multi-tunneln vom Silizium zum Silberkontakt durch die isolierende Glasschicht via Metallpräzipitate (Silber und Blei) [71, 72, 77, 78]. Welcher dieser Mechanismen der dominierende Stromtransport ist, konnte bislang nicht vollständig geklärt werden [81].

Die Metallisierung durch Siebdruck auf der Zellvorderseite stellt einen wichtigen Baustein für die Verbesserung des Wirkungsgrades von Solarzellen dar, weswegen sich ein Großteil dieser Arbeit mit dessen Optimierung beschäftigt. Eine Möglichkeit zur Erhöhung des Wirkungsgrades ist die Reduzierung der Fingerbreite der Silberfinger auf der Vorderseite, um die Abschattungsverluste zu reduzieren und damit die Kurzschlussstromdichte J_{sc} zu erhöhen. Typische Metallisierungsgrade der Vorderseite liegen bei 6% bis 7%. Eine reine Reduzierung der Metallisierungsfläche durch schmalere Silberfinger führt aber zwangsläufig zu einer Vergrößerung des Kontaktwiderstandes zum Emitter und des Fingerlinienwiderstandes. Bei einem geringen spezifischen Kontaktwiderstand erhöht sich der Serienwiderstandsanteil des Kontaktes durch eine schmalere Fingerbreite nur unwesentlich. Um dagegen den Fingerlinienwiderstand nicht ansteigen zu lassen, benötigen die schmalere Silberkontakte größere Fingerhöhen. Des Weiteren ist neben einer großen Querschnittsfläche ein homogenes Höhenprofil des Kontaktfingers erstrebenswert.

Neben dem beschriebenen Einfachdruck mit einem Sieb, dem sogenannten Single Print, werden auch andere Drucktechniken in der Forschung untersucht und weiterentwickelt, um Verbesserungen der Vorderseitenkontakte zu ermöglichen. Zwei dieser Drucktechniken werden im Rahmen dieser Arbeit optimiert und im Folgenden vorgestellt sowie die Vor- und Nachteile erläutert. Anhand des Single Print und der anderen beiden Drucktechniken wird ein kurzer Überblick über den Stand der Forschung zu Anfang dieser Arbeit gegeben.

3.2 Single Print

Der Einfachdruck (*engl.* Single Print) ist im Moment der am weitesten verbreitete Prozess für die Metallisierung der Silberkontakte von Silizium Solarzellen [1]. Beim Single Print werden in einem Druckschritt mit dem Sieb die gesamten Vorderseitenkontakte aus Fingern und Busbars gedruckt (siehe Abbildung 3.3). Diese einstufige Metallisierung der gesamten Solarzellenvorderseite ist der Grund für die häufige Verwendung, da neuere Metallisierungstechniken zwar oftmals ein Verbesserungspotenzial bieten, aber durch zusätzlich nötige Prozessschritte die Kosten ansteigen lassen.

Unabhängig von der fortlaufenden Pastenentwicklung der Hersteller ist die Optimierung des Single Print hauptsächlich auf die Reduzierung der Fingerbreite ausgelegt. Die mögliche Verringerung der Fingerbreite ist dabei insbesondere abhängig vom Drahtdurchmesser d_d des Maschengewebes, wie im vorigen Abschnitt beschrieben. Das theoretische Minimum der Öffnungsbreite im Sieb wird von *Falcon* [62] mit dem 2,5-fachen des Drahtdurchmessers d_d angegeben. Wie am Beispiel in Abbildung 3.4 mit 14 μm Drahtdurchmesser und 25 μm Fingeröffnung gezeigt, kann es ansonsten Stellen in der Fingeröffnung geben, die vollständig vom Maschendrahtgewebe verdeckt sind und somit schlimmsten-

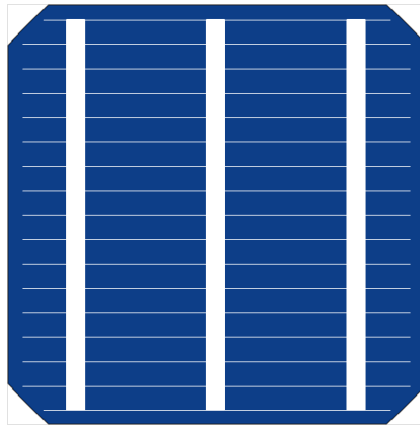


Abb. 3.3: Schemazeichnung des Single Print Sieblayouts. Die gesamten Vorderseitenkontakte aus Fingern und Busbars werden in einem Prozess mit einem Sieb gedruckt.

falls der Kontaktfinger unterbrochen wird.

Durch das vorhandene Maschendrahtgewebe in den Fingeröffnungen sind die Möglichkeiten zur Reduzierung der Fingerbreite und Vergrößerung der Fingerhöhe beim Single Print eingeschränkt. Da die Leitfähigkeit der Kontaktfinger durch die vorhandenen Einschnürungen entlang des Fingers negativ beeinflusst wird, führt eine Reduzierung der Fingerbreite fast immer zu einem erhöhten Linienwiderstand. Des Weiteren steigt die Gefahr von Fingerunterbrechungen bei schmalen Sieböffnungen durch das Maschendrahtgewebe. Bis zum Jahr 2009 wurden mit Single Print in der Forschung Fingeröffnungen von $90\ \mu\text{m}$ bis $100\ \mu\text{m}$ untersucht [82–86], die in finalen Fingerbreiten um $120\ \mu\text{m}$ resultierten, wie beispielhaft in der Rasterelektronenmikroskop (REM) Aufnahme in Abbildung 3.5 dargestellt. Vereinzelt wurden schon Öffnungsbreiten bis zu $50\ \mu\text{m}$ getestet, die zu Fin-

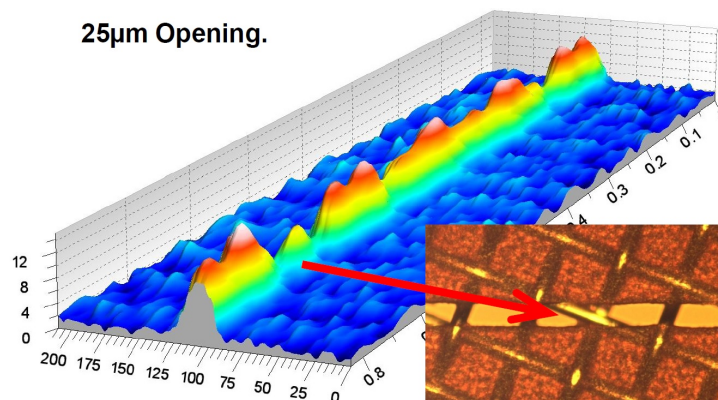


Abb. 3.4: Fingerprofil des Single Print mit $25\ \mu\text{m}$ Sieböffnung. Die markierte Stelle mit unterbrochenem Kontaktfinger ist auf das Verdecken der Fingeröffnung im Sieb durch das Maschendrahtgewebe bei schmalen Öffnungen mit zu dicken Drähten des Siebgewebes zurückzuführen. Abbildung aus [62]

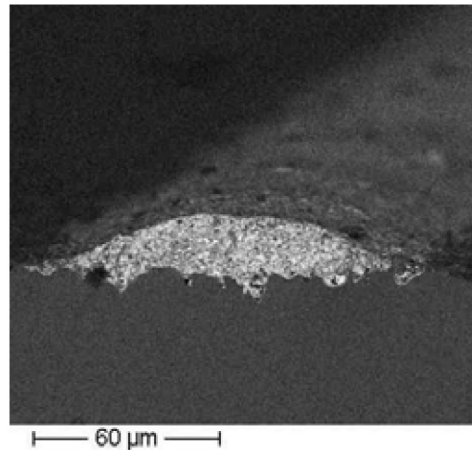


Abb. 3.5: REM Aufnahme eines Silberkontaktfingers gedruckt mittels Single Print mit 100 μm Öffnungsbreite im Sieb. Die Dimensionen betragen 120 μm Breite und 15 μm Höhe. Abbildung aus [82].

gerbreiten über 70 μm mit kleinen Fingerhöhen von 10 μm in getrocknetem Zustand [61] oder maximal 9 μm nach dem Hochtemperaturprozess [87] führten. Im Jahr 2010 wurden wiederholt Fingerhöhen über 25 μm mit Öffnungsbreiten von 75 μm bis 80 μm bzw. Fingerbreiten von 82 μm bis 109 μm erzielt [63, 88–90], was den Trend zur Reduzierung der Fingerbreite und Verbesserung des Aspektverhältnisses zeigt.

Zu Beginn dieser Arbeit im Jahr 2011 waren in der Industrie noch Fingerbreiten von 90 μm üblich [91], während in der Forschung Solarzellen mit Öffnungsbreiten von 50 μm und Fingerbreiten um 70 μm ohne Fingerunterbrechungen hergestellt wurden [92]. Neben dem auf 174 mg reduzierten Silberpastenverbrauch wurde auch ein Wirkungsgradgewinn von 0,2%_{abs} gegenüber einer Fingeröffnungsbreite von 70 μm berichtet [93].

Von *Falcon* [62] wurden Ergebnisse veröffentlicht, in denen eine Fingeröffnungsbreite von 30 μm verwendet wurde. Die berichteten 45 μm Fingerbreite und 11 μm durchschnittliche Fingerhöhe in getrocknetem Zustand wurden auf Testwafern erzielt. Zudem wurde kein komplettes Fingergrid gedruckt, sondern ein Sieb mit Teststrukturen verwendet, bei denen die Kontaktfinger nur auf 20 mm Länge gedruckt wurden. Eine Verifizierung dieser Ergebnisse mit 30 μm Fingeröffnungsbreite auf Solarzellen ist somit nicht möglich.

3.3 Print-on-Print

Eine Technik des Siebdrucks zur Reduzierung der Fingerbreite bei gleichzeitig großem Aspektverhältnis ist der sogenannte Doppeldruck (*engl.* Print-on-Print) [63, 82, 86]. Der Print-on-Print (PoP) Prozess besteht aus zwei aufeinanderfolgenden Druckschritten für die Metallisierung auf der Zellvorderseite. Im ersten Schritt (siehe Abbildung 3.6) werden nur die Kontaktfinger gedruckt. Abbildung 3.7 zeigt das Sieblayout des zweiten Druckschritts, in dem das Fingergrid zusammen mit den Busbars exakt ausgerichtet auf die vorhandenen Kontaktfinger gedruckt wird. Nach jedem Druck erfolgt eine Trocknung der



Abb. 3.6: Schemazeichnung des Sieblayouts des ersten Druckes beim Print-on-Print. Es werden nur die Kontaktfinger auf die Zellvorderseite gedruckt. Es können schmale Sieböffnungen verwendet werden, da mögliche Fingerunterbrechungen im zweiten Druckschritt mit großer Wahrscheinlichkeit eliminiert werden.

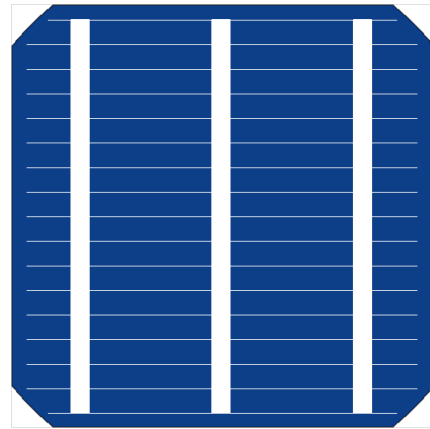


Abb. 3.7: Schemazeichnung des Sieblayouts des zweiten Druckes beim Print-on-Print. Die Kontaktfinger werden nochmals gedruckt und dabei exakt auf den ersten Druck ausgerichtet. Zusätzlich werden die Busbars aufgebracht. Zudem kann eine andere Silberpaste verwendet werden, die eine höhere Leitfähigkeit besitzt.

Silberpaste, d.h. insgesamt werden zwei zusätzliche Prozessschritte benötigt.

Ein Vorteil dieser Technik ist das verringerte Risiko von Fingerunterbrechungen durch den zweimaligen Druck der Kontaktfinger, wodurch schmalere Fingeröffnungen im Sieb verwendet werden können. Nur wenn in beiden Druckschritten an der gleichen Stelle keine Paste auf den Wafer gebracht wird, würde eine Fingerunterbrechung auftreten. Das zweimalige Drucken erzeugt sehr hohe Finger, die wiederum den Linienwiderstand verringern. Zudem besteht die Möglichkeit, im zweiten Druckschritt eine andere Silberpaste zu verwenden, die z.B. auf Leitfähigkeit und nicht auf Kontakteigenschaften optimiert ist.

Um eine Verbreiterung der Kontaktfinger durch Fehljustierung möglichst zu vermeiden, sind die Anforderungen an die Genauigkeit der Ausrichtung im Siebdrucker und das Layout in den Sieben sehr hoch [63, 94]. Die Ausrichtung im Siebdrucker beim zweiten Druck erfolgt über Marken, die zum einen auf dem Sieb positioniert sind und zum anderen im ersten Druckschritt in zwei gegenüberliegenden Ecken auf den Wafer mitgedruckt werden.

Für eine der ersten Ergebnisse zum Doppeldruck mit Print-on-Print wurden im Jahr 2009 von *Galiazzo et al.* [86] Siebe mit $90\ \mu\text{m}$ für den ersten und $80\ \mu\text{m}$ für den zweiten Druck verwendet. Die entsprechende REM Aufnahme eines Silberfingers ist in Abbildung 3.8 dargestellt. Die durchschnittliche Fingerbreite beträgt $93\ \mu\text{m}$ bei einer durchschnittlichen Höhe von $38\ \mu\text{m}$. Ein Nachteil zeigt sich aber in der großen Differenz von $25\ \mu\text{m}$ zwischen der maximalen ($52\ \mu\text{m}$) und minimalen ($27\ \mu\text{m}$) Höhe entlang des Fingers. Durch diese starke Rauigkeit liegt keine optimale Verteilung der verbrauchten Silberpaste für den Linienwiderstand vor. Durch Verwendung von schmaleren Fingeröffnungen im Sieb

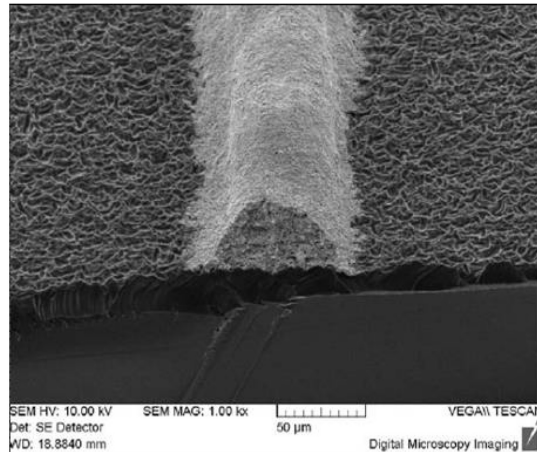


Abb. 3.8: REM Aufnahme eines Silberkontaktfingers gedruckt mittels Print-on-Print mit $90\ \mu\text{m}$ Öffnungsbreite im Sieb für den ersten und $80\ \mu\text{m}$ für den zweiten Druck. Die Dimensionen betragen $93\ \mu\text{m}$ Breite und $38\ \mu\text{m}$ Höhe. Die Höhe entlang des Finger variiert stark mit einer Differenz von $25\ \mu\text{m}$ zwischen der maximalen ($52\ \mu\text{m}$) und minimalen ($27\ \mu\text{m}$) Fingerhöhe. Abbildung aus [86].

konnte 2010 ein Wirkungsgradgewinn von $0,2\%_{\text{abs}}$ [63, 90] gegenüber einem Single Print Prozess gezeigt werden. Während der Single Print mit $80\ \mu\text{m}$ Fingeröffnung gedruckt wurde, kamen für den PoP Siebe mit $60\ \mu\text{m}$ für den ersten und $50\ \mu\text{m}$ für den zweiten Druck zum Einsatz [90].

Ergebnisse von Solarzellen mit Fingeröffnungen unter $50\ \mu\text{m}$ für die Siebe beim Print-on-Print wurden bis zu Beginn dieser Arbeit im Jahr 2011 nicht veröffentlicht. *Falcon* [62] zeigte Fingerbreiten von $50\ \mu\text{m}$ mit einer durchschnittlichen Fingerhöhe von $26,9\ \mu\text{m}$ mit dem Print-on-Print Prozess. Abbildung 3.9 zeigt das entsprechende Fingerprofil. Diese Fingergeometrien wurden auf Testwafern in getrocknetem Zustand gemessen. Da kein

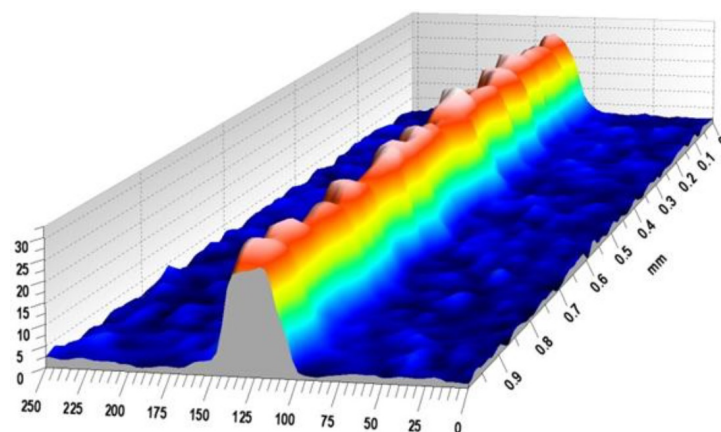


Abb. 3.9: Fingerprofil des Print-on-Print mit einer Fingerbreite von $50\ \mu\text{m}$ nach Trocknung. Das Profil zeigt eine Differenz zwischen minimaler und maximaler Fingerhöhe von $8,7\ \mu\text{m}$ bei durchschnittlich $26,9\ \mu\text{m}$. Abbildung aus [62].

komplettes Fingergrid gedruckt, sondern ein Sieb mit 20 mm langen Kontaktfingern als Teststrukturen verwendet wurde, ist dieses Ergebnis nicht mit Veröffentlichungen auf Solarzellenbasis vergleichbar.

3.4 Dual Print

Eine weitere Technik zur Verbesserung der Vorderseitenmetallisierung ist der sogenannte Zweifach-Druck (*engl.* Dual Print) [85, 95], der in der Forschung in den letzten Jahren viel Interesse hervorgerufen hat. Der Dual Print (DP) verwendet ebenso wie der Print-on-Print zwei Druckschritte, mit dem Unterschied, dass im Fall vom DP die Busbars und Finger jeweils nur einmal gedruckt werden. Abbildung 3.10 zeigt schematisch das Sieblayout des ersten Druckschritts beim Dual Print. Dabei werden zuerst nur die Busbars mit einem Sieb gedruckt [96]. Im zweiten Schritt beim Dual Print werden nur die Finger gedruckt (siehe Abbildung 3.11), wahlweise mit einer Metallschablone [95, 97, 98] oder einem Sieb. Bei umgedrehter Druckreihenfolge besteht die Gefahr der Beschädigung der zuerst gedruckten Kontaktfinger sowie einem Verschmieren der Busbars, da das Sieb durch die dazwischenliegenden Finger keinen direkten Kontakt mehr zum Wafer hat [99]. Nach jedem Druckschritt ist eine Trocknung der Silberpaste nötig, wodurch insgesamt zwei zusätzliche Prozessschritte im Vergleich zum Single Print benötigt werden.

Diese Arbeit beschäftigt sich für die Kontaktfinger nur mit dem Schablonendruck. Eine Schablone zeichnet sich durch eine hundertprozentig offene Fläche für die Kontaktfinger aus, was im Vergleich zu einem Sieb mit einer typischen offenen Siebfläche von 60% [96]



Abb. 3.10: Schemazeichnung des Sieblayouts des ersten Druckes beim Dual Print. Es werden nur die Busbars mit einem Sieb gedruckt. Da die Busbars keinen Kontakt zum Emitter benötigen, können spezielle Silberpasten verwendet werden, die die Rekombination unter dem Metallkontakt reduzieren.

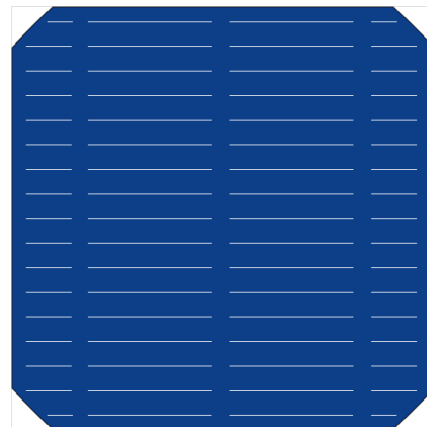


Abb. 3.11: Schemazeichnung des Layouts des zweiten Druckes beim Dual Print. Es werden nur die Finger mit einer Metallschablone oder einem Sieb gedruckt. Die Schablone hat den Vorteil, dass kein Maschendrahtgewebe in der Fingeröffnung vorliegt und dadurch ein besserer Pastentransfer ermöglicht wird.

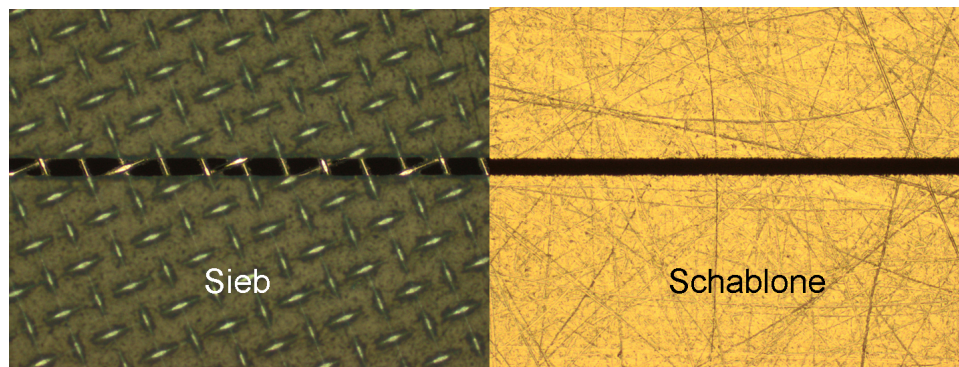


Abb. 3.12: Vergleich der 30 µm Fingeröffnung eines Siebes mit Maschendrahtgewebe und einer Metallschablone, aufgenommen mit einem Lichtmikroskop. Beim Sieb wird die Fingeröffnung teilweise durch das Maschendrahtgewebe verdeckt, was zu einem Wert von ungefähr 60% für die offene Fläche eines typischen Siebes führt. Die Schablone besitzt eine hundertprozentig offene Fläche für die Kontaktfinger, was im Vergleich zum klassischen Sieb zu einem hervorragendem Pastentransfer und einer gleichmäßigeren Fingerhöhe führt.

zu einem hervorragendem Pastentransfer und einer gleichmäßigeren Fingerhöhe führt. Abbildung 3.12 zeigt den Vergleich zwischen einem Sieb auf der linken Seite und einer Schablone auf der rechten Seite für eine Fingeröffnung von 30 µm, aufgenommen mit einem Lichtmikroskop. Beim Sieb wird die Fingeröffnung teilweise durch das Maschendrahtgewebe verdeckt, wodurch sich die offene Siebfläche verringert. Die Schablone besteht aus einer dünnen Metallfolie, z.B. aus Nickel, in der komplett geöffnete Aussparungen die Fingeröffnungen darstellen.

Zusätzlich zur Verbesserung des Pastentransfers für die Kontaktfinger durch die Schablone ermöglicht der Dual Print auch den Einsatz spezieller Silberpasten. Für den Druck der Kontaktfinger lassen sich neben den für den Siebdruck konzipierten Silberpasten auch Pasten mit einer erhöhten Viskosität benutzen, die in einem klassischen Sieb keinen ausreichenden Pastenübertrag auf den Wafer erzielen würden. Die erhöhte Viskosität sorgt dafür, dass die gedruckten Silberfinger weniger stark zerfließen und somit ein besseres Aspektverhältnis bei schmalen Kontaktfingern möglich ist [98].

Da die Busbars als Stromsammler der Finger nicht über einen Kontakt zum Emitter verfügen müssen, kann die Silberpaste für den Busbardruck einen verringerten Anteil Glasfritte enthalten, so dass die Haftung der Busbars auf der Zelle noch ausreichend gegeben ist, aber das auf dem Emitter vorhandene Siliziumnitrid nicht oder kaum weggeätzt wird und somit kein elektrischer Kontakt zustande kommt. In diesem Zustand verringert sich die Emitterrekombination unter den Busbars und sorgt für ein Ansteigen der V_{oc} [100]. Ebenso kann die Busbarpaste über einen reduzierten Silberanteil und damit geringere Leitfähigkeit verfügen, da die später aufgelöteten Verbinderbändchen im Modul hauptsächlich für den Stromtransport verantwortlich sind. Somit wird der Verbrauch des reinen Silbers reduziert und damit Kosten eingespart. Die in dieser Arbeit typischerweise verwendeten Busbarpasten für den Dual Print haben beide erwähnten Eigenschaften der verringerten Glasfritte und reduziertem Silberanteil. Diese Art der Paste wird im Folgen-

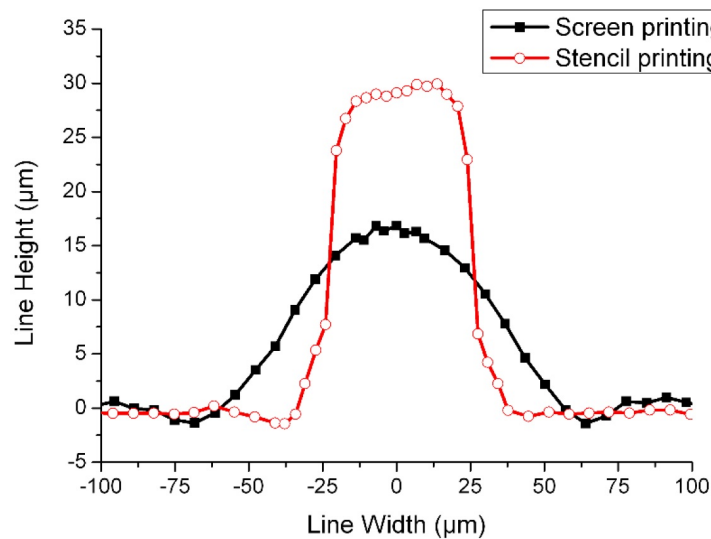


Abb. 3.13: Vergleich der Fingerprofile von einem Sieb (Screen printing) und einer Schablone (Stencil printing). Die Fingeröffnung von $105\ \mu\text{m}$ beim Single Print mit Sieb führt zu einer finalen Fingerbreite von $134\ \mu\text{m}$ bei einer Höhe von $17\ \mu\text{m}$. Durch die schmalere Fingeröffnung von $60\ \mu\text{m}$, die mit einer Schablone verwendbar ist, sowie die Nutzung einer speziellen Silberpaste kann die Fingerbreite auf $75\ \mu\text{m}$ reduziert werden, bei gleichzeitiger Vergrößerung der Fingerhöhe auf $28\ \mu\text{m}$. Abbildung aus [85].

den nicht-durchfeuernde Paste genannt. In Kapitel 6.1 werden diese Eigenschaften der Busbarpaste untersucht.

Auf der anderen Seite verursachen - wie beim Print-on-Print auch - beim Dual Print die zwei zusätzlichen Prozessschritte sowie die Anschaffung der dazu benötigten Maschinen neue Kosten im Vergleich zum Single Print, welche sich durch die Einsparung des Silberpastenverbrauchs und Erhöhung des Wirkungsgrades rentieren müssen. Weitere Schwierigkeiten im Hinblick auf eine industrielle Umsetzung werden im Verlauf dieser Arbeit in eigenen Experimenten gezeigt und Lösungsansätze gesucht.

Im Jahr 2009 wurde von *Hoornstra* und *Heurtault* [85] der Vorteil des Dual Print gegenüber dem Single Print mit einem Wirkungsgradgewinn von $0,4\%_{\text{abs}}$ gezeigt. Verglichen wurde eine Fingeröffnung von $105\ \mu\text{m}$ für Single Print zu $60\ \mu\text{m}$ mit Schablone beim Dual Print. Ein beispielhafter Querschnitt durch die zugehörigen Fingerprofile ist in Abbildung 3.13 dargestellt. Neben der kleineren Fingerbreite erzielt der Dual Print auch die höheren Kontaktfinger mit bis zu $28\ \mu\text{m}$ bei Verwendung einer speziellen Silberpaste. Zudem deuten die Ergebnisse an, dass das kastenförmige Fingerprofil des DP die effektive Abschattung durch Mehrfachreflexion am Finger stärker verringert als das des Single Print [85].

Bis ins Jahr 2011 wurden in der Literatur Ergebnisse mit schmalere Fingeröffnungen in der Schablone unter $60\ \mu\text{m}$ nur auf Testwafern gezeigt. Im Jahr 2010 wurde von *Heurtault* und *Hoornstra* [99] auf Testwafern mit einer $30\ \mu\text{m}$ Fingeröffnung eine Fingergeometrie von $42\ \mu\text{m}$ Breite und $15\ \mu\text{m}$ Höhe erreicht. Zudem wurde mit dem Dual Print Prozess der Druck von 2000 Solarzellen in einer Produktionsumgebung erfolgreich getestet [99]. Von

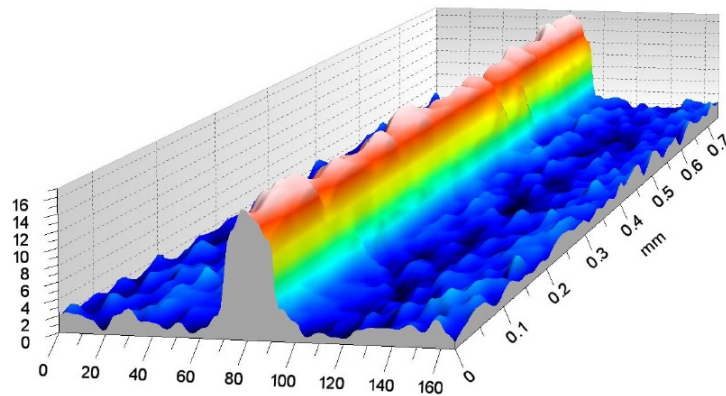


Abb. 3.14: Profil eines gedruckten Silberfingers mit einer Metallschablone. Die Fingeröffnung in der Schablone beträgt $25\ \mu\text{m}$. Die Fingerbreite nach Trocknung der Silberpaste ist $35\ \mu\text{m}$ bei einer durchschnittlichen Höhe von $14\ \mu\text{m}$. Abbildung aus [96].

Falcon [96] wurde 2011 ein Fingerprofil gezeigt, dass mit einer Fingeröffnung von $25\ \mu\text{m}$ in einer Schablone gedruckt wurde. Abbildung 3.14 zeigt das entsprechende Fingerprofil von einem Testwafer. In getrocknetem Zustand konnte eine Fingerbreite von $35\ \mu\text{m}$ und eine durchschnittliche Fingerhöhe von $14\ \mu\text{m}$ erzielt werden. Diese Ergebnisse auf Testwafern wurden nicht anhand elektrischer Parameter charakterisiert, wodurch eine Umsetzbarkeit für Solarzellen mit Fingeröffnungen unter $60\ \mu\text{m}$ in der Schablone beim Dual Print bis zu Beginn dieser Arbeit nicht verifiziert wurde.

4 Serienwiderstand der Solarzelle

Im weiteren Verlauf der Arbeit werden die unterschiedlichen Drucktechniken zur Metallisierung der Vorderseitenkontakte auf Solarzellen angewendet. Die resultierenden Fingergeometrien haben dabei z.B. einen Einfluss auf den Linienwiderstand der Kontaktfinger und dadurch auf den gesamten Serienwiderstand der Solarzelle. Um diese Widerstände und ihre Verluste anhand der hergestellten Solarzellen zu analysieren, werden im Folgenden die Anteile zum Serienwiderstand beschrieben, die in Verbindung mit dem Fingergrid auf der Vorderseite stehen. Die Herleitungen basieren auf den Arbeiten von *Green* [38], *Goetzberger et al.* [47] und *Mette* [2].

4.1 Emitterwiderstand

Um den Widerstand im Emitter zu beschreiben, wird die Annahme gemacht, dass der Strom senkrecht und homogen aus der Basis in den Emitter verläuft und dort gleichmäßig zu den Kontaktfingern geführt wird, wie in Abbildung 4.1 dargestellt. Daraus ergibt sich, dass der Widerstand im Emitter hauptsächlich durch den Emitterschichtwiderstand R_{sheet} und den Fingerabstand s bestimmt wird. Durch die Annahme der Homogenität des Stromverlaufs fließt in der Mitte zwischen zwei Fingern kein Strom, d.h. $I(x = 0) = 0$. Der Strom steigt in x-Richtung linear zu den Fingern an. Daher genügt es, die Berechnung auf der Hälfte des Zwischenfingerbereiches durchzuführen. Diese Fläche wird definiert als

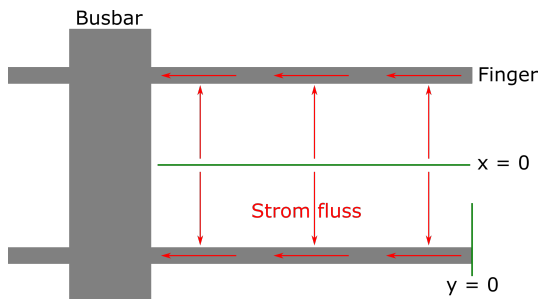


Abb. 4.1: Schematische Zeichnung des Stromflusses im Emitter und Kontaktfinger. Der Strom verläuft senkrecht aus der Basis in den Emitter und von dort gleichmäßig zu den Kontaktfingern. In der Mitte zwischen zwei Fingern am Punkt $x = 0$ fließt kein Strom, er steigt linear zu den Fingern an.

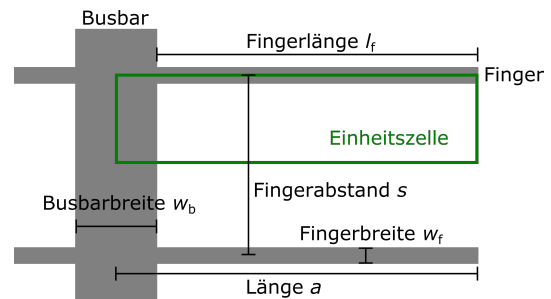


Abb. 4.2: Schematische Zeichnung eines Ausschnitts der Vorderseitenkontakte. Durch die Symmetrie der Solarzelle genügt die Betrachtung einer Einheitszelle, die definiert ist durch die Hälfte des Fingerabstands s multipliziert mit der Länge a . Die Länge a entspricht der Summe von Fingerlänge l_f und halber Busbarbreite w_b .

Einheitszelle (EZ).
Über die Beziehung

$$P = V \cdot I \quad \text{mit} \quad V = R_{\text{eff}} \cdot I \quad (4.1)$$

erhält man den effektiven Widerstand im Emitter, in dem die Verlustleistung im Emitter durch das Quadrat des generierten Stroms in der Einheitszelle geteilt wird:

$$R_{\text{eff,emitter}} = \frac{P_{\text{emitter}}}{I_{\text{EZ}}^2}. \quad (4.2)$$

Der Strom, der seitlich die Kontaktfinger erreicht, berechnet sich aus der Stromdichte J multipliziert mit der Fläche, aus der der Strom eingesammelt wird

$$I_{\text{EZ}} = J \cdot l_f \frac{s - w_f}{2}. \quad (4.3)$$

Die Fläche wird nach Abbildung 4.2 beschrieben durch den Fingerabstand s , die Fingerbreite w_f und die Fingerlänge l_f der Einheitszelle. Wegen der Homogenität gilt für den Strom nach einer Strecke x :

$$I(x) = J l_f x. \quad (4.4)$$

Mit dem Widerstand R_{sheet} im Emitter in der infinitesimal dünnen Schicht dx

$$dR = \frac{R_{\text{sheet}}}{l_f} dx \quad (4.5)$$

lässt sich die Verlustleistung berechnen:

$$dP_{\text{emitter}} = I^2(x) dR = (J l_f x)^2 \frac{R_{\text{sheet}}}{l_f} dx \quad (4.6)$$

$$\Rightarrow P_{\text{emitter}} = J^2 l_f R_{\text{sheet}} \int_0^{\frac{s-w_f}{2}} x^2 dx = \frac{J^2 l_f R_{\text{sheet}}}{3} \left(\frac{s - w_f}{2} \right)^3. \quad (4.7)$$

Aus den Gleichungen 4.2 und 4.7 erhält man den effektiven Widerstand des Emitters

$$R_{\text{eff,emitter}} = \frac{P_{\text{emitter}}}{I_{\text{EZ}}^2} = \frac{R_{\text{sheet}}}{6 l_f} (s - w_f). \quad (4.8)$$

4.2 Kontaktwiderstand

Für die Berechnung des Kontaktwiderstandes der Vorderseite wird die Annahme des vorigen Abschnitts zum Emitterwiderstand verwendet, dass der Strom im Emitter homogen verteilt senkrecht zum Finger fließt und damit überall die gleiche Stromdichte vorliegt.

Dagegen ist die Stromdichte unter dem Kontakt nicht gleichmäßig verteilt. Sie ist maximal an den Kanten der Kontaktfinger und nimmt in Richtung Fingermitte ab. Die Strecke, nach der die Stromdichte unterhalb des Kontaktfingers auf $1/e$ ihres Anfangswertes abgefallen ist, wird als Transferlänge L_T bezeichnet.

Der Kontaktfinger kann als Widerstandsnetzwerk mit den folgenden Differentialgleichungen [2] an der Position w der Kontaktbreite w_f beschrieben werden:

$$-\frac{dI(w)}{dw} = V(w) \frac{l_f}{\rho_c} \quad \text{und} \quad -\frac{dV(w)}{dw} = I(w) \frac{R_{\text{sheet}}}{l_f}. \quad (4.9)$$

ρ_c ist der spezifische Kontaktwiderstand. Durch Kombination der beiden Gleichungen erhält man eine Differentialgleichung 2. Ordnung mit

$$\frac{d^2V(w)}{d^2w} - \frac{R_{\text{sheet}}}{\rho_c} V(w) = 0, \quad (4.10)$$

deren allgemeine Lösungen

$$V(w) = A \exp\left(\frac{1}{L_T} w\right) + B \exp\left(-\frac{1}{L_T} w\right) \quad (4.11)$$

$$I(w) = -\frac{l_f}{L_T R_{\text{sheet}}} \left[A \exp\left(\frac{1}{L_T} w\right) - B \exp\left(-\frac{1}{L_T} w\right) \right] \quad (4.12)$$

sind. L_T ist dabei die erwähnte Transferlänge mit

$$L_T = \sqrt{\frac{\rho_c}{R_{\text{sheet}}}}. \quad (4.13)$$

Da aufgrund der Annahme der Homogenität an beiden Seiten des Kontaktfingers ein konstanter Strom I_0 vorliegt, gelten die folgenden Randbedingungen:

$$I(w=0) = -I(w=w_f) = I_0 \quad \text{und} \quad V(w=0) = V_0 \quad (4.14)$$

Durch Einsetzen in Gleichung 4.12 erhält man

$$B = A \exp\left(\frac{w_f}{L_T}\right). \quad (4.15)$$

Für Spannung und Strom gelten dann folgende Formeln:

$$V(w) = 2A \exp\left(\frac{w_f}{2L_T}\right) \cosh\left[\frac{1}{L_T} \left(\frac{w_f}{2} - w\right)\right] \quad (4.16)$$

$$I(w) = \frac{2A l_f}{L_T R_{\text{sheet}}} \exp\left(\frac{w_f}{2L_T}\right) \sinh\left[\frac{1}{L_T} \left(\frac{w_f}{2} - w\right)\right]. \quad (4.17)$$

Der effektive Kontaktwiderstand einer Solarzelle berechnet sich damit zu

$$R_{\text{eff,contact}} = \frac{V(0)}{I(0)} = \frac{L_T R_{\text{sheet}}}{l_f} \coth\left(\frac{w_f}{2L_T}\right). \quad (4.18)$$

4.3 Fingerwiderstand

Vom Kontakt wird der Strom in der Solarzelle durch die Finger zu den Busbars geführt, wie in Abbildung 4.1 gezeigt. Der Widerstand hängt von der Fingerlänge l_f und dem Linienwiderstand des Fingers ab. Der Strom ist in der Mitte zwischen zwei Busbars bzw. am Ende des Fingers am Rand der Zelle Null, steigt linear mit der Länge an und erreicht seinen Maximalwert am Busbar. Die Berechnung ist analog zu der des Emitterwiderstandes.

Der Strom, der den Busbar erreicht, ist gleich der Stromdichte multipliziert mit der Fläche, durch die der Strom in der Einheitszelle fließt:

$$I_{\text{EZ}} = \frac{J w_f l_f}{2}. \quad (4.19)$$

Aufgrund der Homogenität gilt für den Strom nach einer Strecke y :

$$I(y) = \frac{J \cdot w_f}{2} y. \quad (4.20)$$

Für den Widerstand im Finger in der Schicht dy gilt

$$dR = \frac{2 \rho_f}{A_f} dy, \quad (4.21)$$

wobei ρ_f den spezifischen Widerstand des Fingers und A_f dessen Querschnittsfläche beschreibt. Daraus lässt sich die Verlustleistung berechnen:

$$dP_{\text{finger}} = I^2(y) dR = \left(\frac{J \cdot w_f}{2} y \right)^2 \cdot \frac{2 \rho_f}{A_f} dy \quad (4.22)$$

$$\Rightarrow P_{\text{finger}} = \frac{J^2 w_f^2 \rho_f}{2 A_f} \int_0^{l_f} y^2 dy = \frac{J^2 w_f^2 \rho_f l_f^3}{6 A_f}. \quad (4.23)$$

In Verbindung mit Gleichung 4.2 erhält man den effektiven Widerstand des Fingers:

$$R_{\text{eff,finger}} = \frac{P_{\text{finger}}}{I_{\text{EZ}}^2} = \frac{2 \rho_f l_f}{3 A_f}. \quad (4.24)$$

4.4 Serienwiderstandsanteile

Für die Serienwiderstandsanteile des Fingergrids der gesamten Solarzelle müssen die hergeleiteten effektiven Widerstände noch mit der Fläche multipliziert werden, auf der sie berechnet wurden. Die Fläche der zu Grunde gelegten Einheitszelle aus Abbildung 4.2 beträgt

$$A_{\text{EZ}} = a \cdot \frac{s}{2}. \quad (4.25)$$

Die Länge a beschreibt die Summe aus der Fingerlänge l_f und der halben Busbarbreite w_b . Die Fingerlänge l_f entspricht dem halben Abstand zwischen zwei Busbars. Damit gelten die folgenden Gleichungen für die theoretische Berechnung der Serienwiderstandsanteile des Fingergrids:

- Emitterwiderstand

$$R_{\text{emitter}} = R_{\text{eff,emitter}} \cdot A_{\text{EZ}} = \frac{R_{\text{sheet}} a \cdot (s - w_f) \cdot s}{12 \cdot l_f} \quad (4.26)$$

- Kontaktwiderstand

$$R_{\text{contact}} = R_{\text{eff,contact}} \cdot A_{\text{EZ}} = \frac{\sqrt{R_{\text{sheet}} \rho_c}}{l_f} \coth \left(\frac{w_f}{2} \sqrt{\frac{R_{\text{sheet}}}{\rho_c}} \right) \frac{a \cdot s}{2} \quad (4.27)$$

- Fingerwiderstand

$$R_{\text{finger}} = R_{\text{eff,finger}} \cdot A_{\text{EZ}} = \frac{\rho_f l_f a \cdot s}{3 A_f}. \quad (4.28)$$

4.5 Serienwiderstandsmessung und Auswirkung auf den Füllfaktor einer Solarzelle

Für die Bestimmung des Serienwiderstandes R_s an einer Solarzelle gibt es verschiedene Berechnungsmethoden. Eine Übersicht über die gängigsten Methoden wurde von *Pysch et al.* [101] veröffentlicht.

In dieser Arbeit wird zur Berechnung des R_s an den gemessenen Solarzellen die $J_{\text{sc}}-V_{\text{oc}}$ -Kennlinie mit der IV-Kennlinie unter einer Sonne verglichen. Für die $J_{\text{sc}}-V_{\text{oc}}$ -Kennlinie wird jeweils J_{sc} und V_{oc} in Abhängigkeit der Lichtintensität gemessen, wodurch eine IV-Kennlinie erzeugt wird, die nicht vom Serienwiderstand beeinflusst wird.

Über die Formel

$$R_s = \frac{\Delta V}{J_{\text{mpp}}} = \frac{V_{J_{\text{sc}}V_{\text{oc,mpp}}} - V_{\text{mpp}}}{J_{\text{mpp}}} \quad (4.29)$$

kann der Serienwiderstand R_s berechnet werden. ΔV ist die Spannungsdifferenz der serienwiderstandsfreien $J_{\text{sc}}-V_{\text{oc}}$ -Kennlinie und der vom Serienwiderstand beeinflussten IV-Kennlinie am MPP (*engl.* Maximum Power Point) unter einer Sonne. J_{mpp} ist die Stromdichte, V_{mpp} die Spannung am Punkt der maximalen Leistung.

Für die Berechnung des Wirkungsgrades η einer Solarzelle wird neben der Kurzschlussstromdichte J_{sc} und der Leerlaufspannung V_{oc} auch der Füllfaktor FF benötigt. Der Füllfaktor ist definiert als der Quotient aus dem Produkt $J_{\text{mpp}} \cdot V_{\text{mpp}}$ und dem Produkt $J_{\text{sc}} \cdot V_{\text{oc}}$. Der Füllfaktor ist der Parameter der Solarzelle, der durch den Serienwiderstand beeinflusst wird über die Änderung von J_{mpp} und V_{mpp} . Ein weiterer Faktor ist

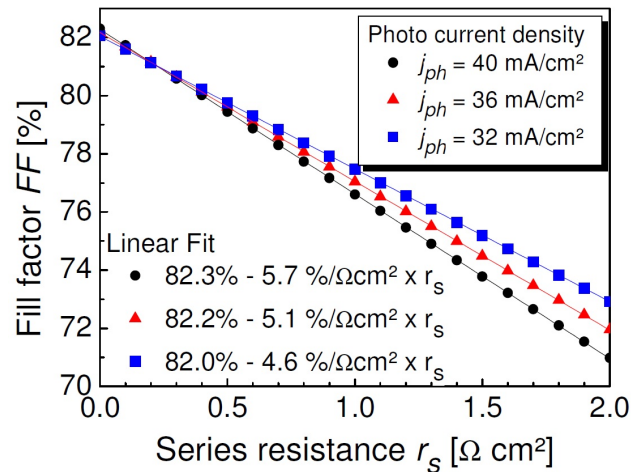


Abb. 4.3: Mit dem 2-Dioden-Modell berechnete Abhängigkeit des Füllfaktors vom Serienwiderstand für verschiedene Photoströmdichten. Je größer die Photoströmdichte, desto stärker ist die lineare Abnahme des Füllfaktors mit steigendem Serienwiderstand. Abbildung aus [2].

der Shunt- oder Parallelwiderstand R_p , der für alle hergestellten Solarzellen in dieser Arbeit Werte über $10000 \Omega \text{ cm}^2$ annimmt und damit vernachlässigbar bei dieser Betrachtung ist.

Über die Gleichung 2.1 des 2-Dioden-Modells kann für verschiedene R_s die IV-Kurve berechnet und daraus der FF extrahiert werden, um die Auswirkung des Serienwiderstandes auf den Füllfaktor zu untersuchen. Abbildung 4.3 [2] zeigt den Einfluss des Serienwiderstands auf den Füllfaktor für verschiedene Photoströmdichten J_{ph} . Für die weiteren Parameter wurden folgende Werte angenommen [2]: $J_{01} = 1,3 \times 10^{-12} \text{ A/cm}^2$, $J_{02} = 1,1 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$, $n_1 = 1$, $n_2 = 2$ und $R_p = 5000 \Omega \text{ cm}^2$. In dem für R_s berechneten Bereich von $0 \Omega \text{ cm}^2$ bis $2 \Omega \text{ cm}^2$ nimmt der FF mit steigendem Serienwiderstand linear ab. Je größer J_{ph} der Solarzelle, desto stärker ist diese Abnahme des Füllfaktors.

5 Verbesserte Feinlinienmetallisierung

In diesem Kapitel werden die in dieser Arbeit erzielten Weiterentwicklungen der drei Druckprozesse Single Print, Print-on-Print und Dual Print gezeigt und erläutert. Besonderes Augenmerk wird auf die Verringerung der Fingerbreite, Reduzierung des Silberpastenverbrauchs und Optimierung der Fingerhöhe und deren Auswirkung auf den Serienwiderstand bzw. Füllfaktor und damit den Wirkungsgrad gelegt. Für eine abschließende Beurteilung der drei Drucktechniken werden diese in experimentellen Untersuchungen direkt miteinander verglichen. Numerische Simulationen verdeutlichen zudem den Einfluss der Rauigkeit der Fingerhöhe auf den Wirkungsgrad unter Einbindung von Fingerprofilen der drei Drucktechniken.

5.1 Single Print

Anhand des beschriebenen Stands der Forschung für Single Print mit minimal 50 μm Öffnungsbreite im Sieb (siehe Kapitel 3.2) steht für die Weiterentwicklung des Single Print die Evaluierung von Fingeröffnungsbreiten kleiner 50 μm auf Solarzellen im Vordergrund. Damit soll entweder der Wirkungsgrad gegenüber Sieben mit breiteren Fingeröffnungen erhöht oder bei näherungsweise gleichem Wirkungsgrad der Silberpastenverbrauch gesenkt werden.

Für die folgenden Versuche werden Al-BSF Solarzellen mit dem in Kapitel 3.2 beschriebenen Prozess verwendet. Variiert werden lediglich die Siebe für den Vorderseitensiebdruck. Der Drahtdurchmesser d_d beträgt jeweils 14 μm , die Maschenanzahl 380. Für die Optimierung des Druckprozesses werden unterschiedliche Dicken der EOM d_{eom} verwendet. Für eine Fingeröffnungsbreite von 30 μm beträgt die d_{eom} 4 bis 15 μm . Für eine 40 μm Fingeröffnung werden EOM Dicken zwischen 6 und 17 μm untersucht. Die Anzahl der Finger beträgt 118 bei 30 μm Fingeröffnung und 94 Finger bei 40 μm . Mit Hilfe der unterschiedlichen Emulsionsdicken kann das Aspektverhältnis verbessert werden [61], um den Serienwiderstand zu minimieren und damit den Füllfaktor FF zu maximieren.

Abbildung 5.1 zeigt den Wirkungsgrad und Füllfaktor von einzelnen Solarzellen mit ganzflächigem Al-BSF für verschiedene Emulsionsdicken der beiden Fingeröffnungsbreiten 30 μm und 40 μm . Da die Fingerbreite sich für unterschiedliche Emulsionsdicken nicht verändert, haben die Kurzschlussstromdichte J_{sc} und Leerlaufspannung V_{oc} nur geringe Unterschiede im Rahmen der Messunsicherheit und werden daher nicht extra dargestellt. Wie an den Messdaten der beiden Parameter in Abb. 5.1 ersichtlich, folgt der Verlauf des Wirkungsgrades dem des Füllfaktors. Bei der 30 μm Fingeröffnung erzielt die größ-

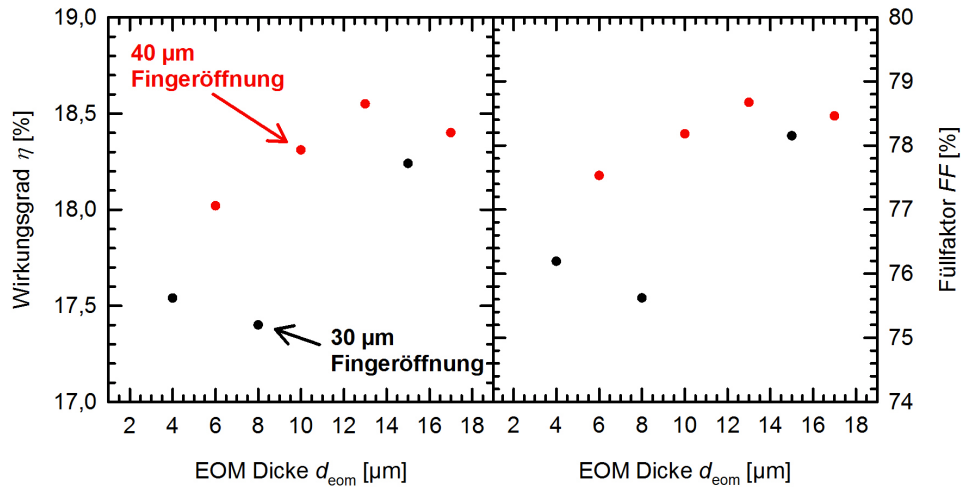


Abb. 5.1: Gemessener Wirkungsgrad η und Füllfaktor FF von Solarzellen mit ganzflächigem Al-BSF und unterschiedlichen Fingeröffnungen von 30 μm und 40 μm beim Single Print. Für jede Fingeröffnung wird die Emulsionsdicke variiert, um Serienwiderstandsverluste zu minimieren.

te Emulsionsdicke über dem Siebgewebe von 15 μm den besten Füllfaktor mit 78,2%. Bei Nutzung der 40 μm Fingeröffnung werden Füllfaktoren mit bis zu 78,7% erreicht. Dieser Wert der Kombination 40 μm Fingeröffnung und 13 μm EOM erzielt infolgedessen ebenso den höchsten Wirkungsgrad mit 18,6%. Bei Anwendung der Kombination 40 μm Fingeröffnung und 17 μm EOM wird ein vergleichbarer FF mit 78,5% gemessen. Dieses Ergebnis zeigt, dass mit größerer Emulsionsdicke nicht automatisch ein besserer Füllfaktor erzielt wird.

Am Beispiel der 40 μm Fingeröffnung lassen sich die gemessenen Füllfaktoren mit den gedruckten Fingerhöhen korrelieren. Abbildung 5.2 zeigt die mit einem optischen Profilometer gemessenen Fingerprofile. Mit einem optischen Profilometer kann berührungslos die Oberflächentopographie der Solarzelle vermessen werden. Anhand der aus den Messungen extrahierten Fingerhöhen zeigt sich, dass mit steigender EOM Dicke die durchschnittliche Fingerhöhe größer wird. Die durchschnittlichen Fingerhöhen berechnen sich aus dem Mittelwert von drei Profilometermessungen je d_{eom} . Der niedrigste FF von 77,5% bei 6 μm EOM Dicke korreliert mit der geringsten Fingerhöhe von 7,9 μm . Bei einer EOM Dicke von 17 μm wird die höchste durchschnittliche Fingerhöhe von 13,2 μm gemessen, aber die Inhomogenität der Höhe entlang des Fingers ist mit einer Differenz von 7,9 μm zwischen der maximalen und minimalen Fingerhöhe auch am größten. Im Vergleich dazu liegt diese Differenz bei einer EOM Dicke von 13 μm bei nur 6,5 μm , wodurch der Füllfaktor in beiden Fällen nahezu den gleichen Wert annimmt.

Neben den elektrischen Daten der Solarzellen ist der Silberpastenverbrauch ein relevanter Parameter, um die Wirkungsgrade einzuordnen. In Abbildung 5.3 sind die IV Daten verschiedener in dieser Arbeit entstandener Solarzellen mit Single Print und ganzflächigem Al-BSF über den Silberpastenverbrauch aufgetragen. Die Datenpunkte mit der Bezeichnung *optimierte Siebe* wurden unter Austesten verschiedener Silberpasten mit

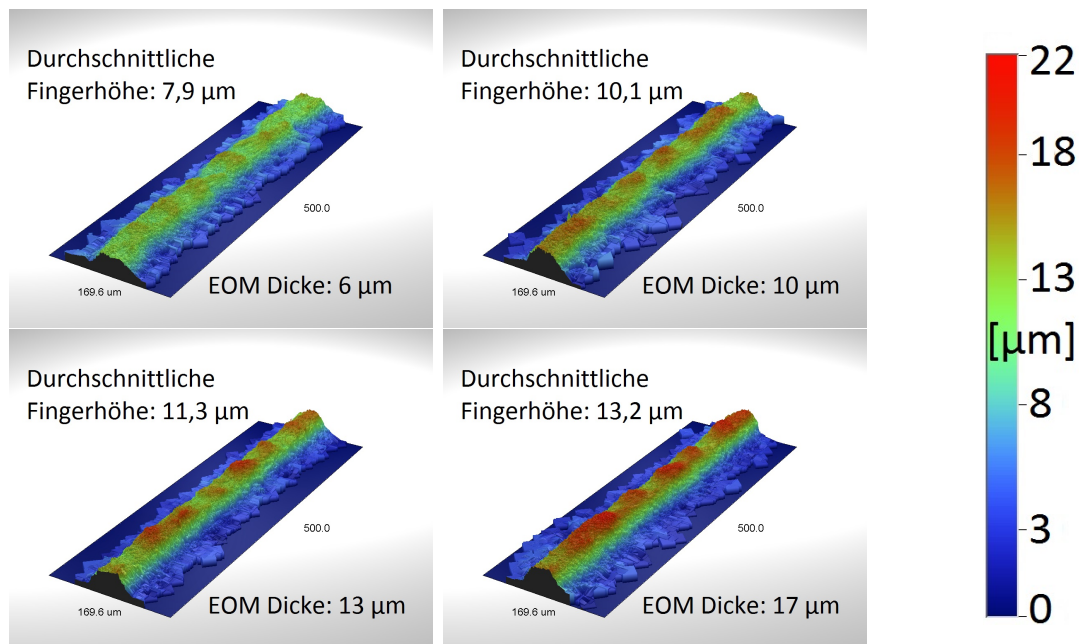


Abb. 5.2: Fingerprofilbilder mit einer Fingeröffnung von 40 μm beim Single Print. Die durchschnittlichen Fingerhöhen berechnen sich aus dem Mittelwert von drei Profilometermessungen je EOM Dicke. Je größer die EOM Dicke, desto größer ist die erzielte Fingerhöhe auf den Solarzellen.

den besten Siebparametern des vorigen Experiments, 30 μm Fingeröffnung mit 15 μm EOM und 40 μm Fingeröffnung mit 13 μm EOM, erzielt.

Für die Daten mit der Bezeichnung *nicht optimierte Siebe* wurden die EOM Dicken nicht wie im vorigen Experiment für jede Fingeröffnung optimiert. Es wurde ein größerer Drahtdurchmesser d_d mit 20 μm verwendet, bei einer Maschenanzahl von 300. Die Fingeröffnung für diese Datenpunkte beträgt von links nach rechts in der Abbildung 30 μm , 40 μm , 60 μm , 70 μm und 80 μm mit d_{eom} zwischen 8 μm und 35 μm .

Für die nicht optimierten Siebe wird bei 80 μm Fingeröffnung der höchste Wirkungsgrad von 18,5% erzielt aufgrund des größten Füllfaktors von 79,2%. Für dieses Ergebnis wurde auch der größte Silberpastenverbrauch mit 294,3 mg vor Trocknung gemessen. Eine wichtige Erkenntnis für die nicht optimierten Siebe ist, dass sich der Füllfaktor und der Wirkungsgrad mit abnehmendem Silberpastenverbrauch stetig verringern. Der Grund dafür liegt im geringeren Fingerquerschnitt und den vermehrt auftretenden Fingerunterbrechungen bei Fingeröffnungen unter 80 μm durch die gewählten Siebparameter. Diese Ergebnisse veranschaulichen, dass zur Reduzierung des Silberpastenverbrauchs bei gleichbleibendem Wirkungsgrad alle Siebparameter optimiert werden müssen und nicht nur eine schmalere Fingeröffnung gewählt werden kann.

Vergleicht man für einen ähnlichen Silberpastenverbrauch die optimierten und nicht optimierten Siebe, so wird mit optimierten Siebparametern hinsichtlich des Drahtdurchmessers, der Maschenanzahl und der EOM Dicke für einen Silberpastenverbrauch von 106,0 mg ein Füllfaktor FF von 78,7% erzielt, der um 1,7%_{abs} höher ist als mit einem

frühen Stadium dieser Arbeit auf die Techniken des Print-on-Print und Dual Print gelegt, so dass für den Single Print keine Untersuchungen auf PERC Solarzellen gemacht wurden.

5.2 Print-on-Print

Für die Anwendung des Print-on-Print Prozesses gibt es verschiedene Kombinationen der Sieböffnungszeiten, wie in Kapitel 3.3 beschrieben. Für den Ausgangspunkt der Weiterentwicklung des PoP wird in einem ersten Versuch der Einfluss der Fingeröffnung in Kombination mit der Druckreihenfolge untersucht.

Es werden Solarzellen mit ganzflächigem Al-BSF mit zwei verschiedenen Siebkombinationen für die Silberkontakte auf der Vorderseite bedruckt, siehe Abbildung 5.4. Bei Prozess 1 (Abb. 5.4 a)) wird der erste Druckschritt mit einer Fingeröffnung von $50\ \mu\text{m}$ durchgeführt, gefolgt vom justierten zweiten Druckschritt mit $60\ \mu\text{m}$ Fingeröffnung. Dies dient dazu, dass die vorhandenen Kontaktfinger des ersten Drucks nicht durch die Emulsion des Siebes beim zweiten Druckschritt beschädigt werden. Die zweite zu testende Kombination (Prozess 2), dargestellt in Abb. 5.4 b), wird in umgekehrter Reihenfolge gedruckt, $60\ \mu\text{m}$ Fingeröffnung beim ersten und $50\ \mu\text{m}$ beim zweiten Druckschritt. Durch den schmaleren zweiten Druck wirkt sich eine mögliche fehlerhafte Justierung des zweiten auf den ersten Druck oder eine nicht passgenaue Positionierung des Layouts bei beiden Sieben weniger stark auf eine Verbreiterung der gedruckten Silberfinger aus.

In Tabelle 5.1 sind die IV Daten der jeweils besten Solarzelle sowie der Mittelwert von fünf Solarzellen (Prozess 1) bzw. vier Solarzellen (Prozess 2) der beschriebenen Siebkombinationen aufgelistet. Der beste Wirkungsgrad von 18,9% wird mit Prozess 1 erzielt, während der Prozess 2 einen deutlich niedrigeren Wirkungsgrad von 18,3% erreicht [21]. Die Mittelwerte über mehrere Solarzellen bestätigen die Unterschiede in den erzielten Zellparametern der beiden Siebkombinationen.

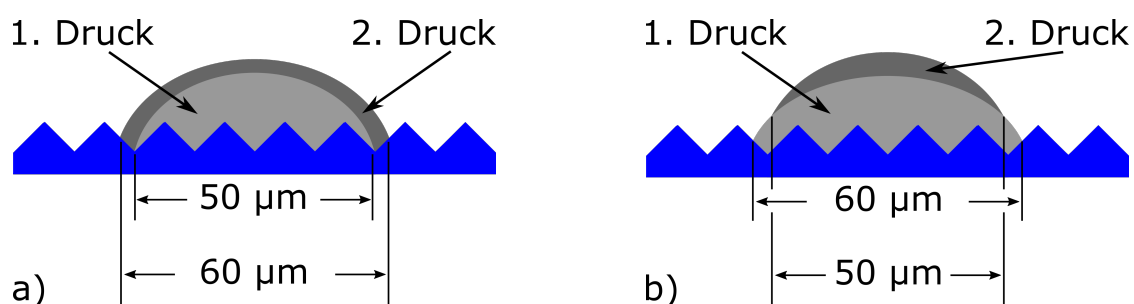


Abb. 5.4: Schematische Darstellung des Querschnitts zweier Silberfinger gedruckt mit dem Print-on-Print Prozess. a) Prozess 1: Für den ersten Druckschritt wird eine Fingeröffnung von $50\ \mu\text{m}$ verwendet, der zweite Druck hat eine breitere Fingeröffnung von $60\ \mu\text{m}$. Durch diese Kombination soll eine Beschädigung des 1. Druckes durch die Emulsion des 2. Druckes verhindert werden. b) Prozess 2: Der erste Druck benutzt eine Fingeröffnung von $60\ \mu\text{m}$, während der 2. Druck eine schmalere Fingeröffnung von $50\ \mu\text{m}$ besitzt. Durch den schmaleren zweiten Druck wird der Einfluss einer Fehljustierung der beiden Druckbilder aufeinander verringert.

Tab. 5.1: Zellparameter der jeweils besten Solarzelle mit vollflächigem Al-BSF und des Mittelwerts von fünf Solarzellen (Prozess 1) bzw. vier Solarzellen (Prozess 2), die mit zwei unterschiedlichen Siebkombinationen beim Print-on-Print gedruckt wurden. Der Prozess 1 erzielt im Vergleich zum Prozess 2 einen um 0,6%_{abs} höheren Wirkungsgrad [21], der durch erhöhte J_{sc} und V_{oc} Werte bedingt ist. Gemessen am ISFH unter Standard-Testbedingungen (25 °C, AM1.5G, 100 mW/cm²).

PoP Prozess	Fingeröffnung 1. Druck [μm]	Fingeröffnung 2. Druck [μm]	Wert	η [%]	J_{sc} [mA/cm ²]	V_{oc} [mV]	FF [%]
1	50	60	Bester	18,9	37,4	634	79,7
1	50	60	Mittel	18,76	37,34	633,4	79,32
2	60	50	Bester	18,3	36,9	624	79,5
2	60	50	Mittel	18,15	36,75	622,5	79,40

Der Prozess 1 erzielt im Vergleich zu Prozess 2 eine um 0,5 mA/cm² erhöhte J_{sc} und eine um 10 mV erhöhte V_{oc} . Die niedrigere Kurzschlussstromdichte für Prozess 2 kann zum Teil durch breitere Kontaktfinger erklärt werden. Während die durchschnittliche Fingerbreite an je 5 Positionen von 5 Solarzellen gemessen mit einem Lichtmikroskop für Prozess 1 einen Wert von 69,7 μm ergibt, beträgt diese für Prozess 2 79,8 μm. Für die Verbreiterung gibt es zwei mögliche Ursachen: ein Zerdrücken des vorhandenen Kontaktfingers an den Seiten durch die Emulsion und das Siebgewebe des zweiten Druckes oder ein stärkeres Auseinanderfließen der Silberpaste beim zweiten Druck, indem das Sieb auf dem vorhandenen Kontaktfinger und nicht der Waferoberfläche aufliegt und die Paste dadurch unter dem Sieb zerfließt, weil keine seitliche Begrenzung durch die Emulsion vorhanden ist. Durch die breiteren Silberfinger erhöht sich die Abschattung für den Prozess 2 im Vergleich zu Prozess 1 um 0,4%_{abs}. Mit dieser erhöhten Abschattung lässt sich ein Verlust von maximal 0,2 mA/cm² in J_{sc} abschätzen.

Eine mögliche Erklärung für die restlichen 0,3 mA/cm² Verlust mit Prozess 2 kann mit den Abbildungen 5.5 a) und b) geliefert werden. Abbildung 5.5 a) zeigt in einer REM Aufnahme den Querschnitt des Silberfingers gedruckt mit Prozess 1, Abbildung 5.5 b) den Querschnitt mit Prozess 2. Der Silberfinger aus Prozess 1 zeigt dabei die übliche Form von siebgedruckten Kontaktfingern, wohingegen der Silberfinger durch Prozess 2 deformiert wirkt. REM Aufnahmen des Querschnitts an anderen Stellen der Solarzelle belegen dieses unregelmäßige Querschnittsprofil des zweiten Prozesses. Durch die unterschiedliche Ausprägung des Querschnittsprofils der beiden untersuchten Prozesse kann es zu Veränderungen der Reflexion an den Kontaktfingern kommen.

Ein Erklärungsansatz für die Differenz in der J_{sc} zwischen beiden Prozessen ist daher, dass durch Reflexionen am Kontaktfinger Photonen, die auf den metallisierten Bereich treffen, anhand des Fingerprofils von Prozess 1 auf die Solarzelle gelenkt werden und zum Strom beitragen, während das Fingerprofil von Prozess 2 diese Reflexionen auf die Solarzelle unterdrückt. Weitergehende Messungen, die diese Annahme unterstützen, wurden nicht durchgeführt, da der Vorteil der Siebkombination mit Prozess 1 deutlich ausfällt

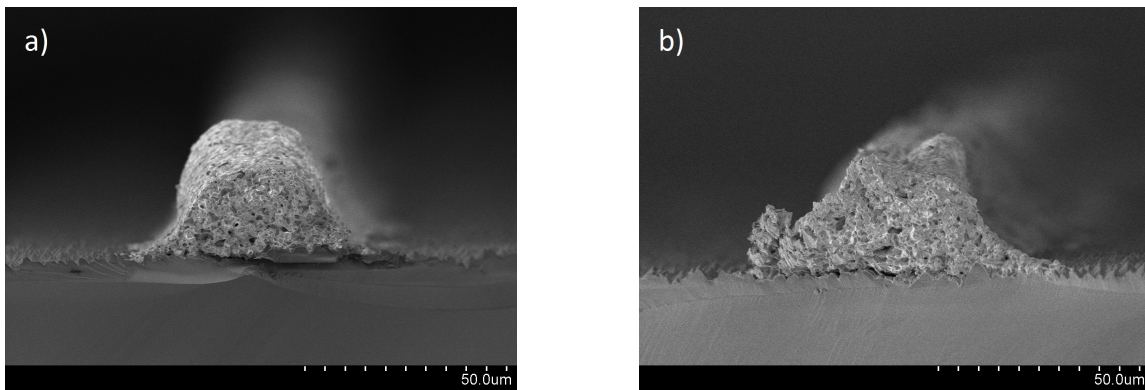


Abb. 5.5: REM Aufnahmen des Querschnitts von gedruckten Silberfingern mit Print-on-Print. a) Für die Kontaktfinger wird eine Fingeröffnung von $50\ \mu\text{m}$ für den ersten und $60\ \mu\text{m}$ für den zweiten Druckschritt verwendet. Das Querschnittsprofil zeigt die übliche Form eines siebgedruckten Silberfingers. b) Für die Kontaktfinger wird eine Fingeröffnung von $60\ \mu\text{m}$ für den ersten und $50\ \mu\text{m}$ für den zweiten Druckschritt verwendet. Das Fingerprofil wirkt deformiert durch den Einfluss der Siebemulsion beim zweiten Druckschritt.

anhand aller Parameter der IV Messung. Der Grund für den Unterschied von $10\ \text{mV}$ in V_{oc} zwischen den beiden Prozessen ist unklar, da die Zellen aus dem gleichen Material gefertigt wurden und gleichzeitig alle Prozessschritte außer der unterschiedlichen Vorderseitenmetallisierung durchlaufen haben.

Aufgrund der Ergebnisse dieses Experiments wird im Laufe dieser Arbeit für den zweiten Druckschritt immer eine $10\ \mu\text{m}$ breitere Fingeröffnung im Sieb gegenüber dem ersten Druck gewählt, um die schon vorhandenen Kontaktfinger auf dem Wafer durch die Siebemulsion beim zweiten Druck nicht zu beschädigen.

Reduzierung der Fingerbreite

Durch die Festlegung der Siebkombination beim Print-on-Print anhand der Ergebnisse in Tabelle 5.1 wird in einem zweiten Experiment die Reduzierung der Fingerbreite untersucht, um die Kurzschlussstromdichte und den Wirkungsgrad zu erhöhen. Dazu werden die drei Siebkombinationen $30/40\ \mu\text{m}$ (erster/zweiter Druck), $40/50\ \mu\text{m}$ und $50/60\ \mu\text{m}$ verglichen. Für jede Siebkombination wird im Vorfeld durch Annahmen für die gedruckte Fingerbreite und Fingerhöhe die optimale Fingeranzahl nach den Formeln von *Mette* [2] berechnet. Zusätzlich werden zwei verschiedene Kombinationen von Silberpasten für jede Siebkombination untersucht. Für den ersten Druck wird eine industrielle Silbersiebdruckpaste verwendet. Für den zweiten Druck eine Silberpaste, die nach Herstellerangaben weniger Glasfritte zur Kontaktierung enthält, aber dafür die Leitfähigkeit verbessert.

Die IV Messdaten der jeweils besten Solarzelle mit ganzflächigem Al-BSF und den beschriebenen Variationen sind in Abbildung 5.6 dargestellt. Der beste Wirkungsgrad beim Vergleich aller Varianten erzielt die Siebkombination $40/50\ \mu\text{m}$ mit $18,7\%$ bei Verwendung der Pasten 3+4. Im Pastenvergleich wird mit den Pasten 3+4 für jede Siebkombination ein besserer FF und Wirkungsgrad erreicht als mit den Pasten 1+2. Die ver-

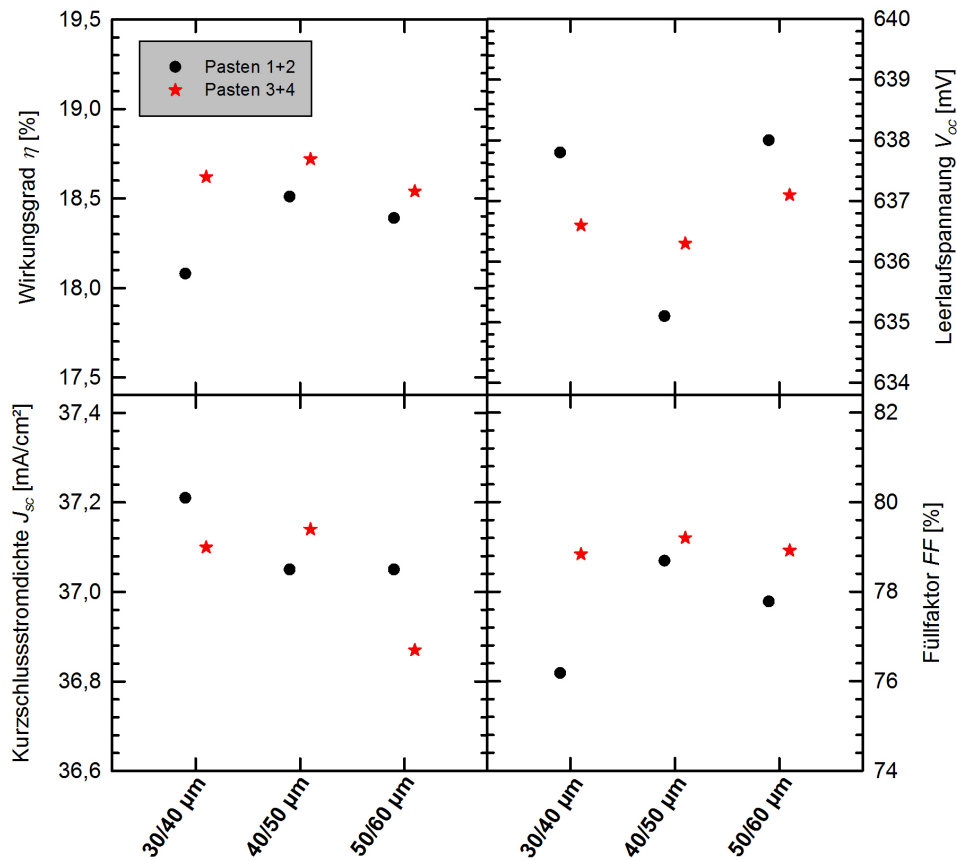


Abb. 5.6: Gemessener Wirkungsgrad η , Leerlaufspannung V_{oc} , Kurzschlussstromdichte J_{sc} und Füllfaktor FF der jeweils besten Solarzelle mit ganzflächigem Al-BSF für verschiedene Siebkombinationen beim Print-on-Print Prozess sowie zwei unterschiedlichen Pastenkombinationen. Die Pasten 3+4 erzielen gegenüber den Pasten 1+2 bei jeder Siebkombination den besten Wirkungsgrad durch einen besseren Füllfaktor.

wendeten Pasten zeigen insbesondere bei der schmalsten Siebkombination von 30/40 μm einen deutlichen Einfluss auf den Füllfaktor mit einem Unterschied von 78,8% (Pasten 3+4) zu 76,2% (Pasten 1+2). Als wichtigste Erkenntnis dieses Experiments zeigt sich pastenunabhängig betrachtet die Siebkombination 40/50 μm als das beste Layout für die verwendeten kommerziellen Silbersiebdruckpasten.

Die Leerlaufspannung V_{oc} zeigt keinen ersichtlichen Trend zwischen den Pasten- und Siebkombinationen. Dagegen kann man bei der Kurzschlussstromdichte J_{sc} einen Trend zu höheren Werten mit kleiner werdender Siebkombination erahnen. Dies lässt sich belegen durch die Reduzierung der Metallisierungsfläche auf der Vorderseite von 6,5% für die Siebkombination 50/60 μm zu 6,1% für 30/40 μm , gemittelt über beide Pastenkombinationen. Die Metallisierungsfläche wurde bestimmt durch die Messung der Fingerbreite in Kombination mit dem Gridlayout.

Die Ursache für die Differenz im Füllfaktor zwischen den beiden Pastenkombinationen liegt im Serienwiderstand mit einem vermutlich unterschiedlichen spezifischen Kontakt-

widerstand ρ_c der Pasten 1 und 3. Dies wird folgendermaßen abgeschätzt: Der gemessene Fingerlinienwiderstand der beiden Pastenkombinationen ist für die Siebkombinationen 50/60 μm und 40/50 μm gleich, bei der 30/40 μm Siebkombination erzielen die Pasten 1+2 mit $0,54\pm 0,06 \Omega/\text{cm}$ sogar einen geringeren Wert als die Pasten 3+4 mit $0,63\pm 0,08 \Omega/\text{cm}$. Da bei beiden Pastenvarianten die gleiche Fingeranzahl, das selbe Material und die selben Prozessschritte verwendet wurden und auf Elektrolumineszenz [102, 103] Aufnahmen auch keine Mehrzahl von Fingerunterbrechungen ersichtlich sind, lassen sich die Unterschiede im FF nach den Serienwiderstandsanteilen der Solarzelle aus Kapitel 4.4 auf ρ_c zurückführen.

Durch die Evaluierung neuer Silberpasten, Optimierung des Emitterprozesses, Anpassung der Siebstruktur und des Gridlayouts bei Beibehaltung der Siebkombination 40/50 μm konnte im Verlauf dieser Arbeit der Wirkungsgrad mit dem Print-on-Print Prozess weiter gesteigert werden. Die Arbeiten zum Emitter werden in Kapitel 7.1 behandelt.

Tabelle 5.2 listet die besten hergestellten Solarzellen mit Print-on-Print und deren IV Parameter auf, dabei werden als Variationen die Zellart und der Emitterschichtwiderstand gezeigt. Für eine Solarzelle mit ganzflächigem Al-BSF wird als höchster Wert ein unabhängig bestätigter Wirkungsgrad von 19,3% erzielt und damit eine Steigerung um $0,6\%_{\text{abs}}$ im Vergleich zum besten Wirkungsgrad im vorher beschriebenen Experiment. Durch Anwendung des PERC Prozesses mit einem ähnlichen Schichtwiderstand kann der Wirkungsgrad um $1,3\%_{\text{abs}}$ gesteigert werden. Im Vergleich zur besten Al-BSF Solarzelle bewirken insbesondere die um 16 mV höhere V_{oc} und die um $1,2 \text{ mA}/\text{cm}^2$ höhere J_{sc} den Wirkungsgradgewinn durch die PERC Technologie. Der beste unabhängig bestätigte Wirkungsgrad mit Print-on-Print erzielt damit 20,6%. Der beste am ISFH gemessene Wirkungsgrad mit dem PoP Prozess erzielt einen Wert von 20,8% durch den Einsatz einer höherohmigen Diffusion mit einem finalen Emitterschichtwiderstand von $107 \Omega/\text{sq}$ und Steigerung von V_{oc} und J_{sc} .

Tab. 5.2: Auflistung der besten Solarzellen und deren IV Daten, die in dieser Arbeit mit dem Print-on-Print Prozess hergestellt wurden. Diese Ergebnisse wurden nach Optimierungen der Siebstruktur und des Gridlayouts sowie des Emitterprozesses in Kombination mit den verwendeten Silberpasten erzielt. Die Umstellung von Solarzellen mit ganzflächigem Al-BSF auf PERC Solarzellen erhöht den Wirkungsgrad um $1,3\%_{\text{abs}}$ auf einen unabhängig bestätigten Wert von 20,6% [37], wobei insbesondere V_{oc} und J_{sc} gesteigert wurden.

Zellart	Sieböffnung [μm]	Emitterschicht- widerstand [Ω/sq]	η [%]	V_{oc} [mv]	J_{sc} [mA/cm^2]	FF [%]
Al-BSF	40/50	64	19,3*	642	37,7	79,9
PERC	40/50	72	20,6*	658	38,9	80,5
PERC	40/50	107	20,8	661	39,3	80,2

*unabhängig bestätigt vom Fraunhofer ISE CalLab

5.3 Dual Print

Für die Etablierung des Dual Print am ISFH wird in einem ersten Experiment der in Kapitel 3.4 beschriebene Druckprozess mit einer Fingeröffnung von $40\ \mu\text{m}$ in der Schablone für die Vorderseite von Solarzellen mit ganzflächigem Al-BSF verwendet. Als Silberpaste wird eine industrielle Siebdruckpaste gedruckt und keine speziell für den Schablonendruck konzipierte. Das Druckraket besteht aus einem Rakelgummi aus Polyurethan mit Shore-Härte 75A. Für den Busbardruck wird ein Sieb mit einer nicht-durchfeuernden Silberpaste benutzt, um die Rekombination unter den Metallkontakten zu verringern. Als Vergleich werden Solarzellen mit Print-on-Print und $50/60\ \mu\text{m}$ Fingeröffnung hergestellt. Der beste Wirkungsgrad mit PoP wird mit $18,9\%$ gemessen. Im Vergleich dazu erzielt der Dual Print eine Steigerung von $0,2\%_{\text{abs}}$ auf $19,1\%$ Wirkungsgrad. Der Füllfaktor FF und die Kurzschlussstromdichte J_{sc} unterscheiden sich kaum, der Wirkungsgradgewinn wird durch eine höhere Leerlaufspannung V_{oc} des Dual Print erzielt aufgrund der eingesetzten nicht-durchfeuernden Silberpaste für die Busbars. Weiterführende Erklärungen zur nicht-durchfeuernden Busbarpaste folgen in Kapitel 6.1.

Neben der erzielten Wirkungsgradsteigerung gegenüber dem PoP Prozess treten auf der anderen Seite Schwankungen im Serienwiderstand R_s innerhalb der gleich prozessierten Versuchsgruppe des Dual Print auf. Diese Unregelmäßigkeiten konnten in den meisten anfänglichen Experimenten mit Dual Print beobachtet werden.

Beispielhaft für die Schwankungen im R_s sind in Abbildung 5.7 die Aufnahmen mit Elektrolumineszenz (EL) von vier gleich prozessierten und gedruckten Solarzellen aus dem oben beschriebenen Experiment gezeigt, bei denen der Serienwiderstand zwischen $0,7\ \Omega\text{cm}^2$ und $2,1\ \Omega\text{cm}^2$ variiert. Diese Solarzellen wurden von links nach rechts mit aufsteigender Temperatur gefeuert. Die Soll-Temperaturen am Durchlaufofen wurden zwischen $880\ \text{°C}$ und $920\ \text{°C}$ eingestellt. Gemessen wurden für die niedrigste Feuertemperatur von $880\ \text{°C}$ sowie die höchste von $920\ \text{°C}$ die besten Serienwiderstände mit $0,7\ \Omega\text{cm}^2$ bzw. $0,8\ \Omega\text{cm}^2$. Die beiden dazwischenliegenden Temperaturen von $890\ \text{°C}$ und $900\ \text{°C}$ erzielen

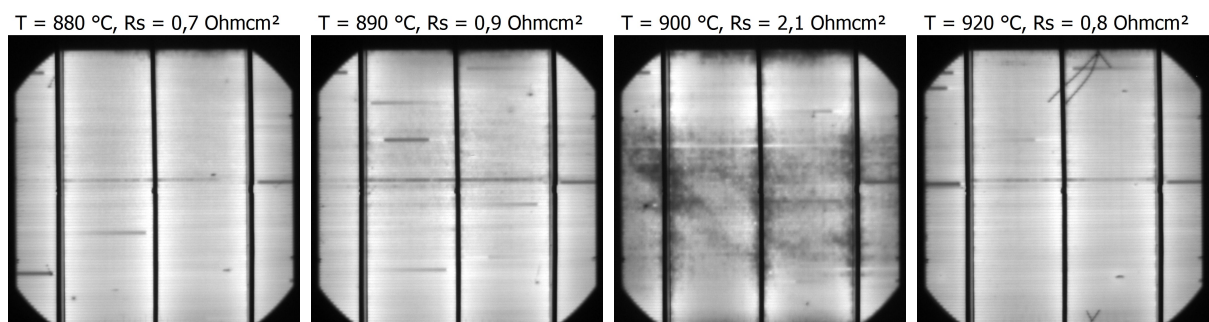


Abb. 5.7: Elektrolumineszenz Aufnahmen von gleich prozessierten Solarzellen mit ganzflächigem Al-BSF und Vorderseitenmetallisierung mittels Dual Print. Variiert wurde die Feuertemperatur T , aufsteigend von links nach rechts. Bei $900\ \text{°C}$ werden Bereiche niedriger EL Intensität gemessen, die mit dem höchsten Serienwiderstand R_s von $2,1\ \Omega\text{cm}^2$ korrelieren. Die Widerstandsverluste werden durch Inhomogenitäten der Fingerhöhe auf der Solarzelle durch den Einfluss des Druckprozesses hervorgerufen.

T = 900 °C, $R_s = 2,1 \text{ Ohmcm}^2$

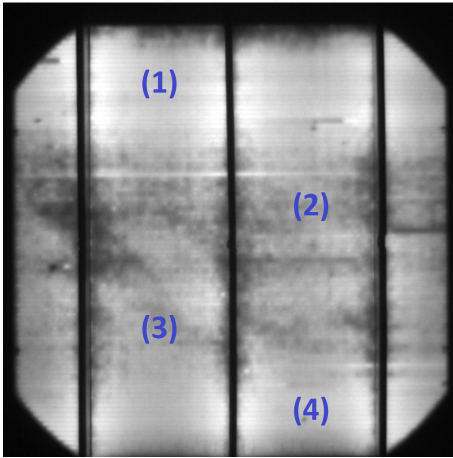


Abb. 5.8: Darstellung der Messpositionen der Fingerhöhe mittels optischer Profilometrie. Gemessen werden die beiden Solarzellen mit einem Serienwiderstand von $2,1 \text{ } \Omega\text{cm}^2$ und $0,8 \text{ } \Omega\text{cm}^2$ aus den Bildern von Abbildung 5.7.

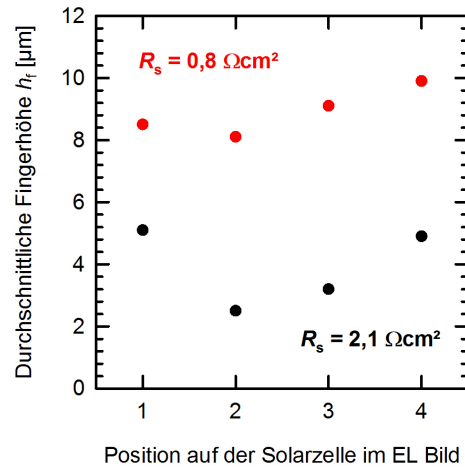


Abb. 5.9: Durchschnittliche Fingerhöhe h_f über die Position auf der Solarzelle. Die Positionen sind in Abbildung 5.8 dargestellt. Die Bereiche niedriger EL Intensität korrelieren bei einem R_s von $2,1 \text{ } \Omega\text{cm}^2$ mit den kleinsten Fingerhöhen von $2,5 \text{ } \mu\text{m}$ und $3,2 \text{ } \mu\text{m}$.

schlechtere R_s mit $0,9 \text{ } \Omega\text{cm}^2$ bzw. $2,1 \text{ } \Omega\text{cm}^2$. Die Serienwiderstände korrelieren mit der aufgenommenen EL Intensität der Solarzellen. Man sieht insbesondere auf der zweiten Aufnahme von rechts Bereiche niedriger EL Intensität aufgrund der lokalen Reduzierung der Ladungsträgerkonzentration.

Es lässt sich abschätzen, dass diese Unterschiede in der EL Intensität nicht von der eingestellten Temperatur des Ofenprozesses zur Kontaktausbildung stammen. Nach der in Kapitel 3.1 beschriebenen Theorie der Kontaktausbildung während des Hochtemperaturprozesses und die Auswirkung der eingestellten Temperatur müsste der spezifische Kontaktwiderstand, und infolgedessen der Serienwiderstand bei der optimalen Temperatur minimal sein. Zu höheren und niedrigeren Temperaturen sollte der R_s gleich bleiben oder stetig ansteigen, was in dem Fall nicht mit der Messung der IV Daten übereinstimmt. Durch Messungen der durchschnittlichen Fingerhöhe h_f über $0,5 \text{ mm}$ an vier Positionen (siehe Abbildung 5.8) mittels optischer Profilometrie zeigen sich Unterschiede in den verschiedenen Bereichen der Solarzellen. Die gemessenen h_f sind in Abbildung 5.9 dargestellt. Untersucht werden die beiden Solarzellen mit einem Serienwiderstand von $2,1 \text{ } \Omega\text{cm}^2$ und $0,8 \text{ } \Omega\text{cm}^2$ aus den Bildern von Abbildung 5.7. Die Zelle mit einem Serienwiderstand von $2,1 \text{ } \Omega\text{cm}^2$ hat durchschnittliche Fingerhöhen zwischen $2,5 \text{ } \mu\text{m}$ und $3,2 \text{ } \mu\text{m}$ in dem Bereich niedriger EL Intensität in der Mitte der Solarzelle an den Positionen (2) und (3). Dahingegen werden an den Positionen (1) und (4) durchschnittliche Fingerhöhen von $5,1 \text{ } \mu\text{m}$ bzw. $4,9 \text{ } \mu\text{m}$ gemessen. Zum Vergleich wird bei der Solarzelle mit einem R_s von $0,8 \text{ } \Omega\text{cm}^2$ an 4 Positionen eine durchschnittliche h_f zwischen $8,1 \text{ } \mu\text{m}$ und $9,9 \text{ } \mu\text{m}$ gemessen, wobei keine Systematik bezüglich der Position zu beobachten ist.

Durch die gleiche Prozessierung der Solarzellen und der Intensitätsverteilung auf der EL

Aufnahme in Kombination mit den gemessenen h_f lässt sich der erhöhte Serienwiderstand auf die Vorderseitenmetallisierung zurückführen. Die durchgeführten Messungen der Fingerhöhen belegen dies, da sich durch die geringeren h_f der Fingerwiderstand um bis zu $0,6 \Omega\text{cm}^2$ erhöht. Ein weiterer möglicher Einflussfaktor ist der Kontaktwiderstand. Die Ursache der Inhomogenität der Fingerhöhe beim Dual Print und deren Auswirkung auf die elektrischen Eigenschaften der Solarzelle werden im Folgenden genauer untersucht.

5.3.1 Einfluss der Fingerhöhe auf die Widerstandsverluste und den Silberpastenverbrauch

In den folgenden Abschnitten wird durch Variation der Druckparameter der Einfluss auf die Fingerhöhe und deren Homogenität über die Solarzelle sowie daraus resultierend der Einfluss auf die Widerstandsverluste und den Silberpastenverbrauch systematisch untersucht.

Dazu werden PERC Solarzellen mit einem homogen diffundierten $67 \Omega/\text{sq}$ Emitter hergestellt und mit einem 3 Busbar Design mittels Dual Print mit einer $40 \mu\text{m}$ Schablonenöffnung bedruckt. Als Rakel werden Polyurethanrakel mit Shore Härten von 75A, 80A und 95A sowie ein Metallrakel verwendet. Zusätzlich wird der Rakeldruck, ausgedrückt in Masse, zwischen 2,5 kg und 6 kg variiert. Eine Masse von 5 kg entspricht einer Kraft von 49 N. Das verwendete Rakel in Kombination mit dem gewählten Rakeldruck dient dem Erreichen verschiedener Fingerhöhen, wie in Abbildung 5.10 schematisch dargestellt.

Je weicher das Polyurethanrakel bzw. je größer der Rakeldruck, desto stärker drückt das Rakelgummi in die Fingeröffnungen und reduziert damit das Pastenvolumen, welches auf die Solarzelle übertragen werden kann. Das Metallrakel dringt nicht in die Fingeröffnung der Schablone während des Druckprozesses ein und nutzt das maximale Volumen der Fingeröffnung aus. Als Silberpaste für die Finger wird eine kommerziell erhältliche Paste benutzt, die für den normalen Siebdruck konzipiert wurde. Neben den elektrischen Parametern der finalen PERC Solarzellen wird der resultierende Pastenverbrauch für die Finger nach dem Drucken und vor dem Trocknen mit einer Waage gemessen. Zusätzlich werden der Serienwiderstand und dessen Komponenten näher untersucht und mit

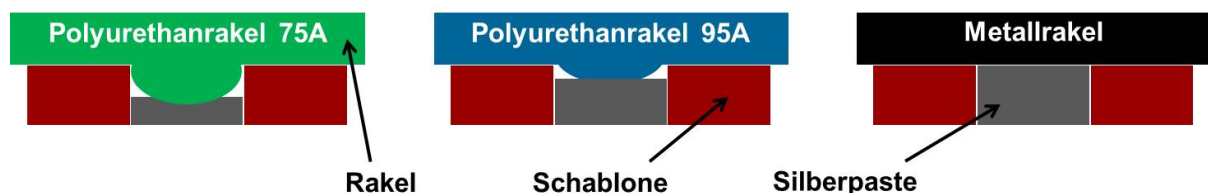


Abb. 5.10: Schematische Darstellung des Rakels während des Druckprozesses auf einer Schablone. Je weicher das Polyurethanrakel bzw. je größer der Rakeldruck, desto stärker drückt das Rakelgummi in die Fingeröffnungen und reduziert damit das Pastenvolumen, welches auf die Solarzelle übertragen werden kann. Das Metallrakel dringt nicht in die Fingeröffnung der Schablone während des Druckprozesses ein und nutzt das maximale Volumen der Fingeröffnung aus.

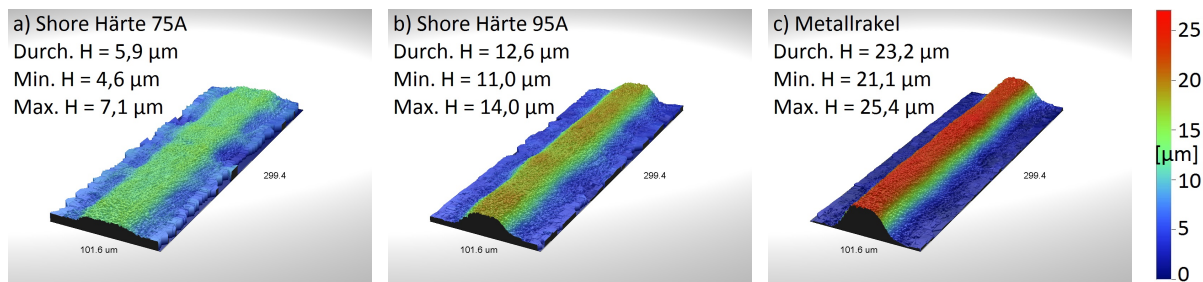


Abb. 5.11: Vergleich der mittels Dual Print gedruckten Fingerprofile mit drei verschiedenen Rakelhärten und Angabe der durchschnittlichen (Durch. H), der minimalen (Min. H) und der maximalen Fingerhöhe (Max. H). a) Das weichste der in diesem Versuch verwendeten Polyurethanrakel erzielt die niedrigste durchschnittliche h_f von $5,9 \mu\text{m}$, aber eine gute Homogenität des Höhenprofils entlang des Kontaktfingers mit einer Abweichung von $\pm 1,2 \mu\text{m}$. b) Das härteste verwendete Polyurethanrakel mit Shore 95A steigert die durchschnittliche h_f auf $12,6 \mu\text{m}$. c) Die größten Fingerhöhen in diesem Versuch werden bei Benutzung des Metallrakels mit durchschnittlich $23,2 \mu\text{m}$ erzielt.

analytischen Berechnungen verglichen.

Die gedruckte Fingerbreite beträgt $55 \mu\text{m}$ für die Polyurethanrakel und $65 \mu\text{m}$ für das Metallrakel. Die erhaltenen Fingerprofile der verschiedenen Druckparameter werden mit einem optischen Profilometer analysiert. Drei exemplarische Profile der gedruckten Silberfinger sind in Abbildung 5.11 a) - c) gezeigt. Die Profile zeigen die geringe Höhenvariation entlang eines gedruckten Fingers mit einer Differenz von höchstens $4,3 \mu\text{m}$ zwischen der minimalen und maximalen Fingerhöhe. Durch den Einsatz der verschiedenen Rakelhärten ist es wie in Abbildung 5.10 beschrieben möglich, die Fingerhöhe zu variieren. Anhand der drei gezeigten Fingerprofile variiert die durchschnittliche Fingerhöhe h_f zwischen $5,9 \mu\text{m}$ und $23,2 \mu\text{m}$.

Die gemessenen durchschnittlichen h_f der Druckvariationen sind in Abbildung 5.12 dargestellt und zeigen eine nahezu lineare Abnahme des Fingerpastenverbrauchs mit abnehmender Fingerhöhe. Die durchschnittliche Fingerhöhe wird berechnet über eine Länge des Fingerprofils von $0,5 \text{ mm}$ an drei Positionen auf der Solarzelle: oben, in der Mitte und unten zwischen den Busbars parallel zur Druckrichtung der Silberfinger. Die größte durchschnittliche Fingerhöhe von $24,3 \mu\text{m}$ wird bei einem Pastenverbrauch von $114,1 \text{ mg}$ und Benutzung des Metallrakels erreicht. Die kleinste gemessene durchschnittliche Fingerhöhe beträgt $5,9 \mu\text{m}$ bei einem Fingerpastenverbrauch von $40,7 \text{ mg}$ unter Verwendung eines Polyurethanrakel mit der Shore Härte 75A. Fingerhöhen bei Fingerpastenverbräuchen kleiner als 40 mg werden nicht gemessen und berechnet, da diese Solarzellen viele Fingerunterbrechungen sowie ein sehr inhomogenes Druckbild haben, was bei der Messung von wenigen Positionen und kleinen Ausschnitten zu einem inkorrekten Ergebnis für die durchschnittliche h_f führen würde.

Die Fehlerbalken in Abb. 5.12 stellen die minimalen und maximalen Werte der durchschnittlichen Fingerhöhe an den drei Messpositionen dar und geben damit die Homogenität von h_f über die Solarzelle an. Die mit dem Metallrakel gedruckten PERC Solarzellen zeigen eine sehr gleichmäßige Verteilung der durchschnittlichen h_f über die Zelle mit ei-

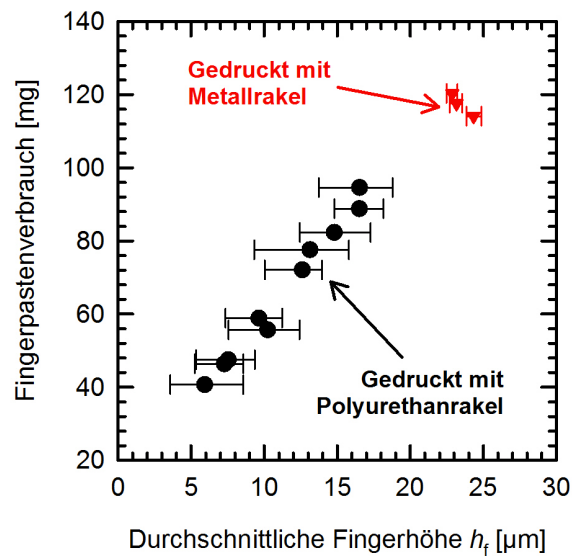


Abb. 5.12: Einfluss der Fingerhöhe auf den Silberpastenverbrauch für die mit einer Schablone beim Dual Print gedruckten Kontaktfinger. Die größten Fingerhöhen mit bis zu $24,3 \mu\text{m}$ werden bei Benutzung des Metallrakels in Verbindung mit dem höchsten Pastenverbrauch von bis zu 120 mg erzielt. Je weicher das verwendete Polyurethanrakel, desto geringere Fingerhöhe und kleinere Pastenverbräuche werden erreicht. Die Fehlerbalken stellen die minimalen und maximalen Werte der durchschnittlichen Fingerhöhe an drei Messpositionen dar und geben damit die Homogenität der Fingerhöhe über die Solarzelle an.

ner Variation zwischen $0,35 \mu\text{m}$ und $0,55 \mu\text{m}$. Dagegen liegt die min./max. Variation der durchschnittlichen Fingerhöhe für die Solarzellen mit Polyurethanrakel im Bereich von $1,3 \mu\text{m}$ bis $3,8 \mu\text{m}$. Die nicht gleichmäßigen durchschnittlichen Fingerhöhen über den Wafer können hervorgerufen werden durch ein nicht perfekt eben eingebautes Polyurethanrakel in die Halterung, durch Abnutzung des Gummirakels oder durch einen zu geringen Rakeldruck. Dagegen zeigen alle Druckvariationen ein nahezu ebenes Oberflächenprofil entlang eines Fingers mit einer Standardabweichung von h_f zwischen $0,31 \mu\text{m}$ und $1,56 \mu\text{m}$ für die Messung an einer einzelnen Position über $0,5 \text{ mm}$ Länge.

5.3.2 Ergebnisse PERC Solarzellen

Abbildung 5.13 zeigt den Wirkungsgrad η , die Leerlaufspannung V_{oc} , die Kurzschlussstromdichte J_{sc} und den Füllfaktor FF der zu den Druckvariationen gehörigen PERC Solarzellen aufgetragen über den Silberpastenverbrauch der Finger. Für Fingerpastenverbräuche über 60 mg erzielen die PERC Solarzellen einen durchschnittlichen Wirkungsgrad von $20,3 \pm 0,1\%$ [104]. Dagegen treten bei weniger als 60 mg Fingerpastenverbrauch Verluste im Wirkungsgrad auf, verursacht durch einen erhöhten Serienwiderstand und infolgedessen reduzierten Füllfaktor. Der Verlauf des Wirkungsgrades folgt daher größtenteils übereinstimmend dem des FF . Ab einem Fingerpastenverbrauch über 20 mg wird für V_{oc} ein Mittelwert von $654,5 \text{ mV}$ mit einer Standardabweichung von $1,2 \text{ mV}$ erzielt,

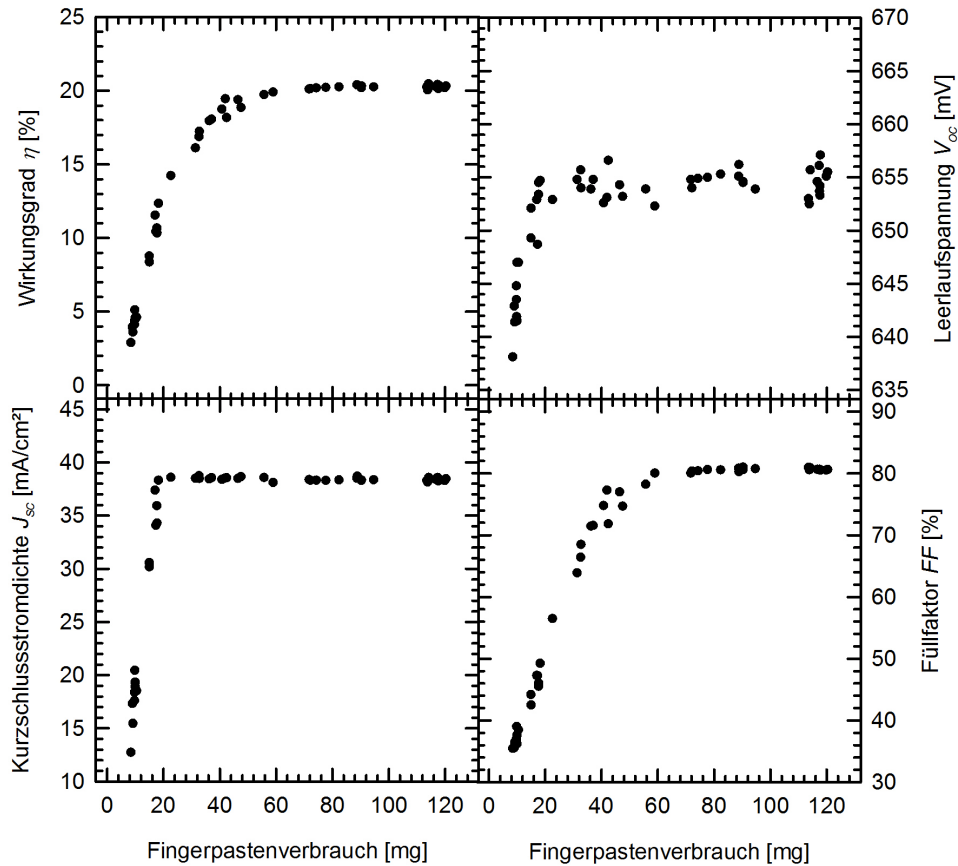


Abb. 5.13: Gemessener Wirkungsgrad η , Leerlaufspannung V_{oc} , Kurzschlussstromdichte J_{sc} und Füllfaktor FF von PERC Solarzellen für die Variation des Silberpastenverbrauchs der mit einer Schablone beim Dual Print gedruckten Kontaktfinger. Für Pastenverbräuche über 60 mg wird ein durchschnittlicher Wirkungsgrad von 20,3% erzielt [104]. Für weniger als 60 mg Fingerpastenverbrauch sinkt der Wirkungsgrad aufgrund des reduzierten Füllfaktors. Die verringerte J_{sc} für Pastenverbräuche unter 20 mg hat ihren Ursprung in den auftretenden Fingerunterbrechungen und dem erhöhtem Serienwiderstand.

für J_{sc} ein Mittelwert von $38,4 \pm 0,2 \text{ mA/cm}^2$. Für Pastenverbräuche unter 20 mg zeigen die PERC Zellen eine verringerte J_{sc} . Der Grund dafür sind die vermehrt auftretenden Fingerunterbrechungen und der ansteigenden Serienwiderstand auf Werte über $8 \text{ } \Omega\text{cm}^2$.

5.3.3 Analyse der Widerstandsverluste

Um den Einfluss des Fingerpastenverbrauchs auf den Füllfaktor, verursacht durch den Serienwiderstand, besser zu verstehen, wird der Fingerlinienwiderstand R_L sowie der spezifische Kontaktwiderstand ρ_c zum Emitter gemessen. Zur Bestimmung des Fingerlinienwiderstandes (Abb. 5.14 a)) wird der Gesamtwiderstand zwischen zwei Busbars gemessen und unter Einbeziehung des Abstands der Busbars und der Anzahl der Finger der Fingerlinienwiderstand berechnet. Der geringste R_L mit $0,39 \text{ } \Omega/\text{cm}$ wird beim größ-

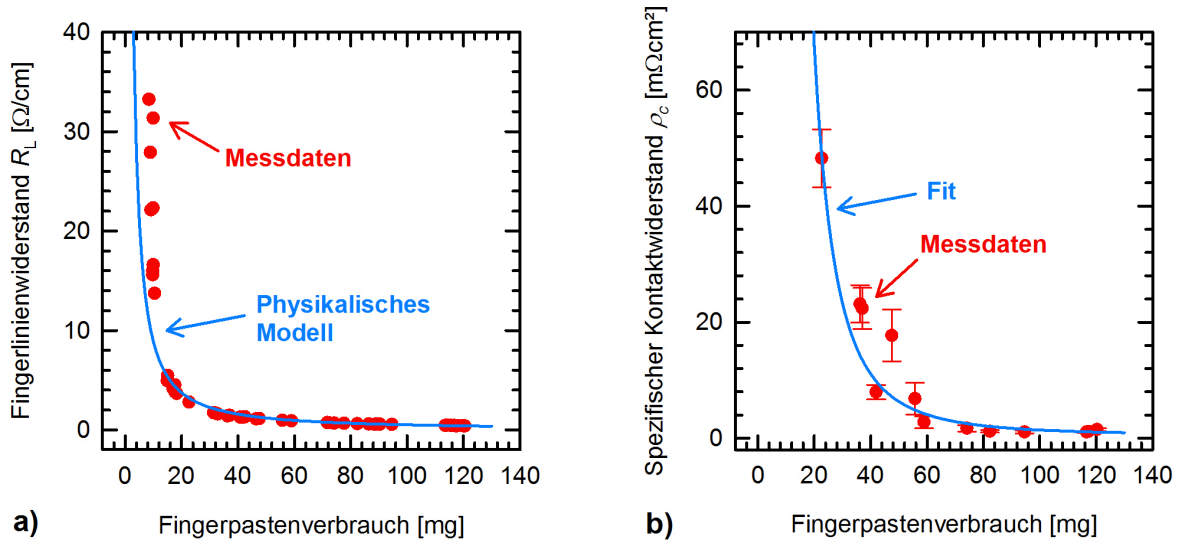


Abb. 5.14: Abhängigkeit der Widerstände auf der Vorderseite der PERC Solarzellen vom Silberpastenverbrauch der Kontaktfinger [104]. a) Der Fingerlinienwiderstand steigt mit abnehmendem Fingerpastenverbrauch an. Die experimentellen Daten werden gefittet mit dem physikalischen Zusammenhang, dass der Fingerlinienwiderstand R_L gleich dem spezifischen Widerstand der Silberpaste ρ_f geteilt durch die Querschnittsfläche des Silberfingers A_f ist. b) Mit abnehmendem Pastenverbrauch steigt ρ_c an. Diese Abhängigkeit des spezifischen Kontaktwiderstandes von der Pastenmenge ist unerwartet und wurde in der Literatur in dieser Art noch nicht gezeigt. Für die spätere Auswertung des Serienwiderstandes werden die Messdaten mit einer mathematischen Potenzfunktion gefittet.

ten Fingerpastenverbrauch von 120,4 mg gemessen. Ab einem Pastenverbrauch von unter 100 mg steigt R_L auf größer als 0,5 Ω/cm , bei weniger als 70 mg auf größer als 0,75 Ω/cm . Ein Ansteigen des Fingerlinienwiderstandes von 1 Ω/cm bis auf Werte im mittleren zweistelligen Bereich ist bei weniger als 40 mg Fingerpastenverbrauch zu beobachten. Durch die Messung zwischen zwei Busbars über alle Finger können Inhomogenitäten der einzelnen Fingerlinienwiderstände und Fingerunterbrechungen die Messung beeinflussen. Die experimentellen Daten werden modelliert über die Formel

$$R_L = \frac{\rho_f}{A_f} \quad (5.1)$$

mit dem physikalischen Zusammenhang, dass der Fingerlinienwiderstand R_L gleich dem spezifischen Widerstand der Silberpaste ρ_f für die Finger geteilt durch die Querschnittsfläche des Silberfingers A_f ist. Für die Berechnung der Querschnittsfläche wird ein trapezförmiger Fingerquerschnitt mit einer unteren Fingerbreite von 62 μm und einer Breite an der Oberfläche von 21,7 μm angenommen, um den Fingerquerschnitt mit den Fingerprofilen aus Abb. 5.11 in Übereinstimmung zu bringen. Für die Fingerhöhe werden die gemessenen Werte aus Abbildung 5.12 verwendet.

Um die berechneten Werte für den Linienwiderstand an die experimentellen Daten anzupassen, wird für den spezifischen Widerstand ρ_f ein Wert von 4 $\mu\Omega\text{cm}$ ermittelt, wel-

cher vergleichbar zu Werten aus der Literatur [93, 100, 105–107] ist. Für die Anpassung wurde die Übereinstimmung zwischen modellierten und experimentellen Daten für Fingerpastenverbräuche über 40 mg angestrebt, da dort die Fingerhöhen über die Solarzelle homogen verteilt sind (siehe Abbildung 5.12) und dies für die verwendete Messmethode des Linienwiderstandes in diesem Experiment Voraussetzung ist.

Der spezifische Kontaktwiderstand ρ_c in Abbildung 5.14 b) wird mit der Transferlängen Methode (TLM) [108] gemessen. Bei der TLM Messung wird der Widerstand zwischen je zwei Kontaktfingern durch den Emitter mittels 4-Spitzen-Messung bestimmt. Der Widerstand R_{TLM} ist gegeben durch

$$R_{\text{TLM}} = 2 R_c + \frac{s \cdot R_{\text{sheet}}}{l_{\text{TLM}}} \quad (5.2)$$

mit l_{TLM} gleich der Länge des Kontaktfingers in der Messung. Aus der Auftragung über verschiedene Fingerabstände s lässt sich mithilfe der Achsenabschnitte über die Transferlänge L_T (siehe Kapitel 4.2) der spezifische Kontaktwiderstand bestimmen. Weitere Erläuterungen zu der TLM Messung sind in [109] zu finden.

Die Messung wird auf 10 mm schmalen Streifen ausgeführt, um zu gewährleisten, dass die unterschiedlichen Fingerlinienwiderstände keinen Einfluss auf die TLM Messung haben. Die gemessenen Werte der Kontaktwiderstände sind korrigiert durch klare Ausreißer, welche durch Fingerunterbrechungen bei geringen Silberpastenverbräuchen auftreten. Die PERC Solarzellen erzielen einen durchschnittlichen ρ_c von $1,27 \pm 0,24 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$ für Fingerpastenverbräuche über 60 mg. Dagegen steigt der spezifische Kontaktwiderstand für einen Fingerpastenverbrauch unter 60 mg stark an. Die experimentellen Daten der TLM Messung werden zusätzlich mit einer mathematischen Potenzfunktion gefittet. Die gefitteten Kurven für den Linien- und Kontaktwiderstand werden später für die Berechnung des gesamten Serienwiderstandes der PERC Solarzellen verwendet.

Die Abhängigkeit des spezifischen Kontaktwiderstandes ρ_c von der Pastenmenge und von der Fingerhöhe durch den Zusammenhang in Abbildung 5.12 ist unerwartet und wurde in der Literatur in dieser Art noch nicht gezeigt. Die einzige gefundene Publikation [80] zeigt ein geringfügiges Ansteigen des spezifischen Kontaktwiderstandes ρ_c von $2,3 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$ auf $3,5 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$ mit abnehmender Kontaktbreite von TLM Teststrukturen. Gleichzeitig wird anhand der Auswertung von REM Aufnahmen ein Abnehmen der Kristalldichte in der Siliziumoberfläche mit geringerer Kontakthöhe vermutet. Unter der Annahme, dass die Kontakthöhe mit der Kontaktbreite abnimmt, wird die Abnahme der Kristalldichte in der Siliziumoberfläche als Ursache für das Ansteigen des ρ_c herangeführt. Daraus wird der Zusammenhang gebildet, dass der spezifische Kontaktwiderstand ρ_c mit abnehmender Fingerhöhe ansteigt.

Eine Erklärung für das hier gezeigte Phänomen des ansteigenden spezifischen Kontaktwiderstandes mit abnehmender Pastenmenge und Fingerhöhe könnte sein, dass sich durch das geringere Pastenvolumen die optimale Feuertemperatur zu höheren oder niedrigeren Werten verschiebt; gefeuert wurden alle Solarzellen aber bei der gleichen und optimalen Temperatur für große Pastenmengen und Fingerhöhen. Ebenso ist denkbar, dass durch das geringe Pastenvolumen die Kontaktausbildung beeinflusst wird. Ein Szenario wäre, dass die Siliziumnitridschicht nicht vollständig geätzt wird oder nach dem Ätzen eine

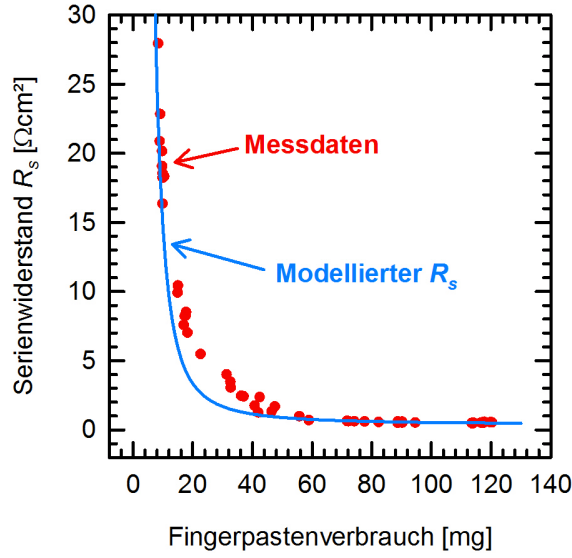


Abb. 5.15: Vergleich des aus IV Messungen erhaltenen Serienwiderstandes R_s mit einem modellierten Serienwiderstand, aufgetragen über den Silberpastenverbrauch der Finger. Es wird eine gute Übereinstimmung der experimentellen Daten mit den analytisch berechneten erzielt.

dickere Glasschicht zwischen den Silberkristallen ρ_c ansteigen lässt. Eine aussagekräftige quantitative Analyse z.B. durch REM Aufnahmen ist durch die mikroskopische Skala der Kontaktausbildung nur schwer möglich und wird daher in dieser Arbeit nicht weiter verfolgt.

Um die Abhängigkeit des gemessenen Serienwiderstandes R_s vom Fingerpastenverbrauch zu analysieren, wird der Serienwiderstand analytisch berechnet und mit den experimentellen Daten verglichen. Für diese Untersuchung wird die folgende Formel für die Modellierung des Serienwiderstandes verwendet:

$$R_s = R_{\text{finger}} + R_{\text{contact}} + R_{\text{emitter}} + R_{\text{base}} + R_{\text{rear}}. \quad (5.3)$$

Nach Kapitel 4.4 sind der Finger- und der Kontaktwiderstand der Vorderseite beschrieben durch

$$R_{\text{finger}} = \frac{1}{3} R_L \cdot l_f \cdot a \cdot s \quad (5.4)$$

und

$$R_{\text{contact}} = \frac{\sqrt{R_{\text{Sheet}} \cdot \rho_c}}{l_f} \coth \left(\frac{w_f}{2} \sqrt{\frac{R_{\text{Sheet}}}{\rho_c}} \right) \frac{a \cdot s}{2}. \quad (5.5)$$

Für die Summe der restlichen Serienwiderstandsbeiträge vom Emitter R_{emitter} , der Basis R_{base} und der Rückseite R_{rear} wird ein konstanter Wert von $0,32 \Omega\text{cm}^2$ angenommen, da diese Beiträge für alle PERC Zellen in diesem Versuch unverändert sind. Dies wird

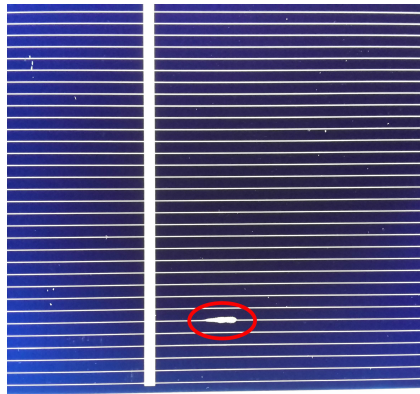


Abb. 5.16: Foto einer Solarzelle mit Dual Print. In Rot eingekreist eine Verbreiterung des Kontaktfingers, die beim Dual Print auftritt, wenn kleine Partikel auf dem Wafer liegen und diese während des Druckprozesses in eine Fingeröffnung geraten. Diese hauptsächlich kosmetischen Defekte sorgen in der industriellen Massenproduktion für einen Ausschuss der jeweiligen Solarzelle.

abgeschätzt, indem für PERC Solarzellen mit einem Fingerpastenverbrauch über 80 mg die Summe aus Fingerwiderstand R_{finger} und Kontaktwiderstand R_{contact} berechnet und vom gemessenen Serienwiderstand R_s abgezogen wird. Der Mittelwert von 6 Solarzellen ergibt einen Wert von $0,32 \Omega\text{cm}^2$ mit einer Standardabweichung von $0,02 \Omega\text{cm}^2$.

Für die Formeln 5.4 und 5.5 werden die gefitteten Kurven für den Fingerlinienwiderstand R_L und den spezifischen Kontaktwiderstand ρ_c aus Abbildung 5.14 verwendet, um den theoretischen Serienwiderstand R_s über den Fingerpastenverbrauch nach Gleichung 5.3 zu berechnen. Abbildung 5.15 zeigt den Serienwiderstand der PERC Solarzellen, der für Fingerpastenverbräuche der Vorderseite unter 60 mg deutlich ansteigt. Die blaue Linie stellt den modellierten R_s dar. Insgesamt wird eine gute Übereinstimmung der experimentellen Daten mit den analytisch berechneten erzielt, insbesondere für Fingerpastenverbräuche über 60 mg. Dahingegen übersteigen die experimentellen Daten des Serienwiderstands die berechneten Werte geringfügig für unter 60 mg Fingerpastenverbrauch. Die Übereinstimmung zwischen Experiment und Modell validiert die angewendeten Formeln zur Beschreibung des Serienwiderstandes R_s . Daraus lässt sich ableiten, dass die gemessenen Werte für den spezifischen Kontaktwiderstand sehr wahrscheinlich einen physikalischen Hintergrund haben und kein Messartefakt darstellen.

Mit den erzielten Ergebnissen für die Fingerhöhe (vgl. Abb. 5.12) und dem spezifischen Kontaktwiderstand (vgl. Abb. 5.14 b)) ist auch eine Lösung für das Problem der Widerstandsverluste beim Dual Print aus Abbildung 5.7 gezeigt worden. Die beobachteten Widerstandsverluste lassen sich demnach durch Verwendung anderer Polyurethanrakel verhindern, in dem entweder ein sehr hartes Rakelgummi verwendet wird, das für einen großen Pastenauftrag sorgt, bei dem Inhomogenitäten auf der Solarzelle kaum eine Rolle spielen, oder im besten Fall das Metallrakel benutzt wird, was wiederholbare und uneingeschränkt homogene Fingerhöhen über die Solarzelle erzielt.

Ein Problem des Dual Print mit Schablone sind im Moment noch die teilweise vorkom-

menden lokalen Verbreiterungen der Kontaktfinger, wie auf dem Foto in Abbildung 5.16 gezeigt. Diese Verbreiterungen treten auf, wenn kleine Partikel auf dem Wafer liegen und diese während des Druckprozesses in die Fingeröffnungen geraten. Diese Verbreiterungen beeinflussen die elektrischen Parameter der fertigen Solarzelle nicht negativ, sorgen aber für sogenannte kosmetische Defekte, die in der industriellen Massenproduktion zu einem Ausschuss der jeweiligen Zelle führen würden. Der hohe Ausschussanteil ist der hauptsächliche Grund, wieso der Dual Print mit Schablone heutzutage noch keinen Einzug in die Industrie erhalten hat, obwohl er vom Fingerprofil und den Möglichkeiten der Reduzierung des Silberpastenverbrauchs einer der erfolgversprechendsten Ansätze in der Forschung der Metallisierung ist. Ein Lösungsansatz wäre die Installation eines Reinigungsmechanismus mit Druckluft, mit dem die Partikel vor dem Transport in den Siebdrucker von der Vorderseite der Wafer heruntergeblasen werden.

5.4 Vergleich der Drucktechniken

In diesem Abschnitt werden die drei vorgestellten Drucktechniken zur Metallisierung der Solarzellenvorderseite auf Basis einer Analyse der Fingerprofile und des Wirkungsgrads von Al-BSF Solarzellen in Verbindung mit dem Silberpastenverbrauch direkt miteinander verglichen.

5.4.1 Verwendete Siebe und Schablonen

Die Parameter der verwendeten Siebe und Schablonen in diesem Experiment sind in Tabelle 5.3 aufgelistet. Für den Single Print (SP) und Print-on-Print (PoP) werden Teile der gezeigten Ergebnisse aus Kapitel 5.1 und 5.2 für diesen Vergleich der Drucktechniken

Tab. 5.3: Auflistung der Sieb- und Schablonenparameter für den Vergleich der Drucktechniken Single Print, Print-on-Print und Dual Print. Beim Print-on-Print ist als Fingeröffnungsbreite erster/zweiter Druck angegeben. Beim Dual Print ist nur die Schablone für die Kontaktfinger aufgeführt.

Drucktechnik	Fingeröffnungsbreite [μm]	Maschenanzahl	Drahtdurchmesser d_d [μm]	Fingeranzahl
Single Print	30	380	14	118
Single Print	40	380	14	94
Single Print	70	300	20	74
Print-on-Print	30/40	380	14	90
Print-on-Print	40/50	350	16	81
Print-on-Print	50/60	400	18	76
Dual Print	30	-	-	107
Dual Print	40	-	-	91

verwendet. Die Fingeröffnungsbreite beim SP variiert zwischen 30 μm und 70 μm . Für den PoP werden die Siebkombinationen 30/40 μm (erster/zweiter Druck), 40/50 μm und 50/60 μm Sieböffnung für den Vergleich verwendet. Beim Dual Print (DP) hat das Busbarsieb eine Maschenanzahl von 400 und eine Emulsionsdicke d_{em} über dem Gewebe von 10 μm . Die Dicke der verwendeten Schablonen entspricht der jeweils vorliegenden Fingeröffnungsbreite. Es wird für alle drei Druckanwendungen das gleiche Polyurethanraket mit Shore Härte 75A sowie die gleichen Pasten für den Fingerdruck verwendet und keine speziellen Silberpasten z.B. für den Schablonendruck. Nur für den Druck der Busbars wird eine nicht-durchfeuernde Silberpaste benutzt.

5.4.2 Analyse der Fingergeometrien

Für die direkte Gegenüberstellung von Single Print (SP), Print-on-Print (PoP) und Dual Print (DP) werden die Fingereigenschaften der Solarzellen mit einer Fingeröffnung von 40 μm in Sieb und Schablone verglichen und analysiert.

Dazu sind in Abbildung 5.17 typische Fingerprofile aus diesem Versuch für Single Print, Print-on-Print und Dual Print dargestellt, die mit einem optischen Profilometer gemessen wurden. Für die Bestimmung der Fingerhöhen wurde exemplarisch ein Kontaktfinger in der Mitte der Solarzelle über eine Länge von 0,9 mm gemessen und ausgewertet unter der Annahme, dass eine homogene Verteilung der Fingerprofile über die Solarzelle vorliegt.

Die kleinste Fingerhöhe von 4,4 μm wird beim SP gemessen. Zu erkennen in Abbildung 5.17 sind die einzelnen Erhebungen beim SP, an denen kein Maschendrahtgewebe den Druckprozess behindert hat. Dieser sich wiederholende Verlauf von Erhebungen und Einschnürungen der Fingerhöhe ist typisch für den einfachen Druck mit einem Sieb. Der PoP erreicht sehr hohe Finger mit bis zu 20,1 μm , die aber tiefe Einschnürungen entlang

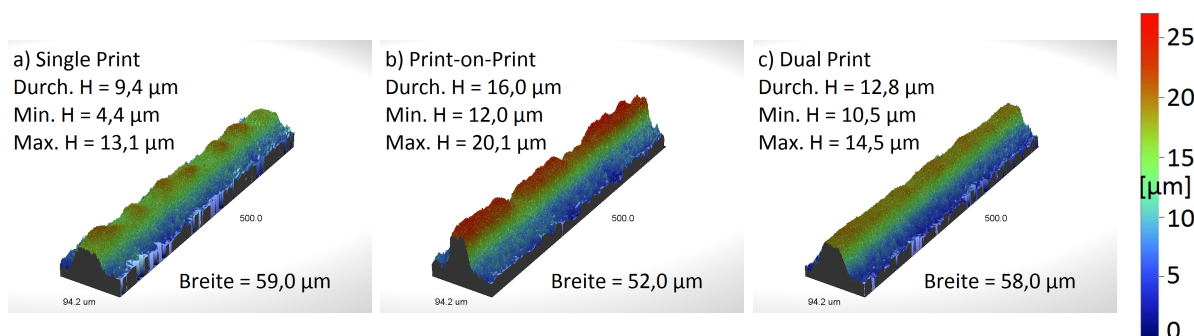


Abb. 5.17: Vergleich der gedruckten Fingerprofile bei 40 μm Fingeröffnung mittels a) Single Print (SP), b) Print-on-Print (PoP) und c) Dual Print (DP). Der SP zeigt einen sich wiederholenden Verlauf von Erhebungen und Einschnürungen der Fingerhöhe, hervorgerufen durch das Maschendrahtgewebe im Sieb. Noch größere Differenzen zwischen kleinster und größter Fingerhöhe sind beim PoP zu beobachten, wobei insgesamt größere Fingerhöhen erzielt werden. Der DP besitzt die beste Homogenität des Höhenprofils entlang des Fingers beim Vergleich der drei Drucktechniken.

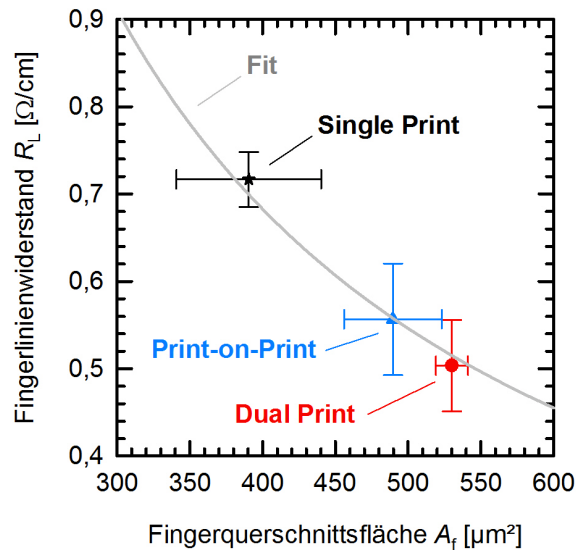


Abb. 5.18: Fingerlinienwiderstand R_L aufgetragen über die Fingerquerschnittsfläche A_f für verschiedene Siebdrucktechniken [110]. Die Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung der Querschnittsfläche an verschiedenen Stellen des Fingers und des Linienwiderstands für Messungen an verschiedenen Silberfingern. Die graue Linie stellt einen Fit durch die Datenpunkte über den physikalischen Zusammenhang $R_L = \rho_f / A_f$ dar.

des Fingers an den Stellen enthalten, bei denen in beiden Druckschritten Maschendrahtgewebe den Pastenauftrag behindert hat. Beim DP wird eine kleinere durchschnittliche Fingerhöhe von $12,8 \mu\text{m}$ im Vergleich zum PoP mit $16,0 \mu\text{m}$ gemessen, dagegen besitzt der Dual Print eine bessere Homogenität des Höhenprofils entlang des Fingers. Dies wird deutlich durch die Differenz zwischen der kleinsten und größten Fingerhöhe, die mit $4 \mu\text{m}$ beim DP am geringsten ist, während beim SP und PoP die Unterschiede über $8 \mu\text{m}$ betragen. Die Fingerbreite beträgt $59 \mu\text{m}$ für SP, $52 \mu\text{m}$ für PoP und $58 \mu\text{m}$ für DP.

Aus den Messungen der Fingerprofile wird zusätzlich die Querschnittsfläche A_f berechnet, indem die Fläche unter dem Fingerprofil bestimmt wird. Dies wird an drei verschiedenen Punkten der Finger durchgeführt: bei kleiner, mittlerer und großer Fingerhöhe. Dadurch ergeben sich durchschnittliche Fingerquerschnittsflächen von $390 \pm 50 \mu\text{m}^2$ für den Single Print, $490 \pm 34 \mu\text{m}^2$ für den Print-on-Print und $530 \pm 11 \mu\text{m}^2$ für den Dual Print. Um die geometrischen Daten der Fingerprofile mit den elektrischen Eigenschaften zu vergleichen, wird zusätzlich der Fingerlinienwiderstand R_L auf den finalen Solarzellen für die drei verschiedenen Drucktechniken gemessen. Dazu werden 2 cm breite Streifen aus den Solarzellen geschnitten und der Spannungsabfall bei einem Strom von 1 A entlang des Fingers an sechs unterschiedlichen Stellen gemessen.

Die Ergebnisse der Fingerlinienwiderstandsmessung sind in Abbildung 5.18 gezeigt. Die Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung der Querschnittsfläche an verschiedenen Stellen des Fingers und des Linienwiderstands für Messungen an verschiedenen Silberfingern. Für den Dual Print wird der kleinste Linienwiderstand mit $0,50 \pm 0,05 \Omega/\text{cm}$

gemessen, der mit der größten Querschnittsfläche korreliert. Für Print-on-Print und Single Print werden größere Linienwiderstände gemessen. Die experimentellen Daten aus Abb. 5.18 werden mit der Gleichung $R_L = \rho_f / A_f$ gefittet über den physikalischen Zusammenhang des Linienwiderstandes R_L zum spezifischen Widerstand des Fingers ρ_f durch die Fingerquerschnittsfläche A_f , was einen Wert von $2,74 \pm 0,05 \mu\Omega\text{cm}$ für ρ_f ergibt. Dies stimmt mit Literaturwerten [93, 100, 105–107] überein und ist vergleichbar mit dem in Kapitel 5.3.3 ermittelten Wert.

5.4.3 Ergebnisse Solarzellen

Zusätzlich werden die drei Drucktechniken auf Basis von Zellparametern von Silizium Solarzellen mit ganzflächigem Al-BSF in Abhängigkeit vom Silberpastenverbrauch für verschiedene Fingeröffnungsbreiten verglichen. Der Wirkungsgrad der besten Solarzellen, genauso wie der zugehörige Füllfaktor FF , die Kurzschlussstromdichte J_{sc} und die Leerlaufspannung V_{oc} , ist über den Silberpastenverbrauch in Abbildung 5.19 aufgetragen für den Single Print, den Print-on-Print und den Dual Print.

Der Single Print erreicht Wirkungsgrade bis 18,5% für einen Pastenverbrauch von 90 mg. Der PoP erzielt Wirkungsgrade bis zu 18,8% für einen Silberpastenverbrauch von 182 mg bei Anwendung der Siebkombination von 50 μm für den ersten Druck und 60 μm für den zweiten Druck. Der DP kombiniert den höchsten Wirkungsgrad von 19,1% mit dem geringsten Silberpastenverbrauch von 75 mg bei Anwendung einer Schablone mit 30 μm Fingeröffnung. Der Silberpastenverbrauch unterteilt sich dabei in 41 mg für die Finger und 34 mg für die Busbars. Der verbesserte Wirkungsgrad ist auf die J_{sc} von $37,6 \text{ mA/cm}^2$ und V_{oc} von 642 mV zurückzuführen. Der erhöhte Strom wird durch die geringere Abschattung mit der 30 μm Fingeröffnung verursacht. Der Gewinn in der Leerlaufspannung lässt sich zum Teil durch die Verwendung der nicht-durchfeuernden Busbarpaste erklären, trotzdem liegt hier wohl ein positiver Ausreißer nach oben vor. Alle anderen Datenpunkte erzielen eine ähnliche V_{oc} zwischen 635,4 mV und 637,4 mV. Bei der Kurzschlussstromdichte treten innerhalb der Drucktechniken kaum Unterschiede auf. Die ansteigende J_{sc} korreliert beim DP mit dem abnehmenden Füllfaktor.

Vergleicht man die Füllfaktoren der drei Drucktechniken für eine Fingeröffnung von 40 μm , erzielt der Dual Print auch hier das beste Ergebnis. Für den Dual Print mit 40 μm Fingeröffnung in der Schablone wird ein FF von 80,0% bei einem Silberpastenverbrauch von 96,1 mg gemessen. Dieser liegt damit 0,9%_{abs} höher als für den Single Print mit 90,2 mg Silberpastenverbrauch und 1,2%_{abs} höher als für den Print-on-Print mit 100,2 mg. Dieser Gewinn im FF passt qualitativ zur Untersuchung des Fingerlinienwiderstandes aus Abb. 5.18, bei der der Dual Print die besten Ergebnisse zeigt. Dagegen wird der Vorteil des geringeren Linienwiderstandes vom PoP gegenüber dem SP im Füllfaktor nicht sichtbar. Da die Solarzellen mit SP und PoP und 40 μm Fingeröffnung nicht in der gleichen Charge prozessiert wurden, kann ein erhöhter Emitterschichtwiderstand oder spezifischer Kontaktwiderstand das Ergebnis mit Print-on-Print negativ beeinflussen.

Ein weiterer Vergleich von Print-on-Print und Dual Print mit erhöhter Statistik ist in Abbildung 5.20 dargestellt. Auf Basis von PERC Solarzellen wird der Einfluss der verwen-

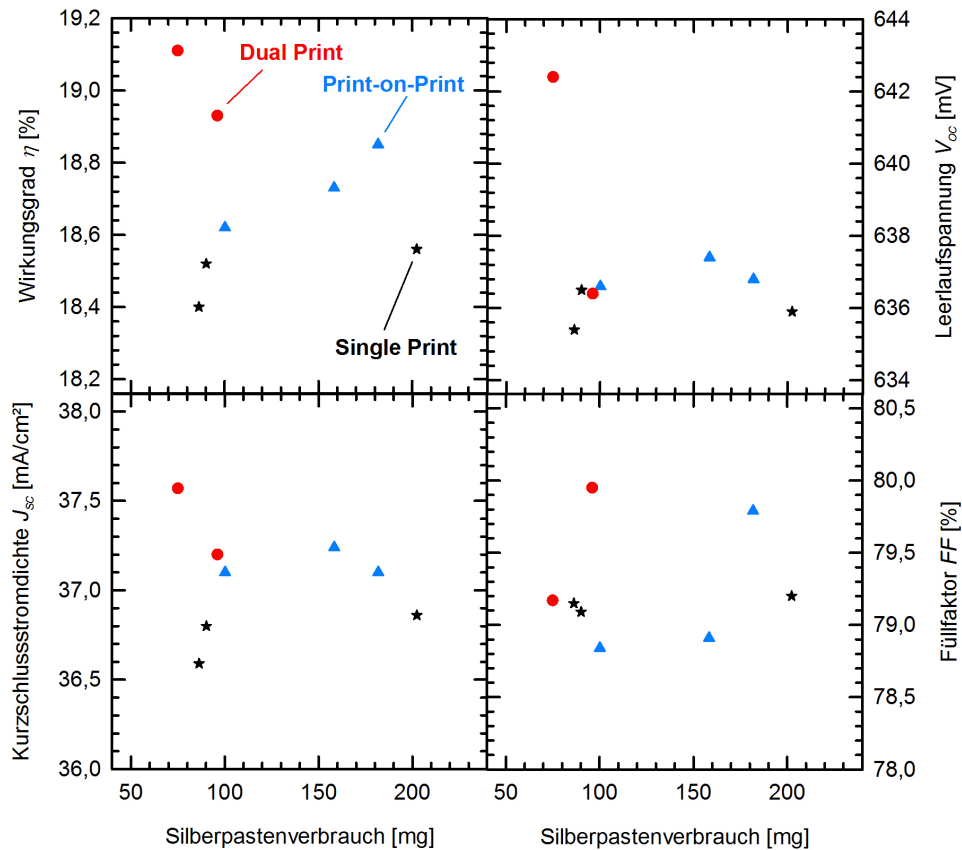


Abb. 5.19: Gemessener Wirkungsgrad η , Leerlaufspannung V_{oc} , Kurzschlussstromdichte J_{sc} und Füllfaktor FF von Solarzellen mit ganzflächigem Al-BSF aufgetragen über den Silberpastenverbrauch der Vorderseite für verschiedene Drucktechniken. Der Dual Print Prozess erzielt die besten Wirkungsgrade in Kombination mit einem geringen Silberpastenverbrauch.

den Silberpaste für die Kontaktfinger untersucht. Der PoP wird mit einer Sieböffnung von $40\ \mu\text{m}$ für den ersten Druck und $50\ \mu\text{m}$ für den zweiten Druck auf die Solarzellen angewendet. Die dabei für beide Druckprozesse verwendete Paste A ist die neueste Pastengeneration eines großen Herstellers und auf den Siebdruckprozess optimiert. Für den DP mit einer $40\ \mu\text{m}$ Öffnung in der Schablone werden zwei verschiedene Pasten getestet. Zum einen ebenfalls Paste A und zusätzlich die speziell für den Schablonendruck konzipierte Paste B mit erhöhter Viskosität. Für den Busbardruck beim DP wird jeweils eine zu den Fingerpasten passende nicht-durchfeuernde Paste verwendet. Beim direkten Vergleich der beiden Drucktechniken mit den gleichen Pasten erzielt der Dual Print einen Wirkungsgradvorteil von durchschnittlich $0,12\%_{\text{abs}}$. Dieser hat seine Ursache in der verbesserten V_{oc} um $2\ \text{mV}$ und J_{sc} um $0,2\ \text{mA}/\text{cm}^2$ für den DP. Durch den Einsatz der Paste B mit einer erhöhten Viskosität kann der Wirkungsgrad mit Dual Print im Durchschnitt auf $20,58 \pm 0,05\%$ erhöht werden, durch einen geringfügigen Gewinn im Füllfaktor von $0,2\%_{\text{abs}}$ und eine weitere Steigerung in V_{oc} um $1\ \text{mV}$.

Auf Basis der gezeigten Vergleiche der Fingerprofile, Fingerlinienwiderstände und IV Pa-

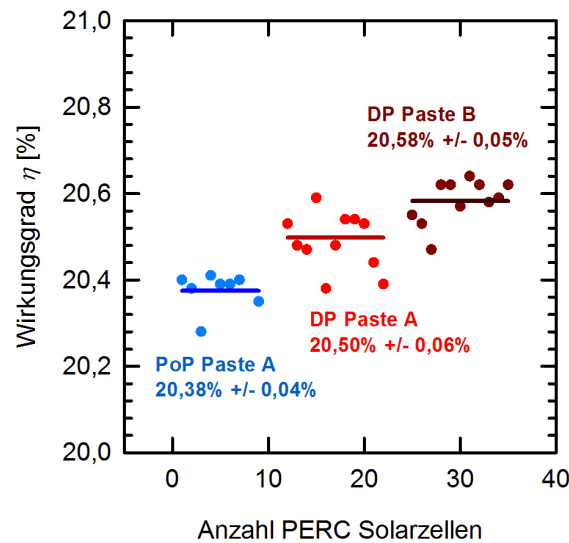


Abb. 5.20: Wirkungsgradvergleich von PERC Solarzellen mit Print-on-Print und Dual Print. Die verwendete Paste A ist eine normale Silbersiebdruckpaste, die Paste B eine Silberpaste speziell auf den Schablonendruck zugeschnitten. Beim Vergleich von PoP und DP mit Paste A erzielt der Dual Print einen höheren Wirkungsgrad durch Verbesserungen in V_{oc} um 2 mV und J_{sc} um $0,2 \text{ mA/cm}^2$. Durch den Einsatz der Paste B mit einer erhöhten Viskosität kann der Wirkungsgrad mit Dual Print nochmals verbessert werden.

parameter für die drei Drucktechniken Single Print, Print-on-Print und Dual Print, lässt sich feststellen, dass der Dual Print hinsichtlich aller Untersuchungen die besten Ergebnisse zeigt. Insbesondere die Möglichkeit, den Busbar- und den Fingerdruck unabhängig voneinander zu optimieren, lässt viele Freiheitsgrade offen und sorgt neben dem hohen Wirkungsgrad auch für den Vorteil, den Silberpastenverbrauch senken zu können.

5.4.4 Simulation der Rauigkeit der Fingerhöhe

Wie in den vorigen Abschnitten gezeigt, können mit dem beim Dual Print verwendeten Metallrakel homogene Fingerhöhen bis zu $25 \mu\text{m}$ erreicht werden. Dies ist für den Füllfaktor förderlich, erzeugt aber einen hohen Silberpastenverbrauch für die Finger von über 100 mg bei einer Fingeröffnung von $40 \mu\text{m}$. Verwendet man dagegen Polyurethanrakel, verringert sich je nach Härtegrad die Fingerhöhe und die Verteilung der Fingerhöhe über die Solarzelle wird inhomogen, wie in Abschnitt 5.3 gezeigt. Andere Drucktechniken wie Single Print und Print-on-Print haben zwar eine gleichmäßige Verteilung des Fingerprofils über die Solarzelle, dafür größere Variationen der Fingerhöhe entlang eines Fingers.

Um den Einfluss der verschiedenen Fingerprofile und insbesondere der Fingerhöhe bzw. Querschnittsfläche auf den Serienwiderstand und damit den Wirkungsgrad quantitativ zu erfassen, werden PERC Solarzellen mit Variationen der Fingerhöhe numerisch simuliert. Zuerst wird mit der Software Sentaurus Device [111, 112] die IV Kurve einer Einheitszelle simuliert. Danach wird mithilfe einer SPICE (*engl.* Simulation Program with

Integrated Circuit Emphasis) [113, 114] Netzwerksimulation die IV Kurve der gesamten PERC Solarzelle mit Metallisierung simuliert, indem die Einheitszelle vielfach erzeugt und mit Widerständen, welche Segmente der Vorderseitenmetallfinger und Busbars repräsentieren, verbunden wird. Die Einheitszelle entspricht der in Abbildung 4.2 gezeigten Darstellung.

Die Sentauros Einheitszelle für die folgenden Untersuchungen wird auf Basis einer in dieser Arbeit entstandenen 5 Busbar PERC Solarzelle mit einem unabhängig bestätigten Wirkungsgrad von 21,2% [37] simuliert. Aus Tabelle 5.4 erkennt man die Übereinstimmung der experimentellen mit den simulierten IV Parametern und kann daher von einem realistischen Parametersatz ausgehen. Die dazugehörigen Inputparameter der Sentauros Simulation sind in Tabelle 5.5 aufgeführt. Eine ausführlichere Erklärung und Bestimmung der einzelnen Beiträge kann der Veröffentlichung von *Kranz et al.* [45] entnommen werden.

Abbildung 5.21 zeigt schematisch den Aufbau der Widerstandselemente der SPICE Simulation. Der Gesamtwiderstand jedes Kontaktfingers wird auf der Länge l_f des halben Abstandes zwischen zwei Busbars in 40 einzelne Widerstände zerlegt, denen beliebige Werte zugewiesen werden können. Für die Bestimmung der Widerstandselemente wird das Profil der Silberkontaktfinger trapezförmig angenommen (siehe Zeichnung rechts in Abbildung 5.21) mit einer unteren Fingerbreite $w_{f,unten}$ von $50 \mu\text{m}$ und einer oberen Fingerbreite $w_{f,oben}$ von $30 \mu\text{m}$, was in etwa dem gedruckten Fingerprofil des Dual Prints mit $40 \mu\text{m}$ Fingeröffnung und spezieller Silberpaste mit erhöhter Viskosität entspricht. Als variable Größe bleibt die Fingerhöhe h_f . Zusätzlich zu den Fingern werden auch die Busbars mit einer Gesamtbreite von $3,9 \text{ mm}$ auf der Solarzelle simuliert. Die Gesamtbreite der Busbars teilt sich für 3 Busbars auf zu je $1,3 \text{ mm}$. Die Kontaktierung der Busbars wird über 10 Messköpfe pro Busbar im SPICE Modell erzeugt. Für die Busbars wird ein rechteckiges Profil im Querschnitt angenommen mit einer Höhe von $10 \mu\text{m}$. Alle

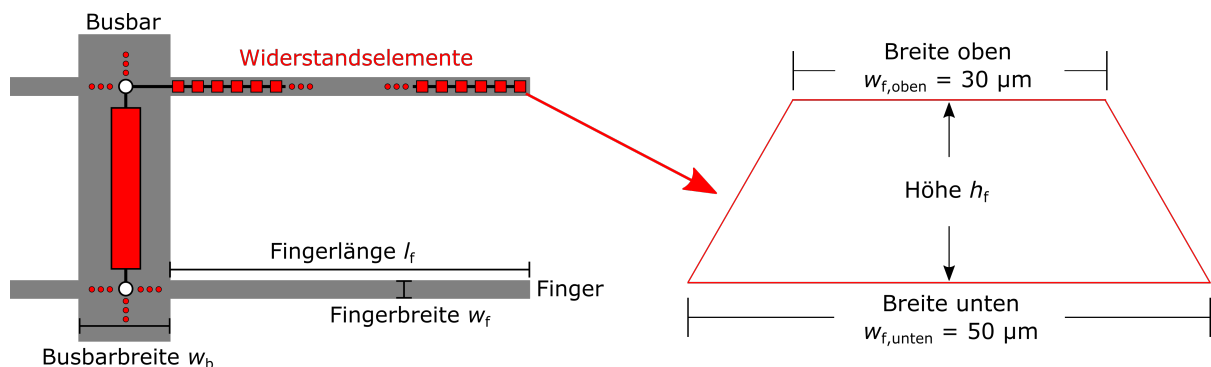


Abb. 5.21: Schematische Darstellung des Aufbaus der Widerstandselemente der SPICE Simulation. Der Gesamtwiderstand jedes Kontaktfingers wird auf der Länge l_f in 40 einzelne Widerstände zerlegt. Diesen Elementen werden Widerstände zugewiesen, die sich durch das verwendete Fingerprofil (rechte Zeichnung im Querschnitt) berechnen. Feste Werte werden für die obere Fingerbreite $w_{f,oben}$ und für die untere Fingerbreite $w_{f,unten}$ angenommen. Der Fingerhöhe h_f werden verschiedene Werte je nach Simulation zugewiesen.

Tab. 5.4: IV Parameter einer gemessenen und einer numerisch simulierten 5 Busbar PERC Solarzelle.

	η [%]	J_{sc} [mA/cm ²]	V_{oc} [mV]	FF [%]
Experimentelle Daten	21,22*	39,8	662,1	80,6
Numerische Simulation	21,27	39,7	661,5	80,9

*unabhängig bestätigt vom Fraunhofer ISE CalLab.

Tab. 5.5: Inputparameter der Sentauros Simulation, basierend auf der Simulation der 5 Busbar PERC Solarzelle aus Tabelle 5.4. Die aufgeführten Werten wurden zum Teil aus Messungen extrahiert bzw. an gemessene Daten angepasst und teilweise aus der Literatur entnommen. SRV = Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeit (*engl.* Surface Recombination Velocity)

Inputparameter	Wert
Spez. Kontaktwiderstand Vorderseite	$\rho_c = 1,5 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$
Emitterschichtwiderstand	$R_{sheet} = 70 \text{ }\Omega/\text{sq}$ [37]
Basiswiderstand	$\rho_b = 2 \text{ }\Omega\text{cm}$ [115]
Spez. Kontaktwiderstand Rückseite	$\rho_{rc} = 5 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$ [116]
Vorderseitenreflexion	Raytracing Pyramiden mit SiN _x [117]
Vorderseitenabschattung	5,5%
Rückseitenreflexion	Raytracing SiN _x /Al Schicht [117]
SRV Ag Kontakte	$S_{front,met} = 2 \times 10^7 \text{ cm/s}$ [118]
Phosphoremitter	Gemessenes ECV Profil
SRV SiN _x Passivierung	$S_{front,pass} = 36000 \text{ cm/s}$
Siliziumbasis	Shockley-Read-Hall Modell
SRV Al Kontakte	$S_{rear,met} = 300 \text{ cm/s}$ [35]
Al-BSF	Gemessenes SIMS Profil
SRV AlO _x /SiN _y	$S_{rear,pass} = 10 \text{ cm/s}$ [35]

Tab. 5.6: Konstante Inputparameter der SPICE Simulation.

Inputparameter	Wert
Fingeranzahl	90
Fingerbreite unten	$w_{f,unten} = 50 \text{ }\mu\text{m}$
Fingerbreite oben	$w_{f,oben} = 30 \text{ }\mu\text{m}$
Spezifischer Widerstand Metallisierung Finger	$\rho_f = 3 \text{ }\mu\Omega\text{cm}$
Gesamtbreite Busbars	$w_{bb,sum} = 3,9 \text{ mm}$
Höhe Busbars	$h_{bb} = 10 \text{ }\mu\text{m}$
Spezifischer Widerstand Metallisierung Busbar	$\rho_{bb} = 3 \text{ }\mu\Omega\text{cm}$

konstanten Werte der SPICE Simulation sind in Tabelle 5.6 zusammengefasst.

Im Folgenden werden durch die SPICE Simulationen zwei Einflussmechanismen der Kontaktfinger auf den Wirkungsgrad einer PERC Solarzelle untersucht: die Rauigkeit entlang der Kontaktfinger und der Silberpastenverbrauch.

Einfluss der Rauigkeit auf den Wirkungsgrad

Die Rauigkeit ξ ist hier definiert als die Differenz der größten Fingerhöhe $h_{f,\max}$ und der kleinsten Fingerhöhe $h_{f,\min}$ eines simulierten Kontaktfingers:

$$\xi = h_{f,\max} - h_{f,\min}. \quad (5.6)$$

Da bei einem realistischen Verlauf die Fingerhöhe nicht nur aus einem Kastenprofil mit zwei Extremwerten mit mehreren Mikrometer Unterschied besteht, werden neben den Widerstandswerten für die maximale und minimale Fingerhöhe zusätzliche Elemente in die Simulation eingebaut, die Fingerhöhen zwischen den beiden Extremwerten darstellen. Die Berechnung der einzelnen Fingerhöhen h_f erfolgt über die Formel

$$h_f(E_x) = h_{f,\max} - (h_{f,\max} - h_{f,\min}) \cdot \left(\frac{E_x}{E + 1} \right) \quad (5.7)$$

mit dem Element E_x . Die Anzahl E der zusätzlichen Elemente ist beliebig, wird an dieser Stelle aber für alle Simulationen auf 15 festgelegt. E_x nimmt daher ganze Werte zwischen 0 (bei der größten Fingerhöhe) und 16 (bei der kleinsten Fingerhöhe) an.

Anschaulich dargestellt ist die Vorgehensweise für die Berechnung der Rauigkeit ξ und der einzelnen Fingerhöhen in Abbildung 5.22. In diesem Beispiel beträgt die maximale Fingerhöhe 20 μm und die minimale Fingerhöhe 5 μm . Daraus resultiert nach Gleichung 5.6 eine Rauigkeit ξ von 15 μm . Die Zwischenstufe bei z.B. Element $E_x = 1$ berechnet sich dann zu:

$$h_f = 20 \mu\text{m} - (20 \mu\text{m} - 5 \mu\text{m}) \cdot \left(\frac{1}{16} \right) = 19,06 \mu\text{m}. \quad (5.8)$$

Die mit den Fingerhöhen berechneten Widerstandswerte werden zufällig und annähernd zu gleichen Teilen auf die einzelnen Widerstandselemente in der SPICE Simulation verteilt. Dies geschieht durch die Generierung einer Zufallszahl im Microsoft Office Programm EXCEL über den Befehl *ZUFALLSZAHL()* in Kombination mit der Angabe der Häufigkeit jedes Widerstandswertes, die gleichverteilt ist. Bei 90 Fingern und jeweils 40 Widerstandselementen auf der simulierten Fingerlänge l_f entspricht dies 3600 Widerständen. Bei 17 verschiedenen Fingerhöhen tritt jede Fingerhöhe, bzw. der mit der Fingerhöhe berechnete Widerstand, durchschnittlich ca. 212 mal in der Simulation auf. Die Standardabweichung für die Häufigkeit jedes Widerstandswertes von dem Durchschnittswert 212 beträgt bei der Generation von 100 Zufallszahlen durchschnittlich 14. Für die Untersuchung der Rauigkeit ξ wird die maximale Fingerhöhe $h_{f,\max}$ zwischen 25 μm und 5 μm variiert. Für jedes dieser Maxima werden die minimalen Fingerhöhen $h_{f,\min}$ variiert in 1 μm Schritten vom maximalen Wert bis zu minimal 1 μm . Fingerhöhen

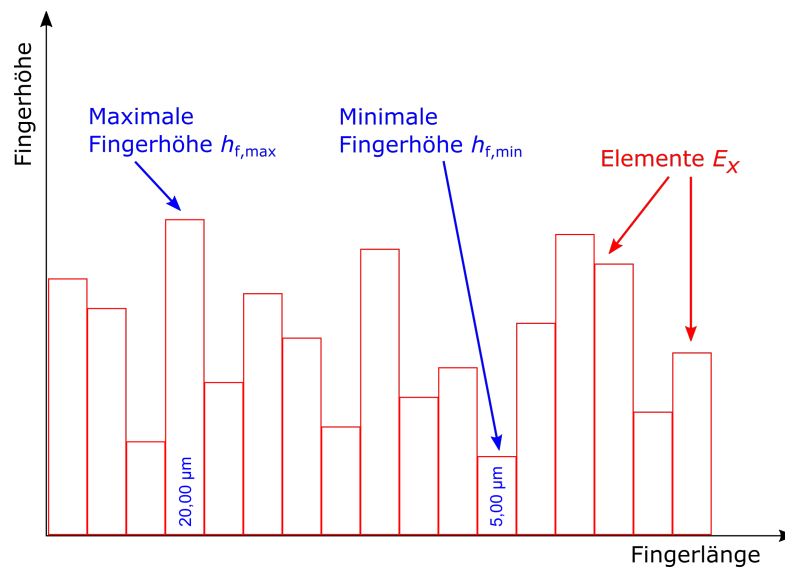


Abb. 5.22: Aufbau der einzelnen Fingerhöhen für die SPICE Simulation der Rauigkeit am Beispiel der maximalen Fingerhöhe $20\ \mu\text{m}$ und der minimalen Fingerhöhe $5\ \mu\text{m}$. Da bei einem Siebdruckfinger die Fingerhöhe nicht nur aus zwei Extremwerten besteht, werden neben den Widerstandswerten für die maximale und minimale Fingerhöhe zusätzlich 15 Elemente in die Simulation eingebaut, die die Fingerhöhen zwischen den beiden Extremwerten darstellen. Diese werden in der Simulation zu gleichen Teilen zufällig über alle Widerstandselemente der SPICE Simulation verteilt.

kleiner $1\ \mu\text{m}$ werden in der SPICE Simulation nicht angenommen. Die Abbildung 5.23 stellt das Ergebnis der numerischen Simulation von PERC Solarzellen mit 3 Busbars und unterschiedlichen Rauigkeiten der Fingerhöhe graphisch dar.

Der höchste Wirkungsgrad von $20,86\%$ wird bei einer Fingerhöhe $h_{f,\text{max}}$ von $25\ \mu\text{m}$ mit einer Rauigkeit ξ von $0\ \mu\text{m}$ simuliert. Betrachtet man die Ergebnisse für $\xi = 0$, zeigt sich allein der Einfluss der Fingerhöhe auf den Wirkungsgrad. Bei $h_{f,\text{max}} = 15\ \mu\text{m}$ fällt der Wirkungsgrad im Vergleich zu $h_{f,\text{max}} = 25\ \mu\text{m}$ um $0,1\%_{\text{abs}}$ auf $20,75\%$ ab. Bei weiteren $10\ \mu\text{m}$ weniger maximale Fingerhöhe ($h_{f,\text{max}} = 5\ \mu\text{m}$) und Rauigkeit von Null wird ein Wirkungsgrad von nur noch $20,2\%$ simuliert.

Als weiteres Ergebnis zeigt Abbildung 5.23, dass der Einfluss der Rauigkeit mit kleinerem $h_{f,\text{max}}$ zunimmt. Für $h_{f,\text{max}} = 25\ \mu\text{m}$ erzielt der simulierte Wirkungsgrad bei einer Rauigkeit von $24\ \mu\text{m}$ einen Wert von $20,3\%$, was ungefähr dem Wert von $h_{f,\text{max}} = 6\ \mu\text{m}$ und $\xi = 0\ \mu\text{m}$ entspricht. Für $h_{f,\text{max}} > 15\ \mu\text{m}$ tritt ein Wirkungsgradverlust von $0,1\%_{\text{abs}}$ erst bei $\xi > 7\ \mu\text{m}$ auf. Dagegen wird dieser Verlust für $h_{f,\text{max}} = 10\ \mu\text{m}$ bei $\xi = 3\ \mu\text{m}$ erreicht, für $h_{f,\text{max}} = 7\ \mu\text{m}$ schon bei $\xi = 2\ \mu\text{m}$. Bei $h_{f,\text{max}} \leq 6\ \mu\text{m}$ sorgt jeder Mikrometer mehr an Rauigkeit für eine Reduzierung des Wirkungsgrades um $\geq 0,6\%_{\text{abs}}$. Das Simulationsergebnis induziert, dass für ein 3 Busbar Layout maximale Fingerhöhen $h_{f,\text{max}} \geq 15\ \mu\text{m}$ für die Kontaktfinger wichtig sind und die Rauigkeit ξ nicht mehr als $5\ \mu\text{m}$ betragen sollte, um den Wirkungsgradverlust einzugrenzen.

Zusätzlich zu den berechneten Fingerhöhen nach Gleichung 5.7 werden die besten ge-

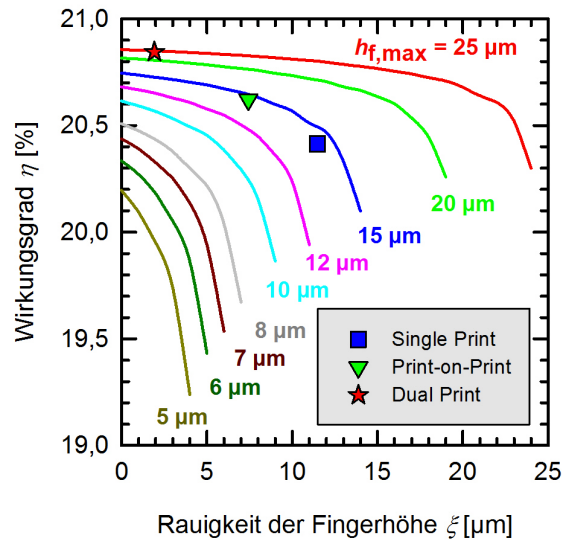


Abb. 5.23: Numerische Simulation des Wirkungsgrades von PERC Solarzellen in Abhängigkeit von der Rauigkeit der Fingerhöhe mit 3 Busbars. $h_{f,max}$ bezeichnet die maximale Fingerhöhe für die jeweilige Simulationskurve. Die extra Datenpunkte zeigen die Simulationsergebnisse mit gemessenen Fingerprofilen der drei Drucktechniken.

messenen Fingerprofile der drei Drucktechniken Single Print, Print-on-Print und Dual Print mit $40 \mu\text{m}$ Fingeröffnung in das SPICE Modell integriert und der Wirkungsgrad simuliert. Diese Profile erzielen eine Fingerbreite von ca. $50 \mu\text{m}$, was der Annahme für $w_{f,unten}$ für die simulierten Fingerhöhen entspricht. Die Widerstandswerte berechnen sich aus den gemessenen Querschnittsflächen der Fingerprofile. Die Häufigkeit der jeweiligen Fingerhöhe bzw. des Widerstandswertes in der Simulation entspricht dem Verlauf der gemessenen Profile.

Die Fingerhöhe $h_{f,max}$ beträgt beim Single Print $16,79 \mu\text{m}$, beim Print-on-Print $18,22 \mu\text{m}$ und beim Dual Print $28,44 \mu\text{m}$. Die Ergebnisse dazu sind in der Graphik 5.23 als extra Datenpunkte implementiert. Die Datenpunkte liegen für die jeweilige Rauigkeit hinsichtlich der Fingerhöhe $h_{f,max}$ geringfügig unter den simulierten Verläufen der Fingerhöhe. Der Grund dafür sind die Unterschiede in der Fingerbreite zwischen den simulierten und den gedruckten Silberfingern. Während für die simulierten Fingerprofile eine konstante Fingerbreite $w_{f,unten}$ und $w_{f,oben}$ angenommen wird, gilt dies für reale Silberfinger nur näherungsweise. Zudem ist $w_{f,oben}$ für SP und PoP kleiner als beim DP, der als Vorlage für die verwendeten $30 \mu\text{m}$ genommen wurde. Diese geringen Unterschiede für den Dual Print zeigen, dass die angenommene Gleichverteilung der berechneten Fingerhöhen h_f nach Gleichung 5.8 zum realen Verlauf der Fingerhöhe entlang eines gedruckten Silberkontaktfingers passt.

Für 3 Busbars ist der Unterschied insbesondere zwischen dem Dual Print und dem Single Print mit einem simulierten Wirkungsgrad von $20,84\%$ zu $20,41\%$ groß. Der Print-on-Print erzielt dort $20,62\%$. Die Differenz von $0,22\%_{abs}$ im Wirkungsgrad zwischen DP und PoP stimmt mit den experimentell gezeigten $0,2\%_{abs}$ aus Abbildung 5.20 überein.

Einfluss des Silberpastenverbrauchs auf den Wirkungsgrad

Als weiterer Aspekt der Simulationen kann neben der Rauigkeit der Fingerhöhe auch der entsprechende Silberpastenverbrauch der Kontaktfinger durch die simulierten Fingerprofile betrachtet werden, was experimentell schon in Kapitel 5.3 näher untersucht wurde. Für die Berechnung des Silberpastenverbrauchs wird das Volumen jedes simulierten Widerstandselements mit der Dichte der Silberpaste multipliziert und anschließend in Verbindung mit der Häufigkeit aufsummiert. Aus dem Vergleich der Messung von experimentellen Fingerprofilen und des gemessenen Silberpastenverbrauchs von einzelnen hergestellten Solarzellen wird die Dichte der Silberpaste zu 8 g/cm^3 extrahiert.

Die simulierten Wirkungsgrade mit den verschiedenen Rauigkeiten aus Abbildung 5.23 können somit auch über den Silberpastenverbrauch der Kontaktfinger aufgetragen werden, wie in Abbildung 5.24 dargestellt. Die Rauigkeit kann der Graphik nicht mehr entnommen werden, nimmt aber mit geringerem Fingerpastenverbrauch zu. Die Einhüllende der simulierten Wirkungsgrade zeigt die optimale Nutzung der verbrauchten Silberpaste, alle Werte darunter erreichen teilweise noch die gleichen Wirkungsgrade, aber nur mit einem erhöhten Silberpastenverbrauch und damit verbunden höheren Kosten.

Für das simulierte Layout mit 3 Busbars nimmt der Wirkungsgrad mit sinkendem Fingerpastenverbrauch sichtbar ab. Bei 60 mg hat sich der Wirkungsgrad um $0,14\%_{\text{abs}}$ reduziert, was mit den experimentell erzielten Ergebnissen für den Dual Print aus Kapitel 5.3 übereinstimmt. Bei nur noch 40 mg Pastenverbrauch hat sich der Verlust auf $0,29\%_{\text{abs}}$

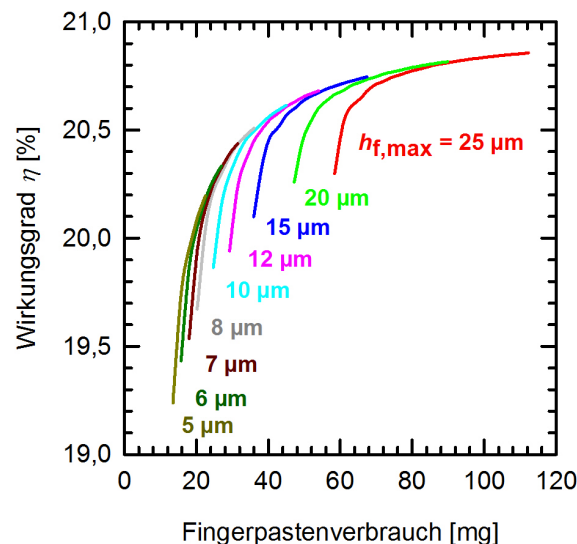


Abb. 5.24: Numerische Simulation des Wirkungsgrades von PERC Solarzellen in Abhängigkeit vom Silberpastenverbrauch der Kontaktfinger mit 3 Busbars. Durch die Einhüllende der simulierten Wirkungsgrade wird die optimale Nutzung der verbrauchten Silberpaste dargestellt. Die simulierten Wirkungsgrade zwischen 120 mg und 60 mg stimmen anhand des Wirkungsgradverlustes mit den experimentell erzielten Ergebnissen für den Dual Print aus Kapitel 5.3 überein.

verdoppelt. Insbesondere bei großen Fingerhöhen $h_{f,\max}$ über $20\ \mu\text{m}$ führt ein Anstieg des Silberpastenverbrauchs ab einem bestimmten Punkt nur noch zu einer geringen Erhöhung des Wirkungsgrades und damit einem unnötigen Verbrauch der Silberpaste.

5.5 Zusammenfassung des Kapitels

In diesem Kapitel wurden drei verschiedene Drucktechniken für die Feinlinienmetallisierung untersucht und eigene Optimierungen gezeigt. Für den Single Print konnten durch Veränderung der Siebparameter schmale Fingeröffnungen von 30 und $40\ \mu\text{m}$ nahezu ohne Fingerunterbrechungen realisiert werden. Dadurch wurde eine geringfügige Erhöhung des Wirkungsgrades um $0,1\%_{\text{abs}}$ gegenüber $80\ \mu\text{m}$ breiten Fingeröffnungen im Sieb erzielt. Zusätzlich konnte der Silberpastenverbrauch von ungefähr $300\ \text{mg}$ auf $100\ \text{mg}$ reduziert werden. Beim Print-on-Print wurde als beste Siebkombination $40\ \mu\text{m}$ für den ersten und $50\ \mu\text{m}$ für den zweiten Druckschritt herausgearbeitet, indem die Druckreihenfolge und die Fingeröffnungen variiert wurden. Als bester Wirkungsgrad wurde mit diesem Prozess auf PERC Solarzellen ein Wert von $20,8\%$ erreicht.

Eine Analyse der elektrischen Parameter von PERC Solarzellen für unterschiedliche Silberpastenverbräuche für die Kontaktfinger durch Variation der Druckparameter wurde beim Dual Print durchgeführt. Hierbei zeigte sich, dass für das verwendete Layout mit 101 Fingern und $40\ \mu\text{m}$ Fingeröffnung in der Schablone ein Silberpastenverbrauch der Kontaktfinger von mindestens $60\ \text{mg}$ nötig ist, um keine Einbußen im Wirkungsgrad hinnehmen zu müssen. Zudem wurde durch TLM Messungen eine Abhängigkeit des spezifischen Kontaktwiderstandes ρ_c auf der Vorderseite zum Silberpastenverbrauch beobachtet, die in dieser Art in der Literatur noch nicht gezeigt wurde. Durch einen nachfolgenden Vergleich eines modellierten zum gemessenen Serienwiderstand konnte diese Beobachtung weitestgehend bestätigt werden.

Beim direkten Vergleich der drei Drucktechniken erzielte der Dual Print hinsichtlich des Fingerprofils, des Wirkungsgrades sowie des Silberpastenverbrauchs die besten Resultate. Der höchste erzielte Wirkungsgrad mit Dual Print auf Solarzellen mit ganzflächigem AlBSF lag bei $19,1\%$. Gleichzeitig wurde damit auch der niedrigste Silberpastenverbrauch von $75\ \text{mg}$ erreicht. Im Vergleich dazu erzielten die beiden anderen Drucktechniken Wirkungsgrade bis $18,8\%$ bei einem Silberpastenverbrauch von $182\ \text{mg}$.

Es wurden neben den experimentellen Untersuchungen numerische Simulationen durchgeführt, bei denen der Einfluss der Rauigkeit der Fingerhöhe auf den Wirkungsgrad für drei Busbars analysiert wurde. Zusätzlich wurde der Wirkungsgrad in Abhängigkeit des Silberpastenverbrauchs der Kontaktfinger berechnet und dargestellt. Die Simulationen zeigten, dass für ein 3 Busbar Layout maximale Fingerhöhen $h_{f,\max} \geq 15\ \mu\text{m}$ für die Kontaktfinger wichtig sind und die Rauigkeit ξ als Differenz der maximalen und minimalen Fingerhöhe nicht mehr als $5\ \mu\text{m}$ betragen sollte, um den Wirkungsgradverlust einzugrenzen. Die simulierten Wirkungsgrade über den Fingerpastenverbrauch bestätigten anhand des Wirkungsgradverlustes die experimentell erzielten Ergebnissen mit Dual Print.

6 Neue Busbar Layouts für Reduzierung des Ag Verbrauchs und hohe Wirkungsgrade

Nachdem im vorigen Kapitel die Optimierung der Kontaktfinger thematisch behandelt wurde, folgt in diesem Abschnitt zur Komplettierung der Vorderseitenmetallisierung die Analyse von Verbesserungsmöglichkeiten der Busbarstruktur. Die Schwerpunkte sind dabei die weitere Verringerung des Silberpastenverbrauchs und Verbesserung des Wirkungsgrades. Dazu werden neben dem Einfluss verschiedener Silberpasten auch Veränderungen des Busbarlayouts untersucht.

6.1 Verwendung von nicht-durchfeuernden Silberpasten

Den Silberpasten- bzw. Silberverbrauch auf der Solarzellenvorderseite zu reduzieren, ist ein zentraler Aspekt, um die Kosten pro Watt Peak (W_p) zu senken. Mit dem Dual Print Prozess wurde in Kapitel 5.3 der Silberpastenverbrauch der Kontaktfinger und dessen Auswirkung auf den Wirkungsgrad analysiert und ein Minimum von 60 mg Pastenverbrauch für ein vorgegebenes Layout mit 3 Busbars demonstriert.

Das Pastenvolumen für die Auftragung der Busbars zu reduzieren, ist ein weiterer Ansatz für die Verringerung des Silberpastenverbrauchs auf der Solarzellenvorderseite. Da im späteren Modul die Leitfähigkeit hauptsächlich durch die aufgelöteten Verbinderbändchen bestimmt wird und im IV Tester eine große Anzahl von Messköpfen den Einfluss der Busbarleitfähigkeit minimiert [106], kann die Busbarhöhe ohne negative Auswirkungen verringert werden, solange die Abrisskräfte zwischen Solarzelle, Busbar und Verbinderbändchen für das Solarmodul ausreichend sind [119].

Während z.B. beim Single Print veränderte Siebparameter wie eine geringere Emulsionsdicke zu einer Reduzierung der Busbarhöhe führen, hat das geringere verdruckbare Pastenvolumen in den meisten Fällen eine negative Auswirkung auf den Wirkungsgrad durch die ebenfalls geringere Fingerhöhe und damit einen größeren Serienwiderstand (siehe Kapitel 5.1). Der Dual Print Prozess bietet durch die Entkoppelung des Finger- und Busbardrucks die Möglichkeit, den Silberpastenverbrauch der Busbars unabhängig von den Kontaktfingern zu optimieren. Durch eine Anpassung des Siebgewebes und der EOM Dicke über dem Gewebe des Busbarsiebes kann das verdruckte Pastenvolumen reduziert werden.

Statt der bekannten Verwendung angepasster Siebparameter wird im folgenden Versuch die Möglichkeit einer anderen Art der Silberreduzierung untersucht: die Verwendung einer speziellen Silberpaste für die Busbars. Diese speziellen Busbarpasten wurden entwickelt, um für einen Dual Print Prozess Rekombinationsverluste im Emitter zu reduzieren [100]. Diese Busbarpasten enthalten weniger Glasfritte, wodurch das Siliziumnitrid nicht vollständig weggeätzt und kein Kontakt zum Emitter hergestellt wird [100]. Kein Metallkontakt zum Emitter bedeutet durch die noch vorhandene Passivierung eine geringere Rekombination unter den Busbars. Diese Pastenart nennt man dank der beschriebenen Eigenschaften auch nicht-durchfeuernde (*engl.* non-firing through) Silberpaste.

Zusätzlich besitzen diese speziellen Silberpasten einen geringeren Festkörperanteil von 55% [120] bis 68% [121, 122] im Vergleich zu normalen Silberpasten für die Finger bzw. das gesamte Vorderseitengrid mit einem Festkörperanteil um 90% [123–125]. Die Festkörper in der Paste bestehen hauptsächlich aus Silberpartikeln. Statt der Silberpartikel enthalten die speziellen Busbarpasten einen höheren prozentualen Anteil an Lösungsmitteln wie Terpeneol ($C_{10}H_{18}O$). Die Idee zur Reduzierung des Silberverbrauchs durch eine spezielle Busbarpaste ist, dass sie bei gleichem Pastenvolumen weniger Silber enthält als eine normale Silberpaste. Dadurch kann ohne Änderung des Busbarsiebes der Silberverbrauch verringert werden.

Das Ziel dieses Versuchs ist die Untersuchung der Silberreduzierung mit Dual Print durch den Einsatz von nicht-durchfeuernden Silberpasten und die Analyse der Verringerung der Rekombinationsverluste unter den Busbars. Für die Untersuchung dieser Einflüsse werden drei verschiedene Silberpasten für die Busbars verwendet: Paste A, mit der auch die Kontaktfinger gedruckt werden, hat eine höhere Viskosität speziell für den Schablonendruck, ist aber von der weiteren chemischen Zusammensetzung eine normal kontaktierende Silberpaste, die z.B. auch für den Single Print verwendet wird. Die Pasten B und C sind speziell für den Busbardruck konzipiert und enthalten weniger Silber und Glasfritte. Für die Paste B wird ein Silbergehalt von 60% bis 80% im Datenblatt angegeben, für die Paste C von 30% bis 60%. Dieses Experiment wird auf PERC Solarzellen mit einem $100 \Omega/\text{sq}$ Emitterschichtwiderstand und 3 Busbar Layout angewendet. Die Kontaktfinger mit einer Fingeröffnung von $40 \mu\text{m}$ für den Schablonendruck werden mit einem Metallraket gedruckt, um Fingerhöhen über $20 \mu\text{m}$ zu erzielen und damit den Einfluss der Finger auf den elektrischen Widerstand der Solarzelle zu minimieren.

6.1.1 Ergebnisse PERC Solarzellen

Die IV Parameter der PERC Solarzellen mit den unterschiedlichen Busbarpasten sind in Abbildung 6.1 dargestellt. Für alle drei Busbarpasten A, B und C werden Wirkungsgrade zwischen 20,7% und 20,9% erreicht. Der durchschnittliche Wirkungsgrad für Paste A beträgt $20,82 \pm 0,04\%$, $20,80 \pm 0,05\%$ für Paste B und $20,79 \pm 0,06\%$ für Paste C. Die Kurzschlussstromdichte J_{sc} ist aufgrund der identischen Finger- und Busbargeometrie nahezu gleich, die Unterschiede liegen im Bereich der Messunsicherheit. Bei der Leerlaufspannung V_{oc} zeigt sich der Einfluss der nicht-durchfeuernden Busbarpaste. Die Solarzellen mit den Busbarpasten B und C erzielen eine um bis zu 3 mV höhere V_{oc} im Vergleich zur Paste A durch die geringere Rekombination unter den Busbars. Auch ein Unterschied

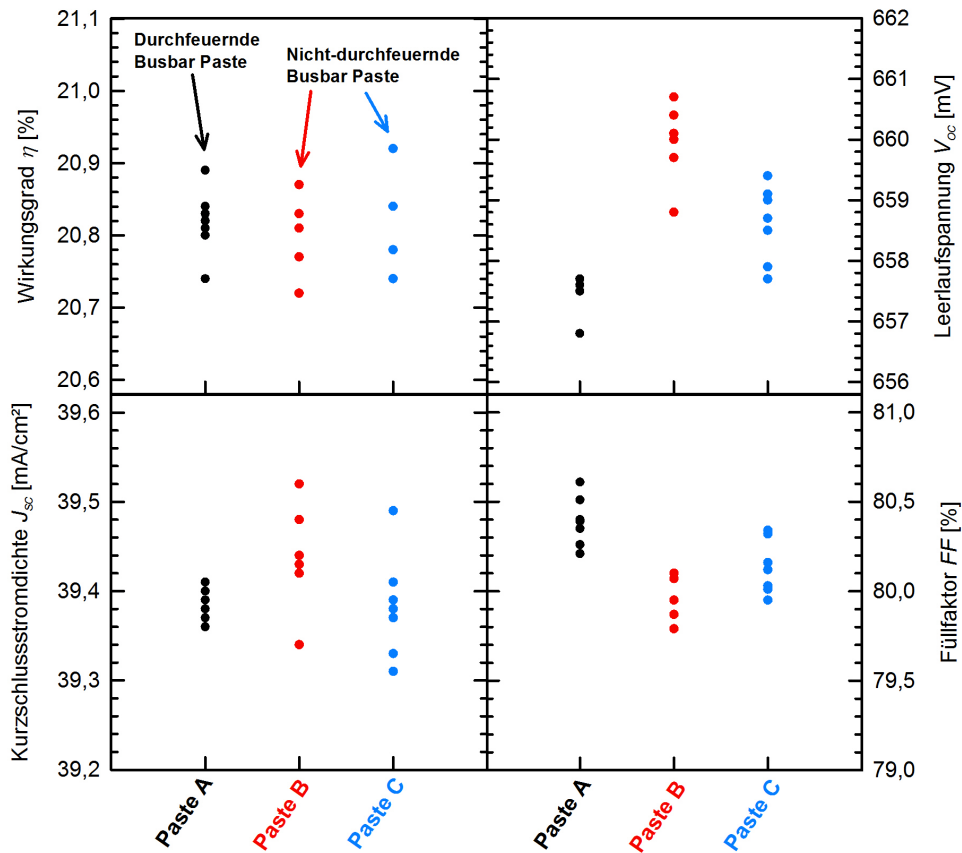


Abb. 6.1: Gemessener Wirkungsgrad η , Leerlaufspannung V_{oc} , Kurzschlussstromdichte J_{sc} und Füllfaktor FF von PERC Solarzellen mit einem 3 Busbar Layout und Dual Print. Für die Kontaktfinger wird jeweils die Paste A verwendet, für die Busbars die Pasten A bis C. Die nicht-durchfeuernden Pasten B und C sorgen für eine höhere V_{oc} im Vergleich zur Paste A, welche wiederum einen besseren FF erzielt, wodurch die Unterschiede in V_{oc} ausgeglichen werden.

zwischen den speziellen Busbarpasten B und C ist zu beobachten. Eine durchschnittliche V_{oc} von $659,9 \pm 0,7$ mV für die Paste B steht einer V_{oc} von $658,6 \pm 0,6$ mV der Paste C gegenüber.

Unerwartet ist der Einfluss der Busbarpaste auf den Füllfaktor. Hier zeigt sich das umgedrehte Verhalten im Vergleich zur V_{oc} . Die Paste A verzeichnet einen um $0,2\%_{abs}$ bis $0,5\%_{abs}$ besseren FF als die Pasten B und C. Der Verlust im FF der Pasten B und C im Vergleich zur Paste A wird durch deren bessere V_{oc} ausgeglichen, wodurch nahezu der selbe Wirkungsgrad η bei allen drei Pasten erzielt wird.

Um zu verstehen, woher die Unterschiede im Füllfaktor aus Abbildung 6.1 für die verschiedenen Busbarpasten herrühren, sind in Abbildung 6.2 zusätzlich der Pseudo-Füllfaktor pFF und der Serienwiderstand R_s dargestellt. Der pFF gibt den maximal erreichbaren Füllfaktor ohne Widerstandsverluste an und wird durch Rekombinationsströme in der Solarzelle beeinflusst.

Der Einfluss des Linienwiderstandes der Busbars auf den Serienwiderstand ist gering,

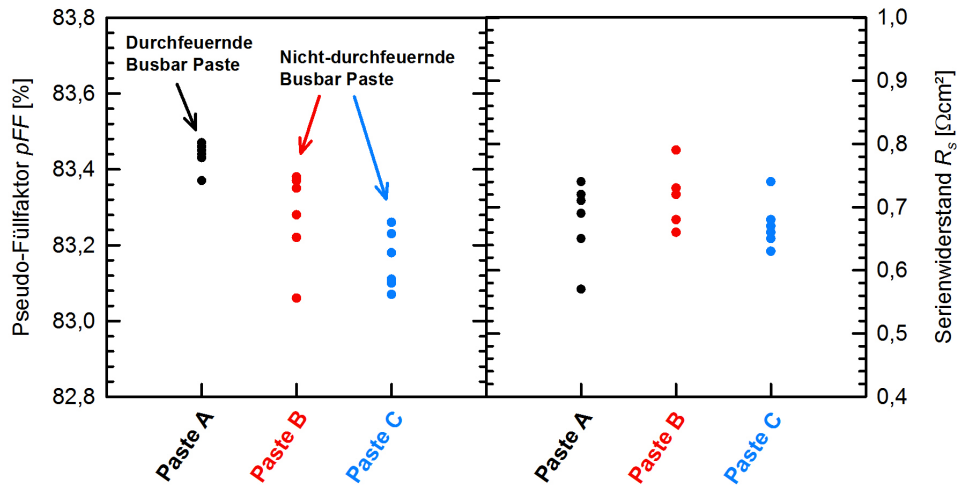


Abb. 6.2: Gemessener Pseudo-Füllfaktor pFF und Serienwiderstand R_s von PERC Solarzellen unter Verwendung der unterschiedlichen Pasten A bis C für die Busbars. Zwischen Paste A und Paste C liegt der Unterschied im pFF mit den Mittelwerten $83,44 \pm 0,03\%$ (Paste A) zu $83,15 \pm 0,07\%$ (Paste C) nahezu bei dem selben Differenzwert von $0,26\%_{\text{abs}}$, der im FF gemessen wurde.

weswegen der R_s der drei Pasten nahezu gleich ist. Der Linienwiderstand der Busbars beträgt $0,012 \Omega/\text{cm}$ für Paste A, woraus sich ein Serienwiderstandsanteil von $0,01 \Omega\text{cm}^2$ berechnen lässt. Der größte Linienwiderstand von $0,051 \Omega/\text{cm}$ wird für Paste C gemessen und erzeugt einen geringen Anstieg des Serienwiderstandsanteils auf $0,03 \Omega\text{cm}^2$, der unterhalb der Messunsicherheit des R_s liegt.

Der Mittelwert des pFF zeigt mit $83,44 \pm 0,03\%$ (Paste A) zu $83,15 \pm 0,07\%$ (Paste C) fast genau den Unterschied, der im FF Wert mit $80,39 \pm 0,04\%$ (Paste A) zu $80,13 \pm 0,06\%$ (Paste C) gemessen wurde. Insgesamt ist die Anzahl der Solarzellen pro Splitgruppe und die Unterschiede im pFF und R_s zu gering, um eine belastbare Aussage für den Grund der Differenz im Füllfaktor zu treffen.

6.1.2 Analyse der Emittersättigungsstromdichte und des Silberpastenverbrauchs

Für die Untersuchung der Leerlaufspannung V_{oc} werden zusätzlich zu den PERC Solarzellen Float-Zone (FZ) Wafer für die Bestimmung der Emittersättigungsstromdichte J_{0e} in diesem Experiment hergestellt. Die FZ Wafer haben die selbe Struktur wie die PERC Solarzellen mit Emmitter und Siliziumnitrid auf der Vorderseite und einem $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiN}_y$ Schichtstapel auf der planaren Rückseite. Neben Proben ohne Metallisierung werden auch Proben mit den verschiedenen Busbarpasten bedruckt. Die Metallisierung erfolgt in einem Bereich von vier $22 \text{ mm} \times 22 \text{ mm}$ großen Pads.

Die Auswertung erfolgt mit kalibrierten Photolumineszenz (PC-PLI, engl. Photoconductance Calibrated Photoluminescence Lifetime Imaging) Messungen [126]. Die PC-PLI

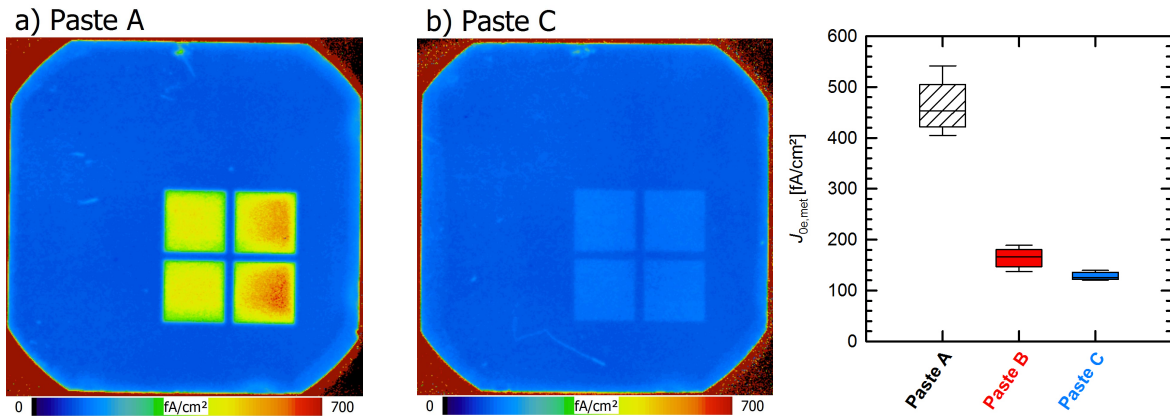


Abb. 6.3: Ergebnisse der PC-PLI Messung der Emittersättigungsstromdichte: a) Ortsaufgelöste J_{0e} des FZ Wafers mit Paste A, b) Ortsaufgelöste J_{0e} des FZ Wafers mit Paste C, c) $J_{0e,met}$ von 12 Messpunkten (jeweils 3 Wafer mit 4 Pads) pro Busbarpaste. Die Boxplots stellen den Median, das 25. und das 75. Perzentil dar, die Fehlerbalken unter- und oberhalb das 10. und das 90. Perzentil. Die erzielten Messergebnisse bestätigen die Reduzierung der Emitterrekombination unter den Metallkontakten bei Anwendung der nicht-durchfeuernden Busbarpasten.

Messung liefert eine bildgebende Darstellung der J_{0e} an jedem Punkt auf dem Wafer und somit auch im metallisierten Bereich. Die Auswertung erfolgt über die Methode von *Kane* und *Swanson* [127] durch Daten der lokalen injektionsabhängigen Ladungsträgerlebensdauer. Weitere Erläuterungen können der Veröffentlichung von *Müller et al.* [128] entnommen werden.

Die ortsaufgelösten Emittersättigungsstromdichten J_{0e} aus zwei beispielhaften PC-PLI Messungen für die Busbarpasten A und C sind in Abb. 6.3 a) und b) dargestellt. Der passivierte Bereich erzielt bei der Berechnung einen Mittelwert von 105 ± 5 fA/cm². Bei Betrachtung der ortsaufgelösten J_{0e} ist an der Farbgebung zu erkennen, dass die metallisierten Bereiche mit der nicht-durchfeuernden Busbarpaste C eine erhöhte Emittersättigungsstromdichte gegenüber dem passivierten Bereich aufweisen. Paste A zeigt im Vergleich zu Paste C neben einer erhöhten $J_{0e,met}$ im metallisierten Bereich auch eine inhomogene Verteilung über die Pads.

Die mittels PC-PLI gemessenen Emittersättigungsstromdichten $J_{0e,met}$ im metallisierten Bereich von je 3 Wafern pro Paste sind in Abbildung 6.3 c) gezeigt. Die erzielten Messergebnisse bestätigen die Reduzierung der Emitterrekombination unter den Metallkontakten bei Anwendung der nicht-durchfeuernden Busbarpasten. Für Paste A wird eine $J_{0e,met}$ von 464 ± 49 fA/cm² gemessen. Die Busbarpasten B und C erzielen eine um 300 fA/cm² bzw. 326 fA/cm² kleinere $J_{0e,met}$ als die Paste A. Die Werte der Silberpaste A stimmen mit früheren Messungen anderer Silberpasten überein [129].

Die erhöhten Messwerte der Emittersättigungsstromdichte unter den Kontakten der Pasten B (164 fA/cm²) und C (128 fA/cm²) gegenüber dem unmetallisierten Emitter mit 105 fA/cm² sind unerwartet. Ausgehend von der Annahme, dass die Busbarpasten keinen Kontakt zum Emitter herstellen und die Passivierung noch vorhanden ist, sollten die Werte für $J_{0e,met}$ der Pasten B und C gleich $J_{0e,pass}$ sein. Zur Überprüfung dieser An-

nahme wird bei einem Strom von 1 A die Spannung und damit der Widerstand zwischen zwei benachbarten Pads aus Abbildung 6.3 für die Pasten A bis C gemessen. Für Paste A wird ein durchschnittlicher Widerstand von 11,1 Ω gemessen. Für die Pasten B und C sollte die Spannungsmessung nicht möglich sein aufgrund des nicht vorhandenen Kontaktes zum Emitter durch die nicht-durchfeuernden Silberpasten. In beiden Fällen fließt aber ein Strom bei einem Widerstand von durchschnittlich 13,2 Ω für Paste B und 16,7 Ω für Paste C. Dies lässt darauf schließen, dass bei den Silberpasten B und C zumindest punktuell ein Kontakt zum Emitter durch das Siliziumnitrid gebildet wird.

Da die Dimension eines einzelnen Kontaktes zum Emitter kleiner ist als die Auflösung in der bildgebenden Darstellung der PC-PLI Messung mit den Maßen 333 $\mu\text{m} \times 333 \mu\text{m}$ je Pixel, würde eine punktuell erhöhte Emittersättigungsstromdichte durch den Metallkontakt zum Emitter den Mittelwert des Pixels ansteigen lassen. Mit dieser Annahme ließe sich die Steigerung der $J_{0e,met}$ der nicht-durchfeuernden Busbarpasten gegenüber dem passivierten Emitter erklären. Zur weitergehenden Analyse, inwieweit ein Kontakt zum Emitter durch die nicht-durchfeuernden Busbarpasten gebildet wird, könnte das Silber von der Waferoberfläche entfernt und mittels Rasterelektronenmikroskopie das Siliziumnitrid auf weggeätzte Flächen und vorhandene Silberkristalle untersucht werden. Eine weitere Möglichkeit wäre die TLM Messung an Kontaktfingern, die mit nicht-durchfeuernden Busbarpasten gedruckt werden.

Durch die gemessenen J_{0e} lassen sich zusätzlich die theoretischen Werte für V_{oc} berechnen und mit denen aus der IV Messung vergleichen. Ausgehend von der Annahme, dass in diesem Versuch als einziger Einflussmechanismus die Busbarpaste die J_{0e} verändert und alle anderen Beiträge zur Sättigungsstromdichte J_0 konstant sind, lässt sich die Leerlaufspannung anhand der Gleichung 2.3 des 1-Dioden-Modells berechnen:

$$V_{oc} = \frac{k_B T}{q} \ln \left(\frac{J_{sc}}{J_0} + 1 \right). \quad (6.1)$$

Da zwei verschiedene Silberpasten für die Finger und Busbars verwendet wurden, verändert sich die Gleichung 2.7 zu

$$J_{0e} = (1 - f - g) \cdot J_{0e,pass} + f \cdot J_{0e,met} + g \cdot J_{0e,met}. \quad (6.2)$$

f beschreibt die Metallisierungsfläche der Finger und g die der Busbars. Fingerbreiten von 48 μm ergeben für f einen Wert von 2,99%, die Busbarfläche g berechnet sich zu

Tab. 6.1: Vergleich der berechneten V_{oc} mit den Durchschnittswerten der gemessenen V_{oc} der PERC Solarzellen mit den Pasten A bis C. Zusätzlich sind gemessene und berechnete Inputparameter der Gleichungen 6.2 und 6.1 aufgeführt.

Busbarpaste	$J_{0e,met}$ Busbars [fA/cm ²]	J_{0e} [fA/cm ²]	J_0 [fA/cm ²]	Berechnete V_{oc} [mV]	Gemessene V_{oc} [mV]
Paste A	464	125	305	657,6	657,5 \pm 0,3
Paste B	164	117	297	658,3	659,9 \pm 0,7
Paste C	128	116	296	658,3	658,6 \pm 0,6

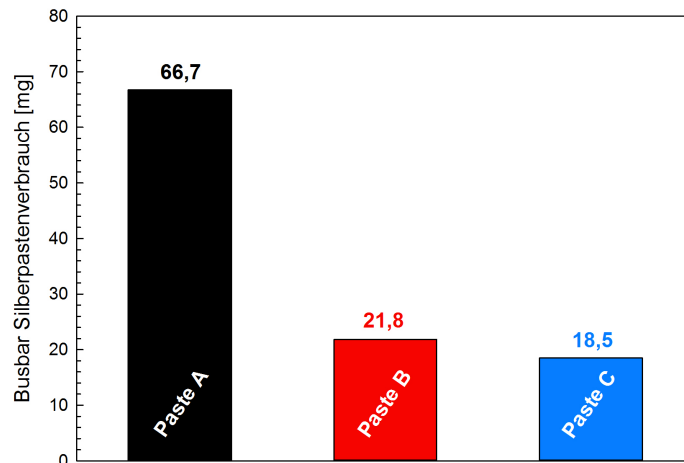


Abb. 6.4: Gemessener Silberpastenverbrauch vor Trocknung für die Busbarpasten A bis C. Im Vergleich zur Paste A kann der Silberpastenverbrauch durch den Einsatz der Pasten B und C um 44,9 mg bzw. 48,2 mg gesenkt werden aufgrund des geringeren Festkörperanteils der nicht-durchfeuernden Busbarpasten. Somit lassen sich bei gleichem Wirkungsgrad Kosten bei der Solarzellenherstellung sparen.

2,52%. Für $J_{0e,pass}$ wird der gemessene Wert von 105 fA/cm^2 verwendet. Für die $J_{0e,met}$ der Finger wird ein Wert von 464 fA/cm^2 eingesetzt und für die $J_{0e,met}$ der Busbars der Wert der jeweils verwendeten Paste. Für den Basis- und Rückseitenbeitrag J_{0b} wird ein Wert von 180 fA/cm^2 angenommen [20]. Die Summe aus J_{0e} und J_{0b} ergibt J_0 . Für J_{sc} wird der Mittelwert aller Solarzellen der IV Messung verwendet mit $39,4 \text{ mA/cm}^2$.

In Tabelle 6.1 sind die berechneten J_{0e} durch Gleichung 6.2 und V_{oc} durch Gleichung 6.1, sowie der Mittelwert mit Standardabweichung der gemessenen V_{oc} aufgeführt. Die berechneten V_{oc} Werte bestätigen den Gewinn in der Leerlaufspannung durch den Einsatz der nicht-durchfeuernden Busbarpasten im Vergleich zur kontaktierenden Silberpaste A. Insbesondere die gemessenen und berechneten Werte für V_{oc} der Pasten A und C stimmen überein.

Wie in Abbildung 6.1 gezeigt, konnte in diesem Experiment der Wirkungsgrad durch den Einsatz der nicht-durchfeuernden Busbarpasten B oder C nicht verbessert werden im Vergleich zur kontaktierenden Paste A. Ein weiterer Aspekt, der die Nutzung der nicht-durchfeuernden Busbarpasten attraktiv macht, ist die Reduzierung des Silberverbrauchs, wie am Anfang des Kapitels als eine Motivation für dieses Experiment beschrieben.

Der gemessene Silberpastenverbrauch für die Busbars vor dem Trocknen für die Pasten A bis C ist in Abbildung 6.4 aufgetragen. Im Vergleich zur Paste A kann der Silberpastenverbrauch durch den Einsatz der Busbarpasten B und C um 44,9 mg bzw. 48,2 mg gesenkt werden. Das entspricht bei einem Silberpreis von $\$500/\text{kg}$ (Stand Oktober 2015) und einem Zellwirkungsgrad von 20,8% einer Ersparnis von $\$0,45 \text{ Cent}/W_p$ bzw. $\$0,48 \text{ Cent}/W_p$.

Da bei den Pasten B und C bei gleich verdrucktem Pastenvolumen ein größerer Anteil leichter Komponenten der Silberpasten nach dem Trocknen und Feuern verdampft sind,

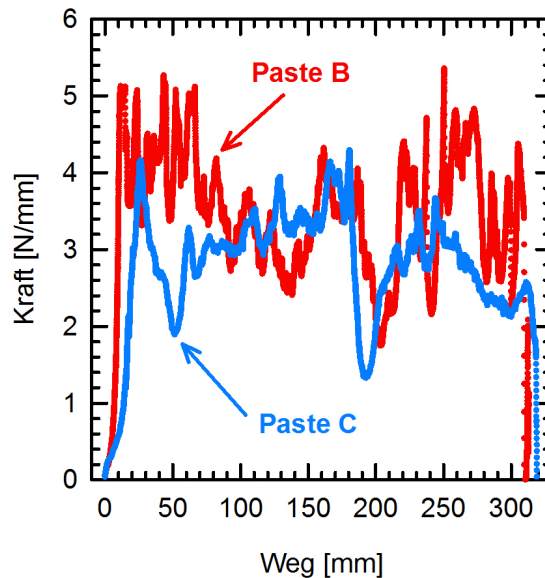


Abb. 6.5: Abrisskräfte der nicht-durchfeuernden Busbarpasten B und C. Die gemessene Kraft wurde durch die Breite der Busbars von 1,3 mm geteilt, um die Kraft pro Millimeter zu erhalten. Trotz der geringen Busbarhöhe erzielen beide Pasten kontinuierlich Werte über 1 N/mm und bestehen dadurch den Abrisstest.

ist die Busbarhöhe auf den fertigen Solarzellen geringer als mit Paste A. Die Busbarhöhe der Paste A beträgt $15,6 \mu\text{m}$, während die Pasten B und C eine Höhe von $3,7$ bzw. $4,1 \mu\text{m}$ erzielen. Um die Busbarpasten B und C auch für die Herstellung von Solarmodulen verwenden zu können, müssen die Abrisskräfte über 1 N/mm liegen, wie am Anfang des Kapitels beschrieben. Abbildung 6.5 zeigt die gemessenen Abrisskräfte der Pasten B und C, die trotz der geringen Busbarhöhe den Test bestehen.

Dieser Versuch führt zu dem Ergebnis, dass der Einsatz einer nicht-durchfeuernden Busbarpaste den Silberpastenverbrauch mit Dual Print reduziert, um die Kosten für die Solarzellenherstellung zu senken. Des Weiteren wird durch die verringerte Emitterrekombination ein Gewinn in V_{oc} erzielt, der bei Minimierung der aufgetretenen Verluste im Füllfaktor zu einer Erhöhung des Wirkungsgrades der Solarzellen führen kann.

6.2 Segmentierter Busbar

Die Veränderung des Busbar Layouts ist eine weitere Möglichkeit zur Reduzierung des Silberpastenverbrauchs. Von *Yang et al.* [130] wurde zu diesem Thema das Konzept eines segmentierten Busbars veröffentlicht. Dabei besteht der Busbar aus Pads für die Kontaktierung bei der Strom-Spannungsmessung beziehungsweise für das Verlöten im Modul. Diese Pads sind auf beiden Seiten durch zwei schmale Kontaktlinien verbunden. Der folgende Versuch greift dieses Konzept des segmentierten Busbars für den Dual Print Prozess auf. Während bei *Yang et al.* [130] nur ein Layout ohne Angabe der Dimensionen

beschrieben wird, ist das Ziel der eigenen Untersuchung, mit einer systematischen Verringerung der Busbarfläche die Reduzierung des Silberpastenverbrauchs zu maximieren und die Auswirkung auf die Solarzellenparameter zu analysieren. Anhand der Ergebnisse des vorigen Kapitels wird für die Busbars eine nicht-durchfeuernde Silberpaste verwendet.

Der segmentierte Busbar im folgenden Versuch besteht aus 1,3 mm breiten Pads, die außen durch zwei Linien mit einer Breite von je 250 μm verbunden sind. Die Länge der Pads kann dabei variiert werden. Die Anzahl und Position der Pads wird durch die Messköpfe des am ISFH vorhandenen IV Testers bestimmt. Abbildung 6.6 zeigt den Vergleich eines segmentierten Busbars in Abb. 6.6 a) zu einem standardmäßig durchgezogenen rechteckigen Busbar in Abb. 6.6 b).

Durch die Länge der Pads kann die gedruckte Fläche der Busbars und somit der Silberpastenverbrauch variiert werden. Ein Wirkungsgradgewinn ist mit diesem Konzept der segmentierten Busbars, insbesondere im späteren Solarmodul, nicht zu erwarten. Während der IV Messung der Solarzellen wird der nicht metallisierte Busbarbereich von den Kontaktleisten verdeckt, so dass eine Erhöhung der J_{sc} nur bei Mehrfachreflexion des Lichts und Auftreffen auf den segmentierten Bereich zwischen den Pads erzielt würde. Im späteren Modul werden über den nicht metallisierten Busbarbereich die Verbinderbändchen aufgelötet und der Stromgewinn verhindert sowie etwaige Verluste im FF durch die geringere Busbarleitfähigkeit ausgeglichen. Einzig die Emittersättigungsstromdichte J_{0e} wird geringfügig reduziert. Ausgehend von den $J_{0e,met}$ Werten aus Kapitel 6.1 wird durch die Flächenreduzierung der Busbars bei Benutzung einer nicht-durchfeuernden Silberpaste nur eine Verringerung um bis zu 1 fA/cm^2 erzielt, was sich theoretisch nicht erkennbar in V_{oc} widerspiegeln sollte.

Für die experimentelle Untersuchung des segmentierten Busbars werden PERC Solarzellen mit einem 100 Ω/sq Emitterschichtwiderstand und Variationen der Busbarfläche miteinander verglichen. Die Padlänge wird zwischen 2 mm und 5 mm in 1 mm Schritten variiert. Kleinere Padlängen sind aufgrund der Konfiguration des IV Testsystems am ISFH nicht möglich. Als Referenz wird in einer Gruppe der standardmäßig durchgezogene Busbar verwendet. Als Druckprozess wird der Dual Print mit einem Metallraketel und spezieller Schablonendruckpaste mit erhöhter Viskosität angewendet, um durch Fingerhöhen

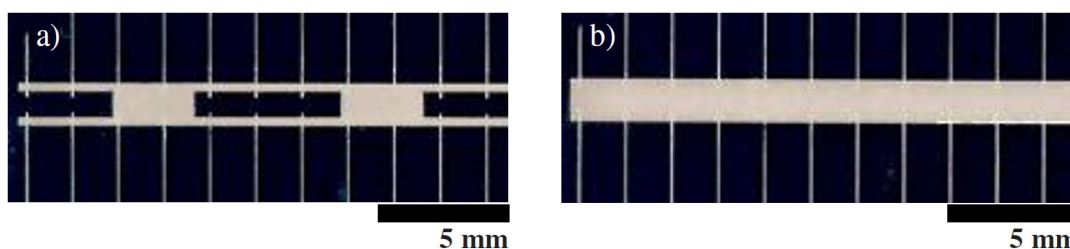


Abb. 6.6: Fotos von a) einem segmentierten Busbar und b) einem standardmäßig durchgezogenen rechteckigen Busbar. Die Pads beim segmentierten Busbar haben in diesem Beispiel eine Länge von 3 mm bei einer Breite von 1,3 mm. Die Pads sind verbunden durch zwei 250 μm breite Linien. Die Anzahl und Position der Pads wird durch die Messköpfe des am ISFH vorhandenen IV Testers bestimmt.

von über 20 μm Einflüsse der Kontaktfinger auf den elektrischen Widerstand der Solarzelle zu minimieren. Als Busbarpaste wird eine nicht-durchfeuernde Silberpaste verwendet, deren Emittersättigungsstromdichte $J_{0e,\text{met}}$ unter den Metallkontakten nicht bekannt ist.

6.2.1 Ergebnisse PERC Solarzellen und Reduzierung Silberpastenverbrauch

Die gemessenen IV Daten zu diesem Versuch sind als Mittelwert mit Standardabweichung in Abbildung 6.7 dargestellt. Jede Gruppe besteht aus 4 bis 6 Solarzellen. Die Referenzgruppe mit der Bezeichnung *Standard BB* und die unterschiedlichen Padlängen sind auf der x-Achse so aufgetragen, dass die metallisierte Busbarfläche von links nach rechts abnimmt.

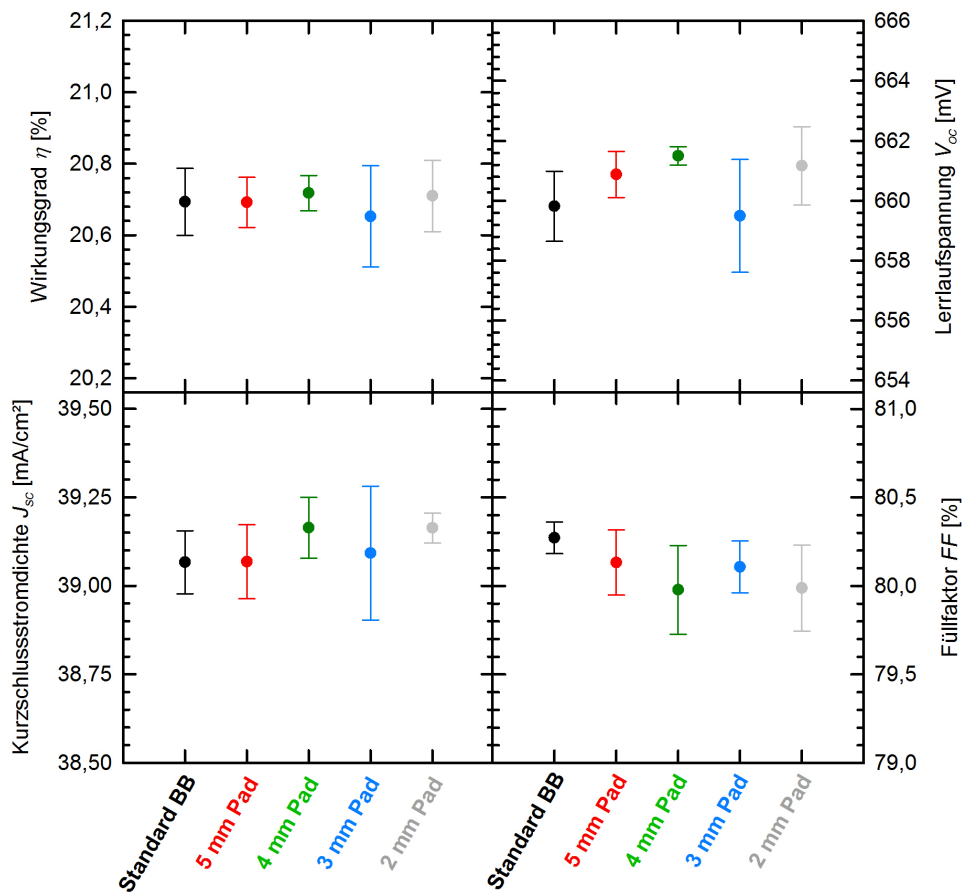


Abb. 6.7: Gemessener Wirkungsgrad η , Leerlaufspannung V_{oc} , Kurzschlussstromdichte J_{sc} und Füllfaktor FF von PERC Solarzellen mit einem 3 Busbar Layout und Dual Print. Variiert wird die Busbarfläche, wobei die Referenzgruppe mit der Bezeichnung *Standard BB* und die unterschiedlichen Padlängen auf der x-Achse so aufgetragen sind, dass die gedruckte Busbarfläche von links nach rechts abnimmt. Das Ergebnis zeigt, dass die Busbarfläche ohne Wirkungsgradverluste verringert werden kann.

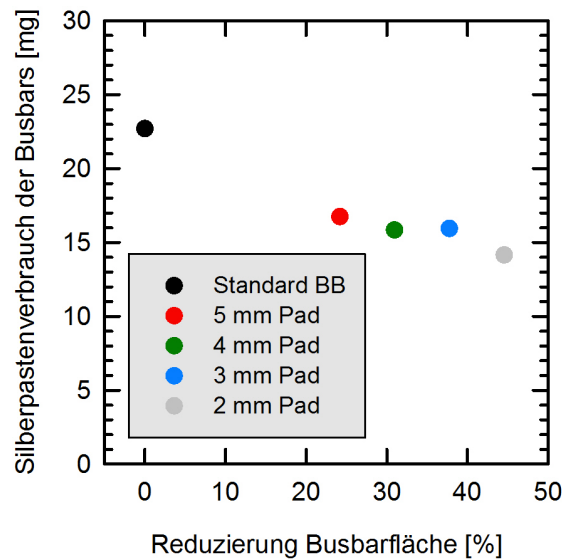


Abb. 6.8: Silberpastenverbrauch der Busbars aufgetragen über die prozentuale Reduzierung der Busbarfläche, ausgehend von einem durchgezogenen Busbar mit 1,3 mm Breite. Bei Verwendung der 3 mm und 2 mm Pads ist ein um ca. 2 mg höherer Silberpastenverbrauch gemessen worden als hinsichtlich der reduzierten Fläche erwartet wurde.

Der durchschnittliche Wirkungsgrad der Gruppen liegt zwischen 20,65% und 20,72%. Der beste Wirkungsgrad von 20,90% wird in diesem Versuch mit der kleinsten Padlänge von 2 mm erzielt. Damit zeigt dieses Ergebnis, dass die Busbarfläche ohne Wirkungsgradverluste reduziert werden kann. Einzig im Füllfaktor und in der Leerlaufspannung lässt sich ein Trend zu kleineren und größeren Werten im Mittel erahnen, jedoch liegen auch dort alle Messwerte im Bereich der Fehlerbalken durch die Standardabweichung.

Der Serienwiderstand steigt geringfügig von durchschnittlich $0,55 \pm 0,03 \Omega \text{cm}^2$ für den durchgezogenen Busbar auf $0,65 \pm 0,04 \Omega \text{cm}^2$ für den segmentierten Busbar mit 2 mm Padlänge. Analog zur Gleichung 4.28 lässt sich der Busbaranteil zum Serienwiderstand berechnen. Für eine mittels Profilometer gemessene Busbarhöhe von $4,2 \mu\text{m}$ und der Annahme des spezifischen Busbarwiderstandes ρ_{bb} gleich $3 \mu\Omega \text{cm}$ ergibt sich für die 2 mm Padlänge im Vergleich zum durchgezogenen Busbar eine Steigerung des Serienwiderstands um $0,04 \Omega \text{cm}^2$, was die gemessenen R_s unter Berücksichtigung der Standardabweichung bestätigt.

Da die Intention für dieses Experiment die Reduzierung des Silberpastenverbrauchs und nicht eine mögliche Wirkungsgradsteigerung ist, dienen die IV Daten nur der Überprüfung der Anwendung des segmentierten Busbars.

Für die Beurteilung des segmentierten Busbars ist in Abbildung 6.8 der Silberpastenverbrauch der Busbars für die verschiedenen Längen der Pads über die Busbarfläche aufgetragen. Der durchgezogene Busbar markiert dabei den Ausgangspunkt, von dem aus die Busbarfläche in Prozent reduziert wird. Angefangen mit einer Reduzierung der Busbarfläche um ca. 24% mit dem 5 mm Pad bis zu knapp 45% mit dem 2 mm Pad.

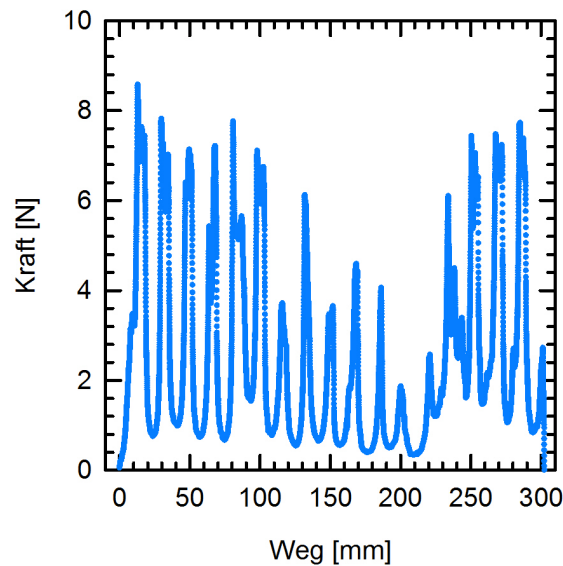


Abb. 6.9: Abrisskraft des segmentierten Busbars mit 3 mm Padlänge und Einsatz einer nicht-durchfeuernden Busbarpaste. Die gemessene Kraft wurde nicht durch die Breite der Pads (1,3 mm) bzw. die Breite der Verbindungslinien der Pads (0,5 mm) geteilt. Anschaulich zeigen die Ausschläge nach oben die Bereiche der Pads und die Ausschläge nach unten die Bereiche der Verbindungslinien. Unter Einbeziehung der Busbarfläche wird der Abrisstest bestanden.

Der verringerte Pastenverbrauch passt prozentual für die 5 mm und 4 mm Padbreite zur reduzierten Busbarfläche. Dagegen ist bei Verwendung der 3 mm und 2 mm Pads ein um ca. 2 mg niedrigerer Silberpastenverbrauch hinsichtlich der reduzierten Fläche erwartet worden.

Insgesamt ist durch die verringerte Busbarfläche eine Reduzierung des Silberpastenverbrauchs von 22,7 mg im Fall von standardmäßig durchgezogenen Busbars bis auf minimal 14,2 mg für segmentierte Busbars mit 2 mm Padlänge für das vorgegebene 3 Busbar Layout mit 1,3 mm Breite ohne Wirkungsgradverlust möglich. Dies entspricht bei einem Silberpreis von \$500/kg (Stand Oktober 2015) und einem Zellwirkungsgrad von 20,7% einer Ersparnis von \$0,09 Cent/ W_p durch die Anwendung eines segmentierten Busbars im Vergleich zu einem standardmäßig durchgezogenen Busbar. Dieses Ergebnis ist ein weiterer Baustein für die Kostensenkung des Metallisierungsprozesses durch Einsparung von Silberpaste auf der Solarzellenvorderseite.

Mit Anwendung des segmentierten Busbars wurde im Rahmen dieser Arbeit auch der zum damaligen Zeitpunkt niedrigste in der Literatur berichtete Silberpastenverbrauch für eine siebgedruckte Siliziumsolarzelle von 67,7 mg [131] bei einem Wirkungsgrad von 19,8% erzielt. Dieser Silberpastenverbrauch teilt sich in 47,0 mg für die Kontaktfinger und 20,7 mg für die segmentierten Busbars auf. Das angewendete segmentierte Busbar Layout hatte dabei eine Padlänge von 3 mm. Um die Tauglichkeit des segmentierten Busbars mit nicht-durchfeuernder Silberpaste für die Modulverschaltung zu belegen, ist in Abbildung 6.9 die Kraft während eines Abrisstests von aufgelöteten Verbinderbändchen dargestellt.

Zum Bestehen des Abrisstests wird eine minimale Kraft von 1 N pro Millimeter Verbindungsbreite zwischen Busbar und Bändchen vorausgesetzt [119]. Die Bereiche der Pads, die die Ausschläge nach oben darstellen, erzielten Werte zwischen 1,9 N und 8,6 N. Damit wird bei einer Busbarbreite von 1,3 mm der Test bestanden. Auch die Bereiche mit den zwei 250 μm breiten Linien, die die Pads verbinden, erzielten unter Einbeziehung der Fläche größtenteils Werte von 1,5 N/mm.

6.3 Multi-Busbar Layout

Neben der gezeigten Reduzierung des Silberpastenverbrauchs bei gleichbleibendem Wirkungsgrad ist ebenso die Steigerung des Wirkungsgrades durch ein angepasstes Busbar Layout möglich. Ein interessanter Ansatz dafür ist die Anzahl der Busbars (BB) zu erhöhen, wie dies vom Grundsatz her bei Multi-Wire Modulverbindungstechniken [132–134] angewendet wird. Da der Anteil des Fingerwiderstandes zum Serienwiderstand von der Fingerlänge zwischen zwei Busbars abhängt (siehe Kapitel 4.4), wird durch eine vermehrte Anzahl von Busbars die Fingerlänge dazwischen und damit der Serienwiderstandsverlust der Vorderseite reduziert. Gleichzeitig können ein größerer Fingerabstand und eine schmalere Fingerbreite gewählt werden ohne einen Anstieg des Serienwiderstandes. Dies reduziert die Abschattungsverluste und den Silberpastenverbrauch.

Experimentelle Ergebnisse mit Siebdruck und einem Multi-Busbar Layout wurden von *Söderström et al.* [135] veröffentlicht. Verglichen wurden im Modul 3 Busbars zu 5 Busbars. Dabei wurde nur der Einfluss einer geringeren Fingerlänge zwischen den Busbars auf den Füllfaktor untersucht, während die Metallisierungsbreite von 4,5 mm mit 3 Busbars (je 1,5 mm) auf 5,0 mm mit 5 Busbars (je 1,0 mm) anstieg.

Im folgenden Versuch wird ein 5 Busbar Layout auf PERC Solarzellen angewendet, was durch eine Breite von 0,5 mm je Busbar im Vergleich zu dem Ergebnis aus der Literatur einen zusätzlichen Gewinn durch die geringere Metallisierungsfläche verspricht. Eine Busbarbreite von 0,5 mm ist sehr anspruchsvoll für die heutige Modulverbindungstechnik. Dennoch sind Kupferverbindungsbändchen mit einer Breite von nur 0,8 mm bereits in der Entwicklung [136]. In Kombination mit anderen Weiterentwicklungen ist die Verschaltung von 0,5 mm schmalen Busbars wahrscheinlich in den nächsten Jahren industriell realisierbar. An den Experimenten angeschlossen folgt eine Abschätzung des Wirkungsgradpotenzials für ein Multi-Busbar Layout mit einem analytischen Modell. Für eine weiterreichende Analyse wird der Einfluss der Fingerhöhe, der Rauigkeit der Kontaktfinger und des Silberpastenverbrauchs auf den Wirkungsgrad für Multi-Busbar Layouts simuliert und mit den Ergebnissen der Simulationen für 3 Busbars aus Kapitel 5.4.4 verglichen.

6.3.1 Prozessierung PERC Solarzellen

Es werden vier verschiedene Gruppen untersucht, die sich in der Anzahl der Busbars, dem Druckprozess und dem verwendeten Rakel unterscheiden, vgl. Tabelle 6.2. Das konventionelle 3 Busbar (BB) Layout hat eine Breite von 1,3 mm je BB, also insgesamt

3,9 mm Busbarbreite. Das 5 BB Layout hat eine Breite von 0,5 mm je BB, zusammen also 2,5 mm. Die 3 BB resultieren damit in einer Metallisierungsfläche von 2,5%, während durch das 5 BB Layout diese Fläche auf 1,6% verringert wird. Als Drucktechniken werden der Print-on-Print (PoP) und der Dual Print (DP) Prozess verwendet. Beim PoP wird die Siebkombination 40/50 μm angewendet, die Schablone beim DP hat eine Fingeröffnung von 40 μm . Abhängig von der Busbaranzahl und dem Druckprozess wird für die Siebe und Schablonen eine optimierte Fingeranzahl nach den Formeln von *Mette* [2] berechnet. Für den DP wird neben dem auch beim PoP benutzten Polyurethanraker zusätzlich in einer Gruppe das Metallraker verwendet, um ein größeres Aspektverhältnis der Finger zu erzielen. Als Silberpaste für die Kontaktfinger wird für alle vier Gruppen die selbe Siebdruck- und keine spezielle Schablonendruckpaste verwendet. Beim Dual Print werden die Busbars mit einer nicht-durchfeuernden Paste gedruckt. Der finale Emitterschichtwiderstand auf den Solarzellen beträgt 70 Ω/sq .

6.3.2 Analyse der Fingergeometrien

Eine Übersicht der Vorderseitengeometrie und Druckparameter der verschiedenen Gruppen dieses Experiments ist in Tabelle 6.2 dargestellt. Die gedruckten und gefeuerten Finger werden mittels Lichtmikroskop und optischem Profilometer analysiert. Die zugehörigen Bilder sind in Abbildung 6.10 a) bis f) für die Gruppen 1, 3 und 4 gezeigt. Gruppe 2 ist nicht dargestellt, da der Druckprozess sowie die Sieböffnung und das verwendete Raker die gleichen wie für Gruppe 1 sind. Die durchschnittlichen Fingerbreiten sind in Tabelle 6.2 aufgeführt. Während der PoP Prozess in Fingerbreiten zwischen 62 μm und 66 μm resultiert, reduziert sich die Fingerbreite mit dem Dual Print durch die schmalere Fingeröffnung auf 46 μm für Gruppe 3 bzw. 48 μm für Gruppe 4. Die Metallisierungsfläche der Finger reduziert sich von 3,3% für 3 BB mit PoP auf 2,9% für 5 BB mit PoP. Davon sind 0,2%_{abs} zurückzuführen auf die schmalere Fingerbreite und weitere 0,2%_{abs} auf die geringere Fingeranzahl.

Die beiden Gruppen mit 5 BB und Dual Print erzielen mit 2,4% (Gruppe 3) bzw. 2,5%

Tab. 6.2: Parameter der Vorderseitenmetallisierung für vier verschiedene Gruppen von PERC Solarzellen mit der Anzahl der Busbars (BB), der Drucktechnik (PoP = Print-on-Print, DP = Dual Print), dem Rakertyp, der Busbarbreite und die zugehörige BB Metallisierungsfläche sowie die gemessene durchschnittliche Fingerbreite und die zugehörige Metallisierungsfläche der Finger.

Gruppe	# BB	Druck- technik	Rakertyp	Busbar- breite [mm]	Busbar- fläche [%]	Finger- breite [μm]	Finger- fläche [%]
1	3	PoP	Poly.	1,3	2,5	66	3,3
2	5	PoP	Poly.	0,5	1,6	62	2,9
3	5	DP	Poly.	0,5	1,6	46	2,4
4	5	DP	Metall	0,5	1,6	48	2,5

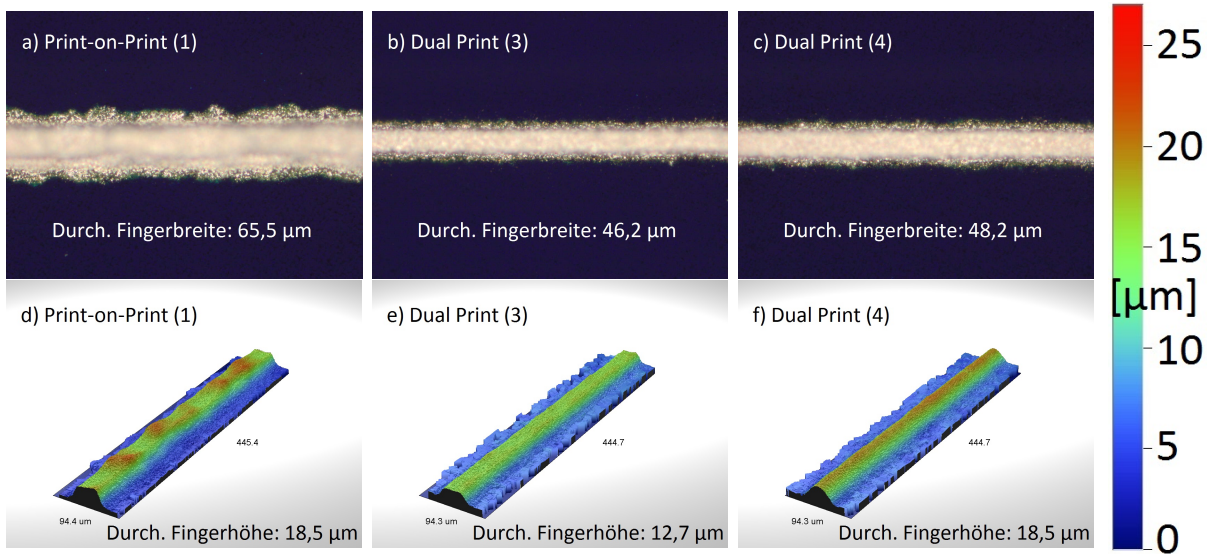


Abb. 6.10: Aufnahmen mit dem Lichtmikroskop (oben) und optischen Profilometer (unten) von gedruckten und gefeuerten Silberkontaktfingern auf PERC Solarzellen aus Tabelle 6.2 mit a) + d) Print-on-Print (Gruppe 1), b) + e) Dual Print mit Polyurethanraket (Gruppe 3) und c) + f) Dual Print mit Metallraket (Gruppe 4). Die aufgeführten durchschnittlichen (Durch.) Fingerbreiten wurden mittels Lichtmikroskop bestimmt, die durchschnittlichen Fingerhöhen aus den Profilometermessungen.

(Gruppe 4) eine um $0,4\%_{\text{abs}}$ bis $0,5\%_{\text{abs}}$ niedrigere Metallisierungsfläche der Finger im Vergleich zur Gruppe 2 nur durch die schmalere Fingerbreite von $46\ \mu\text{m}$ bis $48\ \mu\text{m}$, da das verwendete Dual Print Layout sieben Kontaktfinger mehr hat als das Print-on-Print Layout bei 5 BB. Insgesamt wird damit der Metallisierungsanteil der Finger und Busbars von $5,8\%$ für das konventionelle 3 BB Layout mit PoP auf $4,0\%$ für das 5 BB Layout mit dem besten Dual Print Prozess reduziert. Bei den Fingerhöhen zeigen sich die aus Kapitel 5 bekannten Rauigkeiten der Druckprozesse. Der PoP erzielt durchschnittliche Fingerhöhen von $18,5\ \mu\text{m}$, während der DP mit dem gleichen Polyurethanraket nur Fingerhöhen von durchschnittlich $12,7\ \mu\text{m}$ erreicht, dafür aber mit einer geringeren Rauigkeit. Das Metallraket dringt im Gegensatz zum weichen Polyurethanraket nicht in die Fingeröffnungen der Schablone und vergrößert infolgedessen die Fingerhöhe der Gruppe 4 um durchschnittlich $5,8\ \mu\text{m}$ im Vergleich zur Gruppe 3 beim Dual Print.

6.3.3 Ergebnisse PERC Solarzellen

Tabelle 6.3 fasst die Resultate der besten PERC Solarzellen aus jeder Gruppe mit den verschiedenen BB Layouts und Druckprozessen zusammen. Vor dem Test der IV Parameter wurden die PERC Solarzellen unter Beleuchtung für sechs Stunden bei $140\ ^\circ\text{C}$ getempert, um im Silizium vorhandene Bor-Sauerstoff-Komplexe, die zu einer Degradation der Basislebensdauer führen [137], durch den von *Lim* [138] eingeführten Prozess zu deaktivieren.

Die konventionelle 3 BB PERC Solarzelle mit Print-on-Print erzielt einen unabhängig

Tab. 6.3: IV Parameter der besten PERC Solarzellen für die Gruppen aus Tabelle 6.2. Gemessen unter Standard-Testbedingungen (25 °C, AM1.5G, 100 mW/cm²). Zusätzlich ist der Fingerwiderstandsanteil R_{finger} am Serienwiderstand R_s nach Gleichung 4.28 aufgeführt. Der unabhängig bestätigte Wirkungsgrad von 21,2% war zum Zeitpunkt der Veröffentlichung [37] der Weltrekordwirkungsgrad für Siliziumsolarzellen mit beidseitig gedruckten Metallkontakten.

Gruppe	# BB	Druck- technik	Rakeltyp	η [%]	J_{sc} [mA/cm ²]	V_{oc} [mV]	FF [%]	R_{finger} [Ωcm^2]
1	3	PoP	Poly.	20,6*	38,9	658	80,5	0,13
2	5	PoP	Poly.	21,2*	39,6	661	80,9	0,05
3	5	DP	Poly.	21,2*	39,8	662	80,6	0,09
4	5	DP	Metall	21,2*	39,8	661	80,7	0,08

*unabhängig bestätigt vom Fraunhofer ISE CalLab

bestätigten Wirkungsgrad von 20,6%, was ein typischer Wert für diesen Basisprozess am ISFH ist. Die besten 5 BB PERC Solarzellen erreichen unabhängig bestätigte Wirkungsgrade von 21,2%, was zum Zeitpunkt der Veröffentlichung [37] der Weltrekordwirkungsgrad für Siliziumsolarzellen mit beidseitig gedruckten Metallkontakten war. Der vorherige Weltrekordwirkungsgrad für die gleiche Zellstruktur lag bei 21,0% [5].

Der Wirkungsgradgewinn von 0,6%_{abs} der 5 BB Zellen gegenüber der 3 BB Zelle ist hauptsächlich auf den Anstieg der Kurzschlussstromdichte J_{sc} von 38,9 mA/cm² auf bis zu 39,8 mA/cm² zurückzuführen. Die Verbesserung in J_{sc} der 5 BB PERC Solarzellen rührt von der bis zu 1,8%_{abs} niedrigeren Metallisierungsfläche her, die sich aufteilt in 0,9%_{abs} von der reduzierten BB Fläche und 0,9%_{abs} von der reduzierten Fingerfläche, wie in Tabelle 6.2 aufgeführt. Die Leerlaufspannung V_{oc} steigt von 658 mV für das 3 BB PoP Layout auf 661 mV für das 5 BB PoP Layout. Der Anstieg der 5 BB PERC Zelle in V_{oc} lässt sich auf die reduzierte Fläche der Vorderseitenmetallisierung zurückführen. Durch den Einsatz der nicht-durchfeuernden BB Paste beim Dual Print wird die Emitterrekombination weiter verringert und führt zur höchsten V_{oc} von 662 mV.

Zusätzlich erhöht sich durch das 5 BB Layout der Füllfaktor FF auf bis zu 80,9% im Vergleich zu 80,5% für das 3 BB Layout, was auf einen verringerten Widerstandsverlust zurückzuführen ist. Dieser entspringt dem reduzierten Fingerwiderstandsanteil R_{finger} am Serienwiderstand, siehe Tabelle 6.3. Die Werte für R_{finger} werden berechnet aus den gemessenen Fingerlinienwiderständen, die Werte von 0,32 Ω/cm für PoP, 0,64 Ω/cm für DP Gruppe 3 und 0,56 Ω/cm für DP Gruppe 4 annehmen, und Gleichung 4.28 aus Kapitel 4.4.

Das Ergebnis dieses Experiments zeigt, dass insbesondere die Verringerung der Metallisierungsfläche der Vorderseite und die dadurch erzielte Steigerung der Kurzschlussstromdichte J_{sc} für die Erhöhung des Wirkungsgrades über 21,0% verantwortlich ist.

6.3.4 Modellierung des Wirkungsgradpotenzials für ein Multi-Busbar Layout

Zusätzlich zu den gezeigten experimentell erzielten Ergebnissen folgt eine Abschätzung des Wirkungsgradpotenzials für ein Multi-Busbar Layout nach einem analytischen Modell von *Mette* [2]. Das Modell basiert auf der Berechnung von relativen Leistungsverlusten durch die optische Abschattung und die elektrischen Widerstände der Vorderseite. Veränderungen der Leistungsverluste in der Solarzelle durch Ladungsträgerrekombination an der Vorderseite werden in diesem einfachen Modell vernachlässigt.

Modelliert wird die Abhängigkeit des Wirkungsgrads η von der Vorderseitenmetallisierung. Diese berücksichtigt den relativen Leistungsverlust p_s durch die optische Abschattung des Vorderseitengrids inklusive der Busbars und den relativen Leistungsverlust p_e durch die elektrischen Widerstände des Vorderseitengrids mit der Gleichung

$$\eta = \eta_0 (1 - p_s - p_e). \quad (6.3)$$

Die relativen Leistungsverluste sind einheitslos. Der Parameter η_0 beschreibt den Wirkungsgrad ohne Leistungsverluste durch die Abschattung und Widerstände der Vorderseitenmetallisierung. Zur Bestimmung von η_0 wird der Wirkungsgrad einer Solarzelle verwendet, deren Leistungsverluste durch Messung und Berechnung der einzelnen Anteile bekannt sind. Dafür wird die Solarzelle mit einem konventionellen 3 Busbar Layout und unabhängig bestätigtem Wirkungsgrad von 20,62% aus Tabelle 6.3 benutzt. Um mit einem bekannten Leistungsverlust von 8,48% diesen Wirkungsgrad zu modellieren, wird $\eta_0 = 22,53\%$ gesetzt.

Die Gleichung für den relativen Leistungsverlust p_s durch die optische Abschattung ist [2]

$$p_s = \frac{\frac{s}{2} \cdot \frac{w_b}{2}}{\frac{s}{2} a} + \frac{l_f \cdot \frac{w_f}{2}}{\frac{s}{2} a} = \frac{s \cdot \frac{w_b}{2} + l_f \cdot w_f}{s \cdot a}. \quad (6.4)$$

Zur Berechnung dieser Formel wird die Fläche der Metallisierung durch die Gesamtfläche der Solarzelle geteilt. Diese Berechnung wird auf eine Einheitszelle bezogen mit dem Fingerabstand s und der Länge a als halber Abstand zweier benachbarter Busbars, wie in Abbildung 4.2 in Kapitel 4 dargestellt. Dementsprechend ist $s/2$ die Breite und a die Länge der Einheitszelle, welche das Vorderseitenlayout beschreibt. Der halbe Fingerabstand s mal der halben Busbarbreite w_b entspricht dem Abschattungsverlust durch den Busbar in der Einheitszelle. Die Fingerlänge l_f multipliziert mit der halben Fingerbreite w_f berechnet den Abschattungsverlust der Finger.

Die Verlustleistung der elektrischen Widerstände setzt sich zusammen aus deren einzelnen Verlustanteilen. Der Verlustanteil von jedem individuellen Widerstand ist das Verhältnis der Verlustleistung durch den Widerstand in einer Einheitszelle zur maximalen Leistung, die theoretisch in dieser Einheitszelle erreicht werden kann. Nach *Mette* [2] wird der relative Leistungsverlust durch die elektrischen Widerstände p_e beschrieben durch

$$p_e(R_{\text{sum}}) = \frac{J_{\text{mpp}} \cdot R_{\text{sum}}}{V_{\text{mpp}} + R_{\text{sum}} \cdot J_{\text{mpp}}} (1 - p_s). \quad (6.5)$$

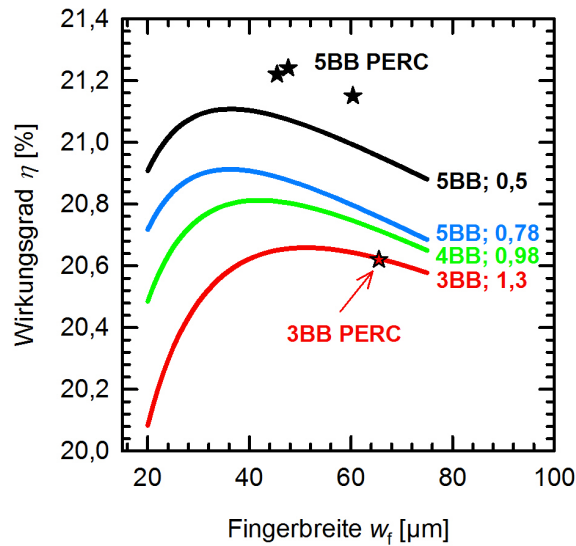


Abb. 6.11: Abhängigkeit des Wirkungsgrads von PERC Solarzellen von der Breite der Kontaktfinger mit unterschiedlichen Busbar (BB) Layouts [139]. Die Linien stellen analytisch berechnete Werte des Wirkungsgrads da. Die Beschriftung an den Linien bezeichnet die Anzahl der BB sowie die Breite eines einzelnen BB in mm. Zusätzlich zeigen die sternförmigen Daten die gemessenen Wirkungsgrade aus Tabelle 6.3. Der berechnete Wirkungsgrad steigt mit höherer Anzahl BB durch den verringerten Widerstand und mit schmalere BB durch die verringerte Abschattung.

Hierbei sind J_{mpp} und V_{mpp} die Stromdichte und die Spannung am Punkt der maximalen Leistung. R_{sum} ist die Summe des Emitterwiderstandes R_{emitter} , des Kontaktwiderstandes R_{contact} und des Fingerwiderstandes R_{finger} . Die restlichen Widerstandsbeiträge in der Solarzelle wie der Basiswiderstand R_{base} oder der Rückseitenwiderstand R_{rear} werden an dieser Stelle nicht berücksichtigt, da sie unabhängig vom Vorderseitenlayout sind. Die Formeln zur Berechnung der Widerstände sind in Kapitel 4.4 aufgeführt.

Für die Berechnung der aufgeführten Gleichungen werden typische Werte für die am ISFH hergestellten Siebdrucksolarzellen verwendet, die auf eigenen Messungen basieren. Es wird ein R_{sheet} von $70 \Omega/\text{sq}$ angenommen, ein spezifischer Kontaktwiderstand $\rho_c = 1,5 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$ und ein spezifischer Widerstand $\rho_f = 3 \mu\Omega\text{cm}$ der Silberpaste. Die Fingerbreite w_f wird als Variable in den Berechnungen verwendet, wobei zu jeder Fingerbreite ein konstantes Aspektverhältnis der Finger von 0,25 angenommen wird. Dieser Wert wird auf Basis des Fingerprofils der 20,6% PERC Solarzelle aus Abbildung 6.10 mit Print-on-Print gewählt. Da das Fingerprofil nicht kastenförmig ist, wird ein Fingerprofil in Trapezform angenommen, wobei die obere Fingerbreite gleich $2/3$ mal der unteren Fingerbreite w_f ist. Die Busbarbreite w_b wird je nach Busbar Layout variiert, der halbe Busbarabstand a wird berechnet durch die Anzahl der Busbars auf einem 156 mm großen Wafer. Für jedes Busbar Layout und für jede Fingerbreite wird der optimale Fingerabstand s mit dem geringsten Leistungsverlust verwendet.

Abbildung 6.11 zeigt die modellierte Abhängigkeit des Wirkungsgrads von der Fingerbreite für verschiedene Busbargeometrien bei Anwendung der Gleichungen 6.3 bis 6.5.

Für die erste Betrachtung wird von einer festen Gesamtbreite der Busbars von 3,9 mm ausgegangen, d.h. 3 BB mit je 1,3 mm, 4 BB mit je 0,975 mm oder 5 BB mit je 0,78 mm. Dadurch bleibt der Abschattungsverlust durch die Busbars für alle drei Fälle konstant. Je breiter die Kontaktfinger gewählt werden, desto geringer ist der Wirkungsgradgewinn mit mehr als 3 Busbars. Der beste Wirkungsgrad von 20,66% für 3 BB wird bei einer Fingerbreite von 51 μm errechnet. Bei der gleichen Fingerbreite erhöht sich η mit 4 BB auf 20,79% und mit 5 BB auf 20,86% durch den verringerten Widerstand der Kontaktfinger. Durch schmalere Kontaktfinger von 36 μm in Verbindung mit dem 5 BB Layout und 0,78 mm Busbarbreite steigt der berechnete Wirkungsgrad auf 20,91%.

Vergleicht man zusätzlich das in diesem Kapitel experimentell verwendete Busbar Layout mit 5 BB und einer einzelnen Busbarbreite von 0,5 mm, liegt das Maximum für beide 5 BB Fälle bei der selben Fingerbreite von 36 μm , aber durch die geringe BB Abschattung bei 0,5 mm schmalen Busbars wird eine Steigerung des Wirkungsgrads auf 21,11% modelliert. Zusätzlich zu den modellierten Werten sind als sternförmige Datenpunkte die unabhängig bestätigten Wirkungsgrade aus Tabelle 6.3 mit eingezeichnet. Da die Modellierung auf der 20,6% Zelle mit 3 BB basiert, stimmt dieser gemessene Wert mit dem berechneten überein. Die Differenz zwischen den berechneten und den gemessenen Werten für 5 BB mit 0,5 mm Breite beträgt ca. 0,1%_{abs}, was auf die im Modell nicht berücksichtigte Veränderung der Rekombination und damit der V_{oc} zurückzuführen ist. Nach Tab. 6.3 führt die Verringerung der Metallisierungsfläche des Emitters mit 5 BB zu einem V_{oc} Gewinn von 3 mV bis 4 mV im Vergleich zur 20,6% Zelle mit 3 BB, was einer Wirkungsgradsteigerung von ca. 0,1%_{abs} entspricht und damit in Einklang mit der Modellierung steht.

6.3.5 Simulation der Kontaktfinger in Multi-Busbar Layouts

Nachdem anhand des analytischen Modells in einfacher Form das Wirkungsgradpotenzial von Multi-Busbar Layouts und der zusätzlichen Reduzierung der Busbarfläche gezeigt wurde, folgt eine ausführlichere Betrachtung der gegenseitigen Auswirkung von Busbar Layout und Kontaktfinger mittels Simulationen. Es werden die Simulationen aus Kapitel 5.4.4 durchgeführt und mit den Ergebnissen für 3 Busbars verglichen. Der Aufbau der Simulation und die getätigten Annahmen und eingesetzten Werte können Kapitel 5.4.4 entnommen werden.

Im Folgenden werden durch die SPICE Simulationen drei Einflussmechanismen der Kontaktfinger auf den Wirkungsgrad einer PERC Solarzelle mit 3 bis 5 Busbars untersucht: die Fingerhöhe, die Rauigkeit entlang der Kontaktfinger und der Silberpastenverbrauch der Finger.

Einfluss der Fingerhöhe

Zur Untersuchung des Einflusses der Fingerhöhe wird angenommen, dass auf der ganzen Solarzelle ein konstanter Wert für die Fingerhöhe gilt. Die Kontaktfinger haben somit eine Rauigkeit von Null. Die Fingerhöhe für die verschiedenen Simulationen variiert zwischen 25 μm und 1 μm . Die SPICE Simulationen der Fingerhöhen werden für drei, vier und

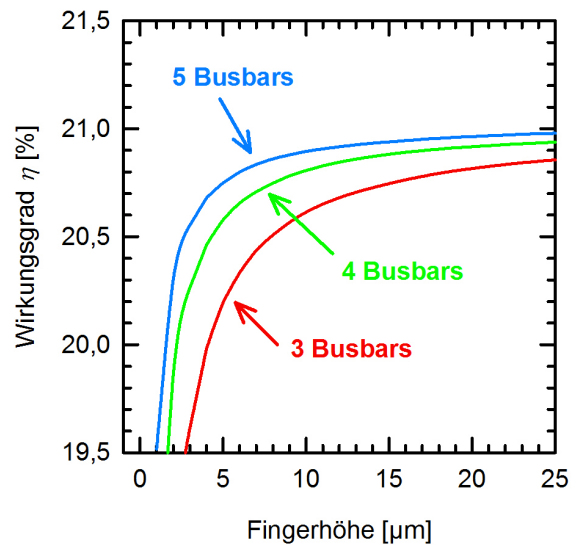


Abb. 6.12: Ergebnisse der numerischen Simulation von PERC Solarzellen mit drei bis fünf Busbars und unterschiedlicher Fingerhöhe. Jede simulierte Fingerhöhe wird auf der ganzen Solarzelle bei einer Rauigkeit von Null als konstant angenommen. Je weiter man zu kleineren Fingerhöhen geht, desto mehr wirkt sich der Vorteil der größeren Anzahl Busbars aus.

fünf Busbars durchgeführt. Die Busbarfläche bleibt bei allen Simulationen gleich. Die Gesamtbreite der Busbars von 3,9 mm teilt sich für 3 Busbars auf zu je 1,3 mm, bei 4 Busbars zu je 0,975 mm und für 5 Busbars zu je 0,78 mm. Es werden die konstanten Werte aus Tabelle 5.6 als SPICE Inputparameter für die Simulation verwendet. Die Ergebnisse der Simulation der Fingerhöhe sind in Abbildung 6.12 dargestellt.

Für die größte simulierte Fingerhöhe von 25 μm gibt es nur geringe Unterschiede im Wirkungsgrad zwischen der Anzahl der Busbars. Für 5 Busbars wird ein Wirkungsgrad von 20,98% simuliert, für 4 Busbars ein Wert von 20,94% und für 3 Busbars 20,86%. Zu erkennen ist ebenso, dass bis zu einer Fingerhöhe von minimal 15 μm die Differenz zwischen der verschiedenen Busbaranzahl klein bleibt mit maximal $\Delta\eta = 0,2\%_{\text{abs}}$. Für 3 Busbars ist eine Fingerhöhe von mindestens 8 μm nötig, um Wirkungsgrade über 20,5% mit diesem Parametersatz für PERC Solarzellen zu erzielen. Je weiter man zu kleineren Fingerhöhen geht, desto mehr wirkt sich der Vorteil der höheren Anzahl Busbars aus, bei denen ein größerer Linienwiderstand den Serienwiderstand weniger stark erhöht durch den kleineren Abstand der Busbars. So wird selbst mit Fingerhöhen von nur noch 3 μm bei 5 Busbars ein Wirkungsgrad von 20,55% erreicht. Das Ergebnis der Simulation zeigt, dass für große Fingerhöhen um 20 μm der Gewinn durch eine höhere Anzahl Busbars gering ist, aber im Hinblick auf die Reduzierung des Silberpastenverbrauchs der Finger und damit einhergehend eine Reduzierung der Fingerhöhe mehr als 3 Busbars nötig sind, um Wirkungsgradverluste zu minimieren.

Einfluss der Rauigkeit

Als weiterer Parameter wird die Rauigkeit der Fingerhöhe entlang des Fingers simuliert. Die Rauigkeit ξ ist nach Kapitel 5.4.4 definiert als die Differenz der größten Fingerhöhe $h_{f,\max}$ und der kleinsten Fingerhöhe $h_{f,\min}$ eines Kontaktfingers:

$$\xi = h_{f,\max} - h_{f,\min}. \quad (6.6)$$

Wie in den Simulationen in Kapitel 5.4.4 werden zusätzliche Widerstandselemente nach Gleichung 5.7 in die Simulation eingebaut, die Fingerhöhen zwischen den beiden Extremwerten darstellen. Die mit den Fingerhöhen berechneten Widerstandswerte werden zufällig und annähernd zu gleichen Teilen auf die einzelnen Widerstandselemente in der SPICE Simulation verteilt. Für die Untersuchung der Rauigkeit ξ wird die maximale Fingerhöhe $h_{f,\max}$ zwischen 25 μm und 5 μm variiert. Für jedes dieser Maxima werden die minimalen Fingerhöhen $h_{f,\min}$ variiert in 1 μm Schritten vom maximalen Wert bis zu 1 μm . Die Simulationen werden für vier und fünf Busbars durchgeführt und mit dem Ergebnis für drei Busbars aus Kapitel 5.4.4 verglichen. Die Fingeranzahl von 90 und die Gesamtbreite der Busbars von 3,9 mm bleibt für jede Anzahl der Busbars gleich. Die Abbildungen 6.13 a) - c) stellen das Ergebnis der numerischen Simulation von PERC Solarzellen mit 3 bis 5 Busbars und unterschiedlichen Rauigkeiten der Fingerhöhe graphisch dar.

Die Simulationen zeigen im Vergleich der Busbar Layouts, dass das Wirkungsgradniveau insgesamt höher liegt, je mehr Busbars verwendet werden, unabhängig von der Fingerhöhe und der Rauigkeit. Zudem nimmt mit einer erhöhten Anzahl von Busbars die Sensitivität des Wirkungsgrades durch das Fingerprofil ab. Dieser Effekt ist durch die kürzere Wegstrecke der Ladungsträger durch die Finger zu den Busbars zu erklären, wodurch eine Veränderung des Fingerlinienwiderstandes eine geringere Auswirkung auf den Serienwiderstand hat.

Zusätzlich zu den berechneten Fingerhöhen wird wie in Kapitel 5.4.4 mit dem besten gemessenen Fingerprofil für eine Fingeröffnung von 40 μm der drei Drucktechniken Single Print, Print-on-Print und Dual Print der Wirkungsgrad simuliert. Die Fingerhöhe $h_{f,\max}$ beträgt beim Single Print 16,79 μm , beim Print-on-Print 18,22 μm und beim Dual Print 28,44 μm . Die Ergebnisse dazu sind in den drei Graphiken 5.23 a) - c) als zusätzliche Datenpunkte implementiert.

Wie schon für die 3 Busbars simuliert, bleibt der Wirkungsgradunterschied zwischen Dual Print und Print-on-Print auch für 4 und 5 Busbars zwischen 0,1%_{abs} und 0,2%_{abs}. Dagegen lässt sich erkennen, wie der Single Print für 4 und 5 Busbars die Wirkungsgraddifferenz im Vergleich zu den anderen beiden Drucktechniken verringert. Während die Differenz zwischen Dual Print und Single Print bei 3 Busbars noch bei 0,43%_{abs} liegt, beträgt der Unterschied bei 4 Busbars mit 0,24%_{abs} nur noch etwas mehr als die Hälfte. Für 5 Busbars hat sich die Differenz im Wirkungsgrad zwischen diesen beiden Drucktechniken auf 0,15%_{abs} verringert. Hier zeigt sich die Übereinstimmung zu den simulierten Fingerhöhen, dass für 4 und 5 Busbars der Einfluss der Fingerhöhe $h_{f,\max}$ sowie der Rauigkeit ξ abnimmt. Dementsprechend kann aus den Simulationen gefolgert werden, dass für Multi-Busbar Layouts der Single Print mit Fingerhöhen kleiner 15 μm und Rauigkeiten

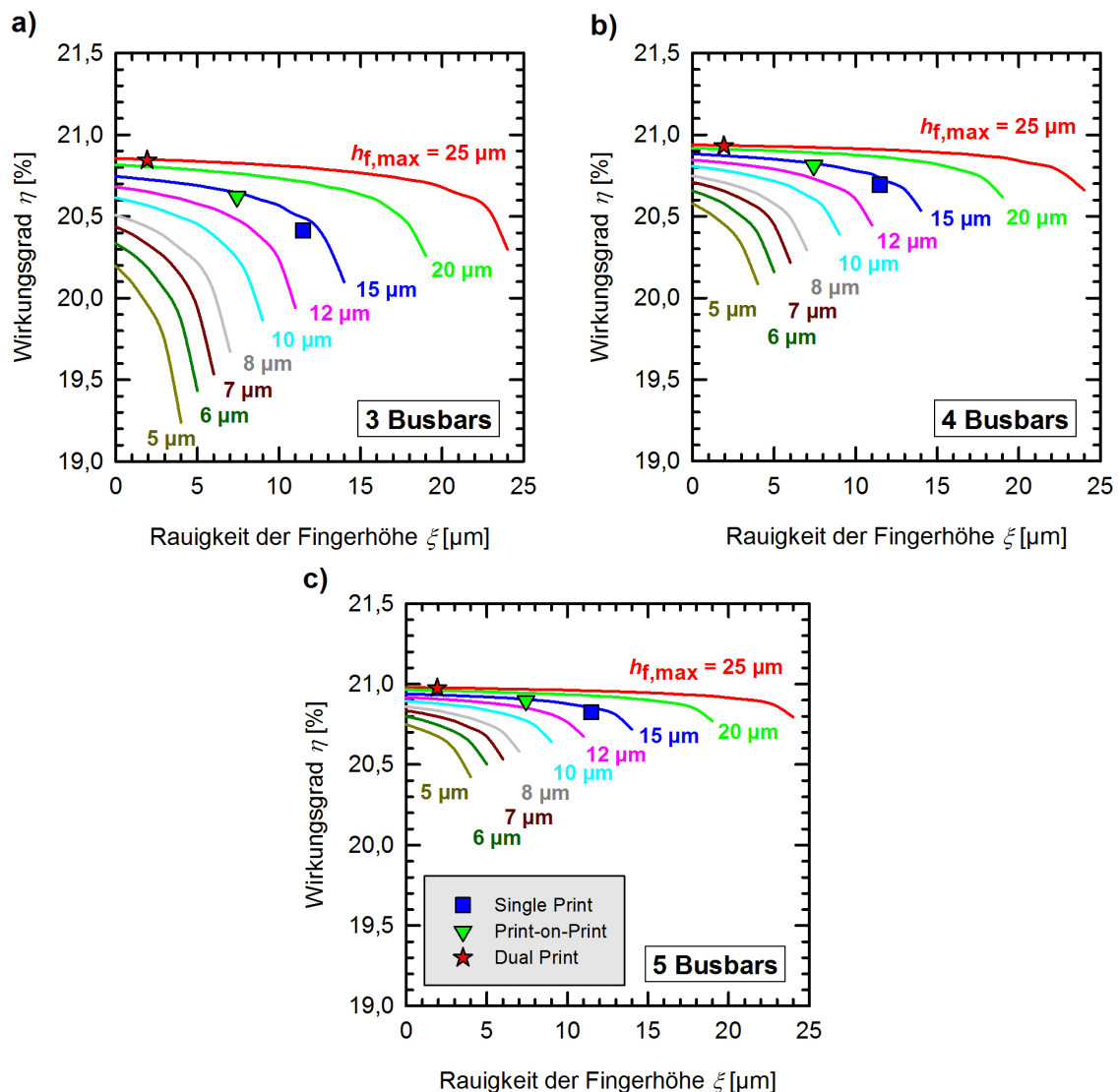


Abb. 6.13: Numerische Simulation des Wirkungsgrades von PERC Solarzellen in Abhängigkeit von der Rauigkeit der Fingerhöhe mit a) 3 Busbars, b) 4 Busbars und c) 5 Busbars. Die Simulationen zeigen, dass sich mit einer erhöhten Anzahl von Busbars die Auswirkung der Rauigkeit der Fingerhöhe auf den Wirkungsgrad reduziert. Die extra Datenpunkte ordnen die besten gemessenen Fingerprofile der drei Drucktechniken in die Simulation ein.

zwischen 5 μm und 10 μm nicht zwangsläufig durch Drucktechniken wie Print-on-Print oder Dual Print ersetzt werden muss, um hohe Wirkungsgrade zu erzielen.

Einfluss des Silberpastenverbrauchs auf den Wirkungsgrad

Wie in Kapitel 5.4.4 wird auch für 4 und 5 Busbars der Einfluss des Fingerpastenverbrauchs durch die simulierten Fingerprofile auf den Wirkungsgrad berechnet. Dazu werden die simulierten Wirkungsgrade mit den verschiedenen Rauigkeiten aus Abbildung

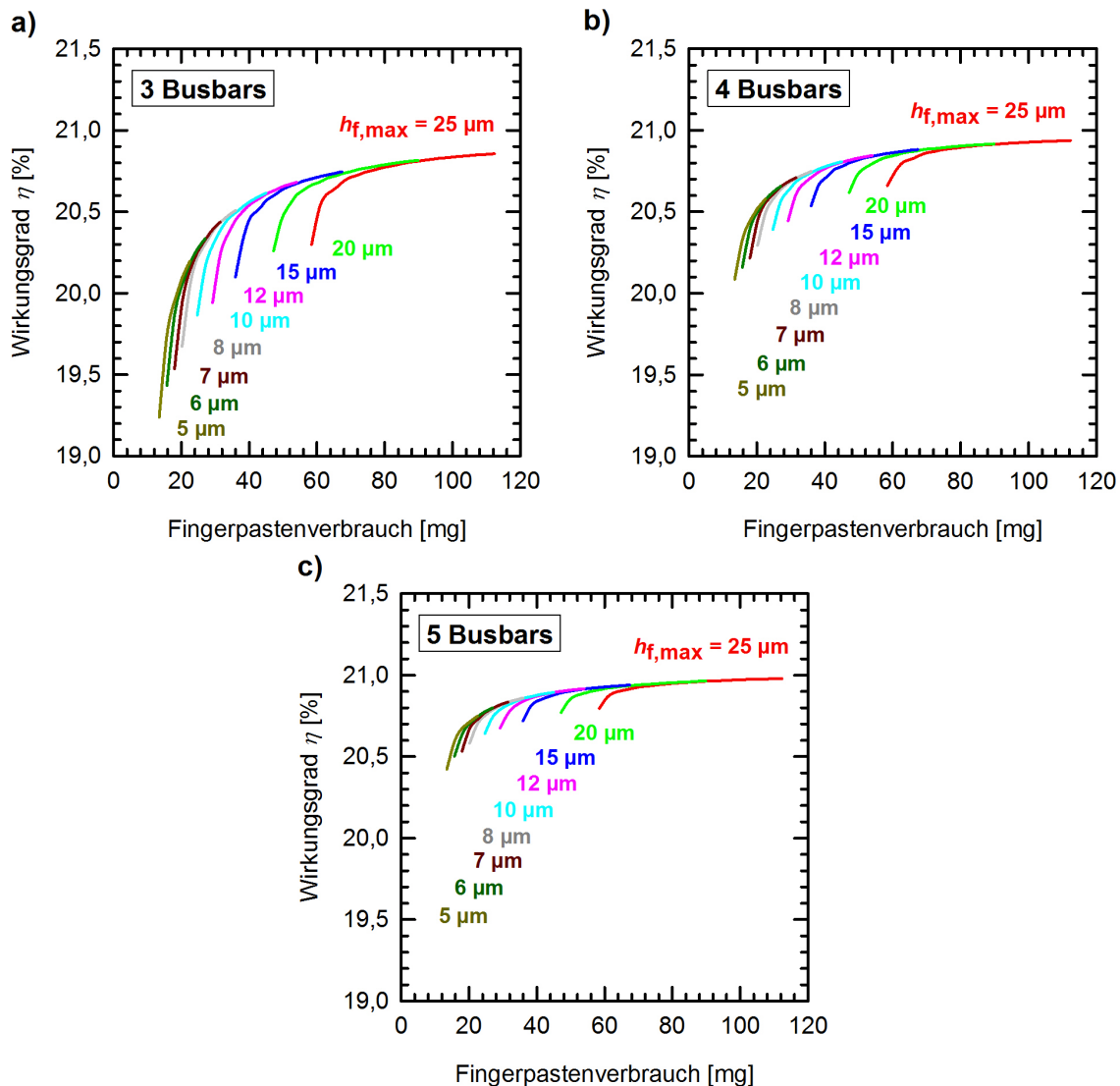


Abb. 6.14: Numerische Simulation des Wirkungsgrades von PERC Solarzellen in Abhängigkeit vom Silberpastenverbrauch der Kontaktfinger mit a) 3 Busbars, b) 4 Busbars und c) 5 Busbars. Der Wirkungsgrad nimmt mit sinkendem Fingerpastenverbrauch ab, wobei sich dieser Effekt für 4 und 5 Busbars im Vergleich zu 3 Busbars abschwächt. Mit einem Multi-Busbar Layout ist es möglich, den Verbrauch der Silberpaste für die Finger ohne deutliche Wirkungsgradverluste über $0,1\%_{\text{abs}}$ zu reduzieren.

6.13 über den entsprechenden Silberpastenverbrauch der Kontaktfinger aufgetragen, wie in Abbildung 6.14 dargestellt. Die Einhüllende der simulierten Wirkungsgrade zeigt die optimale Nutzung der verbrauchten Silberpaste.

Für 3 Busbars nimmt der Wirkungsgrad mit sinkendem Fingerpastenverbrauch um bis zu $1,6\%_{\text{abs}}$ ab. Für 4 BB und 5 BB schwächt sich dieser Effekt sichtbar ab. Um beispielsweise einen Wirkungsgrad von minimal $20,7\%$ zu erzielen, wird mit dem 3 Busbar Layout ein Fingerpastenverbrauch von $58,4 \text{ mg}$ benötigt. Für 4 BB verringert sich diese Pastenmenge

auf 31,4 mg und für 5 BB auf 20,2 mg. Das Ergebnis zeigt insbesondere hinsichtlich der Reduzierung der Materialkosten im Solarzellenproduktionsprozess die Notwendigkeit von mehr als 3 Busbars, um die Verwendung der teuren Silberpaste weiter zu reduzieren. Zusammenfassend zeigen die Simulationen, dass für eine höhere Anzahl Busbars kleinere Fingerhöhen und damit einhergehend ein niedrigerer Silberpastenverbrauch benötigt wird. Zudem zeigen die Ergebnisse bezüglich der Drucktechniken, dass sich mit dem Single Print trotz der höheren Rauigkeit der Finger im Vergleich zum Dual Print ähnliche Wirkungsgrade erzielen lassen bei Verwendung von 5 Busbars, unter der Annahme, dass alle anderen Parameter der Solarzelle gleich sind.

6.4 Zusammenfassung des Kapitels

In diesem Kapitel wurden drei verschiedene Möglichkeiten zur Verbesserung der Busbar Struktur der Vorderseitenmetallisierung gezeigt und analysiert. Für die jeweiligen Kontaktfinger wurde der Schwerpunkt dabei auf die Dual Print Technik gelegt, da dieser nach Kapitel 5 das größte Potenzial zugeschrieben wird.

Durch Verwendung spezieller, theoretisch nicht durch das Siliziumnitrid ätzenden Silberpasten für den Busbardruck und die dadurch bedingte Reduzierung der Emittersättigungsstromdichte unter der Busbarmetallisierung konnte eine Steigerung in der Leerlaufspannung V_{oc} von durchschnittlich bis zu 2 mV erzielt werden. Dieser Gewinn wurde durch geringfügig niedrigere Füllfaktoren im Vergleich zu einer durchfeuernden Silberpaste wieder ausgeglichen. Durch einen geringeren Silberanteil in den nicht-durchfeuernden Pasten konnte ohne Wirkungsgradverluste der Silberpastenverbrauch um 48 mg gesenkt werden, was einer Ersparnis von \$0,45 Cent/ W_p bei einem Silberpreis von \$500/kg entspricht und diese Pasten als Kostensenkungspotenzial attraktiv macht.

Für die weitere Reduzierung des Silberpastenverbrauchs wurde statt eines konventionellen durchgezogenen Busbars ein segmentierter Busbar verwendet, der eine gewisse Anzahl Pads für die IV Messung und als spätere Lötfläche im Modul bereitstellt. Die dadurch bedingte Reduzierung der Busbarfläche beträgt in den durchgeführten Experimenten bis zu 45%. Ohne Wirkungsgradverlust gegenüber dem durchgezogenen Busbar konnte der Silberpastenverbrauch um 8 mg verringert und damit eine weitere Einsparmöglichkeit aufgezeigt werden. Zudem wurde mit dem Layout des segmentierten Busbars auch der zum damaligen Zeitpunkt niedrigste in der Literatur berichtete Silberpastenverbrauch von 67,7 mg [131] für eine siebgedruckte PERC Siliziumsolarzelle bei einem Wirkungsgrad von 19,8% erzielt.

Die dritte untersuchte Verbesserung des Busbar Layouts in Form eines Multi-Busbar Layouts zielte auf eine Wirkungsgradsteigerung der PERC Solarzellen ab. Experimentell wurde ein konventionelles 3 Busbar Layout mit 3,9 mm Gesamtbreite der Busbars zu einem 5 Busbar Layout mit nur 2,5 mm Gesamtbreite verglichen. Durch Anwendung des Dual Print mit 5 Busbars statt des Print-on-Print Prozesses mit 3 Busbars konnte die Fläche der Vorderseitenmetallisierung von 5,8% auf 4,0% gesenkt und die Kurzschlussstromdichte J_{sc} von 38,9 mA/cm² auf bis zu 39,8 mA/cm² erhöht werden. Dies führte zu einem Wirkungsgradgewinn von 0,6%_{abs} der 5 Busbar Zellen gegenüber der 3 Busbar

Zelle. Die besten 5 BB PERC Solarzellen erreichten unabhängig bestätigte Wirkungsgrade von 21,2%, was zum Zeitpunkt der Veröffentlichung [37] der Weltrekordwirkungsgrad für Siliziumsolarzellen mit beidseitig gedruckten Metallkontakten war.

Die experimentell erzielten Ergebnisse wurden mit einem analytischen Modell verglichen und zeigten eine Übereinstimmung. Für eine weiterreichende Analyse wurde mittels numerischer Simulationen der Einfluss der Fingerhöhe, der Rauigkeit der Kontaktfinger und des Silberpastenverbrauchs auf den Wirkungsgrad für Multi-Busbar Layouts simuliert und mit den Ergebnissen der Simulationen für 3 Busbars aus Kapitel 5.4.4 verglichen. Die Simulationen zeigten, dass mit mehr Busbars ein höherer Wirkungsgrad bei den selben Fingergeometrien erzielt werden kann. Zudem nimmt mit einer erhöhten Anzahl von Busbars die Sensitivität des Wirkungsgrades durch die Rauigkeit der Fingerhöhe ab. Für eine höhere Anzahl Busbars werden kleinere Fingerhöhen und damit einhergehend ein niedrigerer Silberpastenverbrauch benötigt.

7 Selektiver Emitter mittels Gas Phase Etch Back

War bei den industrieüblichen Solarzellen mit ganzflächigem Al-BSF die Rekombination an der Zellrückseite der größte interne Verlustmechanismus, ist dies bei der aufkommenden PERC Technologie nicht mehr der Fall. Durch die passivierte Rückseite mit lokalen BSF Kontakten wird die Rückseitenrekombination reduziert und die Emitterrekombination rückt in den Vordergrund [45]. Neben Optimierungen der standardmäßig homogenen POCl_3 Diffusion ist auch der Einsatz eines selektiven Emitters, wie er in Kapitel 2.3 beschrieben wurde, möglich, um die Rekombination zu verringern. In diesem Kapitel wird dazu ein am ISFH entwickelter Prozess für PERC Solarzellen mit selektivem Emitter vorgestellt und untersucht, der im Vergleich zu anderen Techniken wenige Prozessschritte benötigt und trotzdem das Potenzial für industriell relevante Wirkungsgradverbesserungen zeigt. Als Vergleich dazu dienen Weiterentwicklungen der homogenen Diffusion.

7.1 Analyse und Weiterentwicklung des homogenen Emitters

In Silizium PERC Solarzellen trägt der Phosphor-dotierte Emitter durch Augerrekombination oder durch Rekombination via Kristalldefekten an der Oberfläche mit einer hohen Phosphorkonzentration von über $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ maßgeblich zur Ladungsträgerrekombination bei. Die Ladungsträgerrekombination im Emitter ist nach Kapitel 2.3 durch die Emittersättigungsstromdichte J_{0e} charakterisiert, welche für die Leerlaufspannung V_{oc} und damit den Wirkungsgrad η ein Verlustmechanismus ist.

Für die Verbesserung des homogenen Emitters sowie auch zur Optimierung eines selektiven Emitters ist es hilfreich, die J_{0e} Werte im passivierten und metallisierten Bereich zu kennen. Zur Untersuchung der Rekombination im POCl_3 Emitter werden im Folgenden vier verschiedene Diffusionen, die am ISFH entwickelt wurden, experimentell verwendet und analysiert, um den Verlauf der Emittersättigungsstromdichte für verschiedene Emitterschichtwiderstände zu beschreiben.

Die Dotierprofile werden mittels der elektrochemischen Kapazitäts-Spannungsmessung (ECV, *engl.* Electrochemical Capacitance-Voltage) [140, 141] gemessen. Dabei wird ein Elektrolyt in Kontakt mit der planaren Siliziumoberfläche gebracht und mittels Kapazitätsmessung die Dotierung bestimmt. Durch das elektrochemische Ätzen des Siliziums kann das Dotierprofil tiefenabhängig aufgenommen werden. Abbildung 7.1 zeigt die gemessenen ECV Profile der vier verschiedenen Diffusionen, welche auf planaren Re-

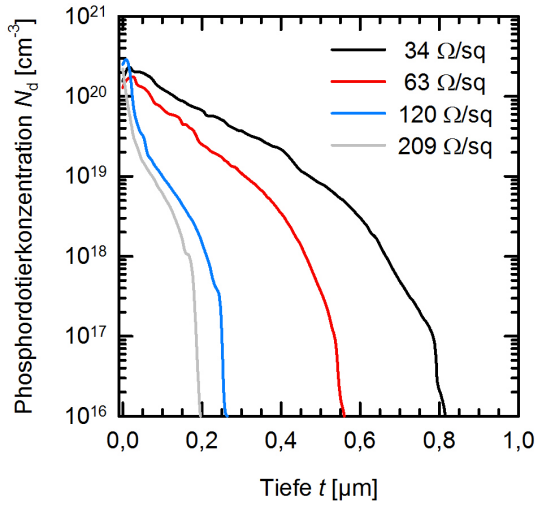


Abb. 7.1: Mittels ECV aufgenommene Phosphordotierprofile von vier verschiedenen POCl_3 Diffusionen. Während die Peakkonzentration bei allen Dotierprofilen mit $2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ bis $3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ nahezu gleich ist, unterscheiden sich die Profile in der Eindringtiefe der Dotierung ins Silizium.

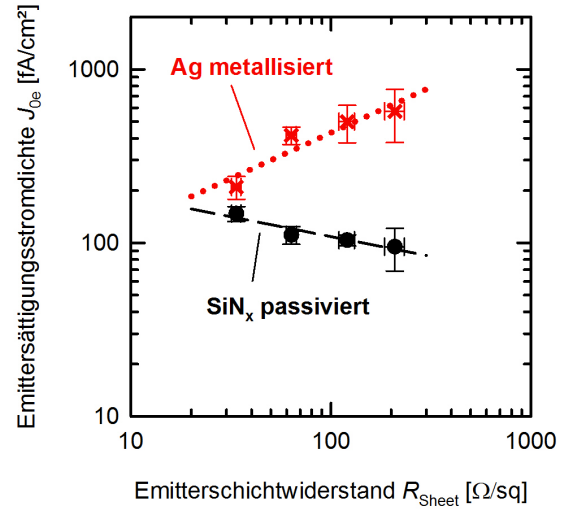


Abb. 7.2: Emittersättigungsstromdichte J_{0e} von Bereichen mit SiN_x Passivierung und Silber (Ag) Metallisierung in Abhängigkeit vom Emitterschichtwiderstand R_{sheet} [129]. Zu höheren Emitterschichtwiderständen R_{sheet} nimmt J_{0e} steigende Werte für den metallisierten und abnehmende Werte für den passivierten Bereich an.

ferenzwafern gemessen wurden. Die Ladungsträgerkonzentration des Phosphors wenige Nanometer unter der Oberfläche, im folgenden Peakkonzentration genannt, liegt bei allen 4 Diffusionen im Bereich von $2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ bis $3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, was typische Werte für eine POCl_3 Diffusion sind. Die Profile unterscheiden sich im Wesentlichen nur in der Eindringtiefe der Dotierung ins Silizium.

Die zu den Dotierprofilen der homogenen Emitter gehörigen Emittersättigungsstromdichten J_{0e} sind in Abbildung 7.2 für den metallisierten ($J_{0e,\text{met}}$) und passivierten ($J_{0e,\text{pass}}$) Bereich dargestellt. Durchgeführt wurden diese Messungen mit der Methode der kalibrierfreien orts aufgelösten dynamischen Infrarot Lebensdauer Messung (ILM, *engl.* Infrared Lifetime Mapping) [142], womit passivierte wie auch metallisierte Bereiche gemessen werden können [143]. In der Messung wird die Infrarotstrahlung der Überschussladungsträgerdichte orts aufgelöst bestimmt. In Hochinjektion lässt sich daraus eine orts aufgelöste Emittersättigungsstromdichte J_{0e} berechnen.

Dazu werden FZ Wafer mit demselben Prozessfluss wie beim PERC Zellprozess hergestellt und wie in Kapitel 6.1 mit vier $22 \text{ mm} \times 22 \text{ mm}$ großen Pads bedruckt. Der SiN_x passivierte Emitter erzielt den niedrigsten Wert von 72 fA/cm^2 bei einem Schichtwiderstand von $209 \text{ } \Omega/\text{sq}$. Für den mit Silbersiebdruckkontakten versehenen Emitter wird bei einem Schichtwiderstand von $34 \text{ } \Omega/\text{sq}$ der kleinste Wert mit $J_{0e,\text{met}} = 196 \text{ fA/cm}^2$ gemessen. Die $J_{0e,\text{met}}$ steigt kontinuierlich zu höheren Emitterschichtwiderständen. Dagegen verringern sich die $J_{0e,\text{pass}}$ Werte mit ansteigendem R_{sheet} . Die reduzierte Dotierung

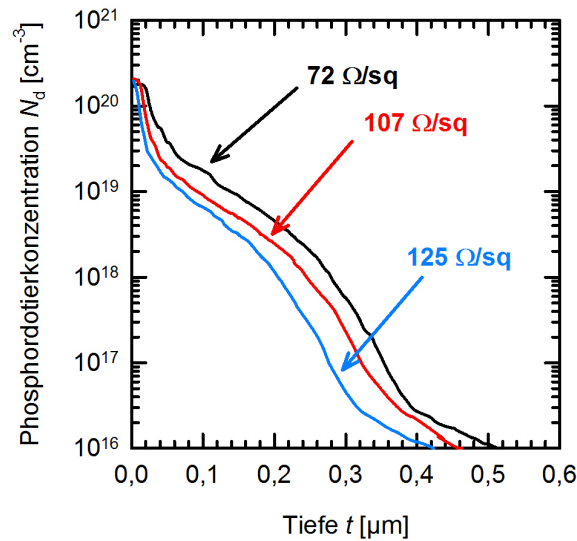


Abb. 7.3: Mittels ECV aufgenommene Dotierprofile von drei weiterentwickelten POCl_3 Diffusionen. Die angegebenen Emitterschichtwiderstände wurden mit 4-Spitzenmessung bestimmt. Während die Peakkonzentration bei allen Dotierprofilen mit $2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ gleich ist, unterscheiden sich die Profile in der Eindringtiefe der Dotierung, was die Unterschiede im R_{sheet} zur Folge hat.

mit Phosphoratomen sorgt für eine geringere Auger Rekombination mit ansteigenden Schichtwiderständen im passivierten Bereich und dadurch verringerte $J_{0e,\text{pass}}$. Dagegen nimmt der Gradient der Minoritätsträgerkonzentration in Richtung der metallisierten Oberflächen durch die abnehmende Tiefe der hohen Phosphorkonzentrationen zu [19]. Die dadurch erhöhte Rekombination resultiert in höhere $J_{0e,\text{met}}$.

Beide Resultate für den passivierten und metallisierten Bereich stimmen qualitativ mit denen überein, die von *Cuevas et al.* [144] für Teststrukturen auf Laborebene erzielt wurden. Im Gegensatz zu den hier gezeigten Ergebnissen wurde dort mit niedriger Phosphorkonzentration an der Waferoberfläche von kleiner als $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ und nahezu transparentem Aluminium von 1 nm Dicke für die Metallkontakte gearbeitet. Von *Fellmeth et al.* [145] wurde $J_{0e,\text{met}}$ unter siebgedruckten Silberkontakten mittels des 1-Dioden-Modells (Gleichung 2.2) aus gemessenen Leerlaufspannungen für verschiedene Metallisierungsflächen abgeschätzt.

Daher zeigen die hier vorgestellten Ergebnisse das erste Mal eine direkte Messung der Emittersättigungsstromdichte $J_{0e,\text{met}}$ unter industrietypischen siebgedruckten Silberkontakten von verschiedenen Diffusionen im Vergleich zu $J_{0e,\text{pass}}$ des passivierten Bereichs. Im Laufe dieser Arbeit wurden anhand der Analyse der gezeigten Emitters die Rezepte für die Diffusionen am ISFH weiterentwickelt, um die Ladungsträgerrekombination im Emitter zu verringern. Drei dieser weiterentwickelten Diffusionen wurden für die bisherigen Ergebnisse der Kapitel 5 und 6 verwendet und dienen in diesem Kapitel teilweise als Referenz im Vergleich zu einer neuen Technologie für die Herstellung eines selektiven Emitters.

Die zugehörigen ECV Profile dieser drei optimierten Diffusionen, deren finaler Schichtwiderstand R_{sheet} zwischen $72 \Omega/\text{sq}$ und $125 \Omega/\text{sq}$ liegt, sind in Abbildung 7.3 dargestellt. Ebenso wie im vorigen Versuch zur Bestimmung der Emittersättigungsstromdichte unterscheiden sich auch hier die Dotierprofile nicht in der Peakkonzentration des aktiven Phosphors, sondern in der Eindringtiefe.

Für diese Emitter wird J_{0e} nur in den passivierten Bereichen mittels quasi-statischer Photoleitfähigkeitsmessung (QSSPC, *engl.* Quasi-Steady-State Photoconductance) [146] bestimmt. Bei der QSSPC Methode wird die effektive Ladungsträgerlebensdauer über die Messung der zeitabhängigen Leitfähigkeit nach erzeugter Überschussladungsträgerkonzentration bestimmt. Für einen Emitterschichtwiderstand von $72 \Omega/\text{sq}$ wird eine $J_{0e,\text{pass}}$ von $123 \text{ fA}/\text{cm}^2$ gemessen, für $107 \Omega/\text{sq}$ eine $J_{0e,\text{pass}}$ von $97 \text{ fA}/\text{cm}^2$ und für $125 \Omega/\text{sq}$ ein Wert für $J_{0e,\text{pass}}$ von $91 \text{ fA}/\text{cm}^2$.

7.2 Einfluss des spezifischen Kontaktwiderstandes

Ein weiterer Einflussmechanismus bei Verwendung von höherohmigen Emitterschichtwiderständen ist der spezifische Kontaktwiderstand zwischen den Silbersiebdruckkontakten und dem Emitter. Für einen idealen Silber-Silizium Kontakt steigt der spezifische Kontaktwiderstand mit abnehmender Oberflächenkonzentration des Phosphors [109]. Im Normalfall eines POCl_3 diffundierten Emitters gilt: Je kleiner die Oberflächendotierkonzentration, desto schwieriger zu kontaktieren durch Veränderung der Ausbildung der Silberkristalle im Emitter und daher zumeist auch ein höherer spezifischer Kontaktwiderstand [54]. Ein weiterer Einflussmechanismus ist das Dotierprofil durch die Tiefe des hochdotierten Bereichs von $\geq 10^{20} \text{ cm}^{-3}$. Je geringer die Tiefe der hohen Dotierung, desto wahrscheinlicher ist es, dass die das Kristallwachstum beeinflussende Dotierkonzentration kleiner ist als die Peakkonzentration [54]. Für POCl_3 diffundierte Emitter mit Schichtwiderständen über $100 \Omega/\text{sq}$ ist daher auch die Weiterentwicklung der Silberpasten seitens der Hersteller nötig, um geringe spezifische Kontaktwiderstände zu erzielen.

Anhand der Weiterentwicklung des homogenen Emitters am ISFH wird deren Auswirkung auf die IV Parameter von PERC Solarzellen sowie der Einfluss der neuesten Generation von Silbersiebdruckpasten auf die verschiedenen Diffusionen im folgenden Experiment vorgestellt.

Es werden die drei beschriebenen weiterentwickelten Diffusionen verglichen, deren finaler Schichtwiderstand R_{sheet} auf den PERC Solarzellen zwischen $72 \Omega/\text{sq}$ und $125 \Omega/\text{sq}$ liegt. Die zugehörigen PERC Solarzellen werden mit dem Print-on-Print Prozess metallisiert, wobei für den $72 \Omega/\text{sq}$ Schichtwiderstand eine Fingeranzahl von 81 und für $107 \Omega/\text{sq}$ bzw. $125 \Omega/\text{sq}$ jeweils 95 Finger verwendet werden, um die ohmschen Verluste im Emitter durch Ladungsträgertransport zu den Kontaktfingern zu verringern. Die Sieböffnung beträgt $40 \mu\text{m}$ für den ersten und $50 \mu\text{m}$ für den zweiten Druck für alle Zellen, d.h. die Zellen mit $107 \Omega/\text{sq}$ bzw. $125 \Omega/\text{sq}$ Emitterschichtwiderstand haben eine größerer Metallisierungsfläche als die mit $72 \Omega/\text{sq}$. Für die verschiedenen Diffusionen wurden drei Silberpasten getestet, wobei Paste 1 nur bei $72 \Omega/\text{sq}$ und $107 \Omega/\text{sq}$ verwendet wurde und die anderen beiden Pasten nur bei $107 \Omega/\text{sq}$ bzw. $125 \Omega/\text{sq}$. Paste 3 ist vom selben

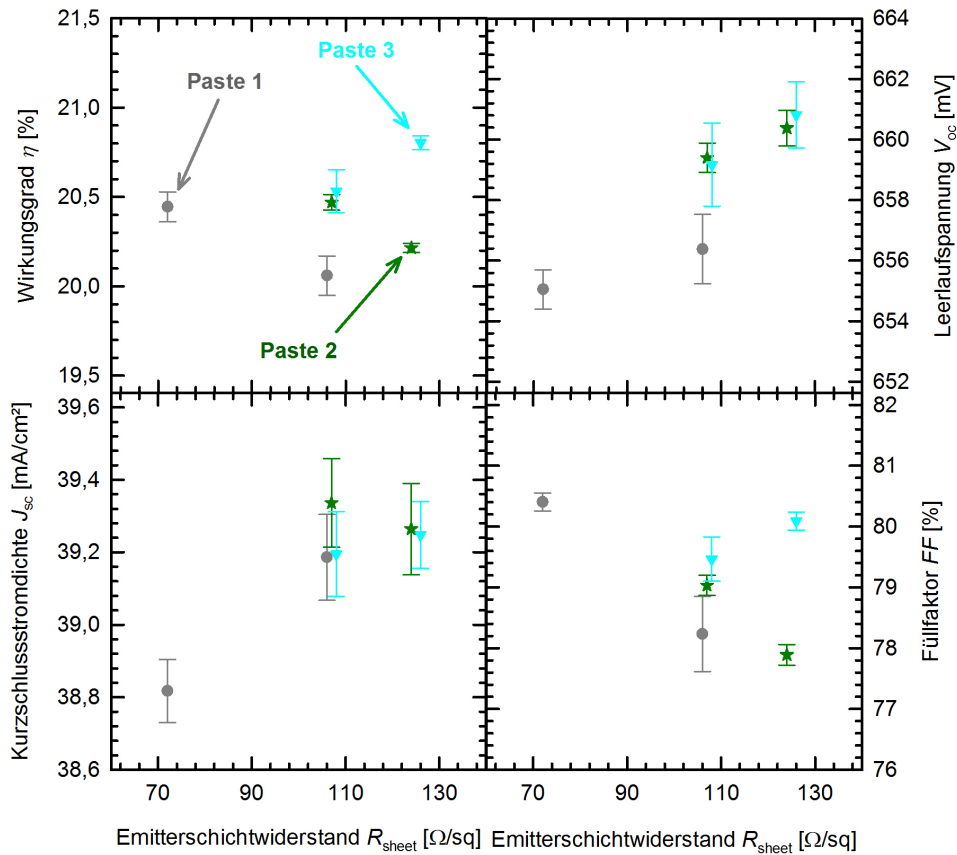


Abb. 7.4: Mittelwerte von 3 bis 4 gleich prozessierten PERC Solarzellen mit Standardabweichung der IV Parameter Wirkungsgrad η , Leerlaufspannung V_{oc} , Kurzschlussstromdichte J_{sc} und Füllfaktor FF in Abhängigkeit vom finalen Emitterschichtwiderstand R_{sheet} und der verwendeten Silberpaste für die Kontaktfinger. Unabhängig von der Silberpaste steigt der beste Mittelwert des Wirkungsgrades von 20,45% für 72 Ω/sq auf 20,80% für 125 Ω/sq . Während für J_{sc} hauptsächlich ein Einfluss durch die unterschiedlich hohen Schichtwiderstände auftritt, ist beim FF die verwendete Silberpaste ausschlaggebend für den Wert beim jeweiligen Emitterschichtwiderstand.

Hersteller wie Paste 1 und eine Weiterentwicklung zur besseren Kontaktausbildung bei hochohmigen Emitttern.

Die zugehörigen IV Daten aufgetragen über den Emitterschichtwiderstand sind in Abbildung 7.4 gezeigt. Jeder Mittelwert besteht aus dem Ergebnis von 3 bis 4 gleich prozessierten Solarzellen. Betrachtet man den Wirkungsgrad in Abhängigkeit vom Schichtwiderstand und unabhängig von der verwendeten Silberpaste, steigt der beste Mittelwert von 20,45% für 72 Ω/sq über 20,53% für 107 Ω/sq auf 20,80% für 125 Ω/sq . Der beste erzielte Wirkungsgrad liegt bei 20,83% für 125 Ω/sq .

Der Wirkungsgradgewinn wird zum Teil durch die verbesserte V_{oc} in Folge der verringerten $J_{0e,pass}$ bei steigenden Schichtwiderständen hervorgerufen. Dies ist ersichtlich aus dem Vergleich der V_{oc} Werte für verschiedene Schichtwiderstände, aber gleicher Silberpaste.

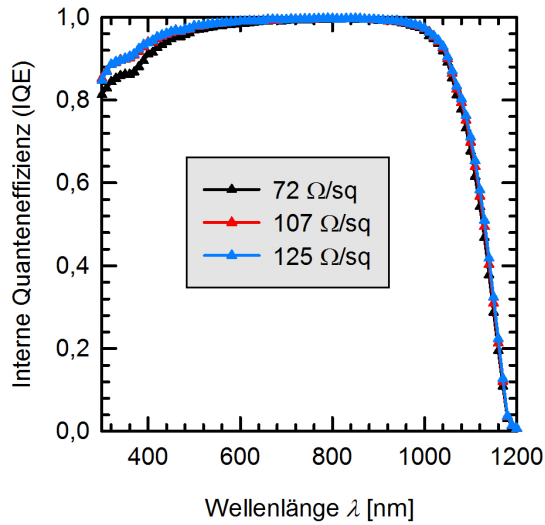


Abb. 7.5: Gemessene interne Quanteneffizienz (IQE) von PERC Solarzellen, die mit den gemessenen Dotierprofilen aus Abbildung 7.3 hergestellt wurden. Die aus den IQE Kennlinien extrahierten Kurzschlussstromdichten stimmen mit den gemessenen J_{sc} Werten überein.

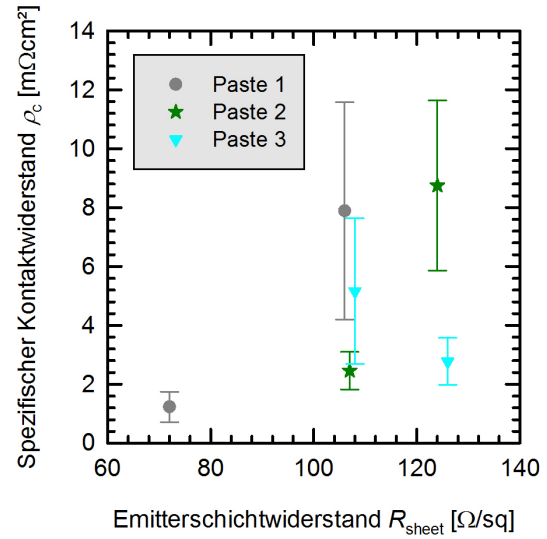


Abb. 7.6: Mittelwert des mittels TLM Verfahren gemessenen spezifischen Kontaktwiderstandes ρ_c der Silberfinger zu den verschiedenen Emitttern. Die Fehlerbalken kennzeichnen die Standardabweichung des Mittelwerts von 30 Positionen auf einer Solarzelle.

Neben dem passivierten Bereich des Emitters spielt auch der metallisierte Bereich bei der Rekombination eine Rolle und demzufolge die Silberpaste. Die $J_{0e,met}$ der Silberpasten 1 bis 3 wurde in diesem Versuch nicht bestimmt. Die V_{oc} Differenz zwischen der Paste 1 und den anderen beiden Pasten bei gleichem Schichtwiderstand von $107 \Omega/sq$ weist aber auf eine deutlich höhere $J_{0e,met}$ der Silberpaste 1 hin.

Für J_{sc} zeigt sich der Gewinn durch den größeren Emitterschichtwiderstand von $72 \Omega/sq$ auf $107 \Omega/sq$. Dagegen gibt es im Rahmen der Messunsicherheit und der Standardabweichung keine Unterschiede in der Kurzschlussstromdichte zwischen den Solarzellen mit $107 \Omega/sq$ und $125 \Omega/sq$, die Metallisierungsfläche war in diesen beiden Fällen gleich.

Die Auswirkung der verwendeten Silberpasten wird bei Betrachtung des Füllfaktors FF ersichtlich. Während Paste 1 und Paste 2 zu höheren Schichtwiderständen geringe Füllfaktoren durch einen größeren Serienwiderstand erzielen, gibt es im Rahmen der Standardabweichung für die Paste 3 kaum einen Unterschied im FF zwischen $107 \Omega/sq$ und $125 \Omega/sq$. Der größere Mittelwert von $80,1\%$ wird für Paste 3 beim höheren R_{sheet} von $125 \Omega/sq$ im Vergleich zu $79,5\%$ mit $107 \Omega/sq$ gemessen.

Für die Analyse der Kurzschlussstromdichte J_{sc} und des Füllfaktors FF wird die interne Quanteneffizienz (IQE) bzw. der spezifische Kontaktwiderstand ρ_c ermittelt. Die Quanteneffizienz beschreibt die Spektralausbeute einer Solarzellen bei einer bestimmten Wellenlänge unter Kurzschlussbedingungen und zeigt damit, in welcher Tiefe der Solarzelle die Verlustmechanismen vorhanden sind. Die Ergebnisse zu diesen Messungen sind

in den Abbildungen 7.5 und 7.6 dargestellt.

Für die IQE Messung wird für 107 Ω/sq und 125 Ω/sq die jeweils beste PERC Solarzelle mit Paste 3 verwendet, für 72 Ω/sq die beste Zelle mit Paste 1. Die IQE Messdaten sind in Übereinstimmung mit den gemessenen J_{sc} . Für den Emitterschichtwiderstand von 125 Ω/sq wird nur ein geringfügig besseres Signal im blauen Spektralbereich erzielt als für 107 Ω/sq , was nach Auswertung der IQE einer Differenz von 0,1 mA/cm^2 entspricht. Dies stimmt im Rahmen der Standardabweichung mit der IV Messung überein. Dagegen besteht in der internen Quantenausbeute bei kurzen Wellenlängen ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden hochohmigen Diffusionen und dem 72 Ω/sq Emitterschichtwiderstand. Eine Auswertung der IQE ergibt einen Gewinn von 0,4 mA/cm^2 für die 125 Ω/sq gegenüber der 72 Ω/sq Diffusion, der auch in J_{sc} gemessen wurde.

Der spezifische Kontaktwiderstand ρ_c für die verschiedenen Emitterschichtwiderstände und jeweils verwendeten Silberpaste wird mittels TLM Messung bestimmt. Gemessen wird ρ_c an 30 Positionen jeweils einer Solarzelle aus jeder Splitgruppe. Dargestellt ist in Abb. 7.6 der Mittelwert der Messung mit Standardabweichung der Messwerte.

Bei Paste 1 und Paste 2 ist jeweils ein Anstieg des spezifischen Kontaktwiderstandes zu höheren R_{sheet} zu beobachten. Die Vergrößerung des spezifischen Kontaktwiderstandes von $1,23 \pm 0,52 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$ auf $7,89 \pm 3,70 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$ für Paste 1 erzeugt einen um $0,18 \pm 0,13 \text{ }\Omega\text{cm}^2$ erhöhten Serienwiderstand. Dies stimmt im Rahmen der Standardabweichung mit dem gemessenen Anstieg des R_s von $0,65 \pm 0,03 \text{ }\Omega\text{cm}^2$ auf $1,06 \pm 0,14 \text{ }\Omega\text{cm}^2$ überein. Für Paste 3 bleibt ρ_c im Rahmen der Standardabweichung des Mittelwerts nahezu unverändert für 107 Ω/sq und 125 Ω/sq . Die gemessenen ρ_c korrelieren somit mit den Unterschieden im Füllfaktor aus Abbildung 7.4. Der weitere Einflussfaktor Fingerwiderstand durch den Linienwiderstand der Silberfinger mit unterschiedlichen Pasten erzeugt keine nennenswerte Serienwiderstandsdifferenz zwischen den Splitgruppen.

Diese Ergebnisse stellen die Weiterentwicklung und Analyse des homogenen POCl_3 Emitters am ISFH während dieser Arbeit dar und dienen als Referenz für die folgenden Experimente und Untersuchungen des entwickelten Prozesses zur Herstellung eines selektiven Emitters.

7.3 Gas Phase Etch Back Prozess

Wie in Kapitel 2.3 vorgestellt, existiert schon eine Vielzahl von Technologien für die Herstellung selektiver Emitters. Diese sind entweder auf höchste Wirkungsgrade oder einfachste Prozesse optimiert. In diesem Kapitel wird eine neue selektive Emitters Technologie speziell für PERC Solarzellen vorgestellt, die am ISFH entwickelt wurde. Der Vorteil gegenüber anderen Konzepten ist insbesondere der schlanke Prozess, der im Optimalfall nur einen zusätzlichen Prozessschritt im Vergleich zu einem herkömmlichen industriellen PERC Prozess benötigt. Die Technologie basiert auf dem Rückätzen des Emitters zwischen den Kontaktfingern. Im Unterschied zum existierenden Prozess nach Kapitel 2.3 wird bei der neuen Technologie nicht nasschemisch geätzt.

Für einen industriellen PERC Prozess wird aufgrund der Kosten und des Durchsatzes keine Schutzschicht vor Textur und Diffusion angewendet wie für den in Kapitel 2.2.1 vor-

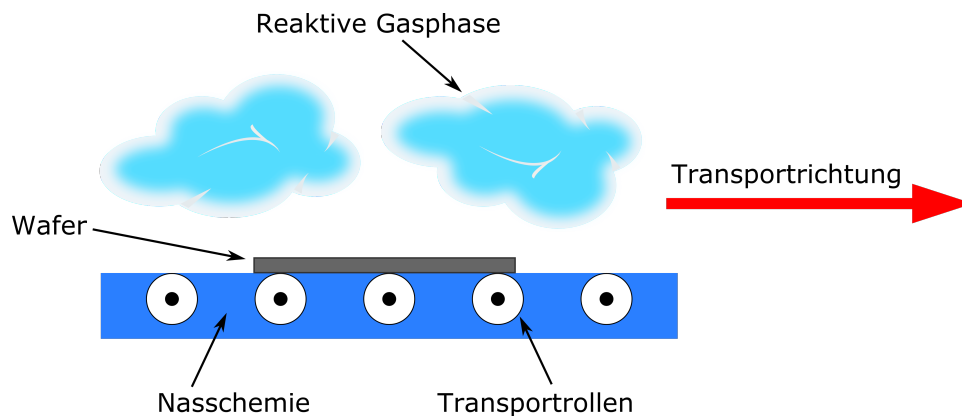


Abb. 7.7: Schematische Zeichnung des Politurprozesses der Waferrückseite und zusätzlich entstehender Gasphase. Bei der einstufigen Politur nach Textur und Diffusion werden die Wafer auf Rollen über das Ätzmedium geführt und nur die Solarzellenrückseite nasschemisch geätzt. Durch die Nasschemie entsteht während dieses Prozesses eine reaktive Gasphase, die den Emitter auf der Solarzellenvorderseite anätzt. Je nach Modifikation des Politurrezeptes kann dieser Ätzangriff aus der Gasphase mehr oder weniger stark ablaufen.

gestellten PERC Prozess, der für alle bisher vorgestellten Experimente verwendet wurde. Ein mögliches Konzept für den PERC Prozess ist stattdessen die einstufige nasschemische Politur der Solarzellenrückseite nach Textur und Diffusion [42]. In dieser Arbeit wird dazu eine RENA InPilot Anlage [43] verwendet. Dabei werden die Wafer, wie in Abbildung 7.7 gezeigt, auf Rollen über ein Ätzmedium geführt. Es bildet sich ein Meniskus zwischen Wafer und Nasschemie aus, wodurch nur die Rückseite des Wafers in Kontakt mit dem Ätzmedium kommt. Bei einer hydrophoben Oberfläche der Wafer gelangt das Ätzmedium somit nicht auf die Vorderseite und der Prozess verläuft einseitig. Die Nasschemie zur Politur der Rückseite ist ein Gemisch aus Fluorwasserstoff (HF), Salpetersäure (HNO_3) und Wasser (H_2O). Die Salpetersäure oxidiert die Oberfläche des Siliziums, wodurch Siliziumdioxid (SiO_2) entsteht. Das entstandene SiO_2 wird von der HF in Hexafluorokieselsäure (H_2SiF_6), einen wasserlöslichen Komplex, umgewandelt. Dadurch entsteht der Siliziumabtrag auf der Rückseite.

Durch die Nasschemie entsteht während dieses Prozesses der einseitigen Politur eine reaktive Gasphase, die größtenteils aus Fluorwasserstoff (HF) und Salpetersäure (HNO_3) besteht. Diese Gase reagieren mit der Wafervorderseite zu porösem Silizium, das durch eine nachfolgende Reinigung z.B. mit Kaliumhydroxid (KOH) entfernt wird. Somit ätzt die Gasphase das Silizium auf der Solarzellenvorderseite, sprich den Emitter, an. Durch Modifikation des Politurrezeptes kann diese Gasphase für den PERC Prozess mit homogenem Emitter weitestgehend vermieden werden, so dass nur ein geringer Ätzangriff auf der Vorderseite stattfindet.

Das neue Konzept zur Herstellung eines selektiven Emitters nutzt diese vorhandene Gasphase während des Politurprozesses aus und wird daher *Gas Phase Etch Back* (GEB) genannt. Dabei wird durch Rezeptmodifikation ein starkes Anätzen des Emitters von mehreren zehn Nanometern aus der Gasphase erzeugt. Die Selektivität des Emitters

wird dadurch erzielt, dass vor dem Politurprozess eine Ätzbarriere an den Stellen aufgebracht wird, an denen die Silberkontaktfinger im weiteren Verlauf gedruckt werden. So liegt im geschützten Bereich der diffundierte Emitter mit niedrigem Schichtwiderstand vor und in den Zwischenfingerbereichen der zurückgeätzte Emitter, der einen höheren Schichtwiderstand besitzt. Je nach Art und Technik der Ätzbarriere sowie der Vor- und Nachbehandlung der Wafer wird damit im Optimalfall nur ein zusätzlicher Prozessschritt im Vergleich zum industriellen PERC Prozess mit homogenem Emitter benötigt, nämlich das Aufbringen der Ätzbarriere.

In den folgenden Unterkapiteln werden für den GEB Prozess verschiedene Ätzbarrieren und Techniken zur Aufbringung auf den Wafer untersucht und verglichen. Die nachfolgenden Ergebnisse auf Basis von PERC Zellen vergleichen einen homogenen Emitter mit dem selektiven Emitter mittels Gas Phase Etch Back. Dabei wird zuerst ein GEB Prozessfluss auf Laborebene und als Weiterentwicklung ein industriell umsetzbarer Prozess verwendet.

7.4 Analyse verschiedener Ätzbarrieren

Für die Ätzbarriere gibt es verschiedene Voraussetzungen, die erfüllt sein sollten. Um die Auftragung der Ätzbarriere als Fingerstruktur möglichst schnell und kostengünstig zu bewerkstelligen, werden nur die Druckverfahren mittels Siebdruck und Inkjet verwendet. Das Material soll in allererster Linie eine gute Barrierewirkung zeigen, d.h. resistent gegen die Gasphase sein. Zudem spielen die Faktoren Druckbarkeit, Entfernen der Ätzbarriere nach dem GEB Prozess sowie eine mögliche Verunreinigung der InPilot Anlage durch das Barrierematerial eine Rolle.

Insgesamt drei Materialien werden näher untersucht und anhand der Kriterien analysiert. Das erste untersuchte Material ist *isishape SolarResist* von Merck, eine Siliziumdioxid-Lösung, die per Inkjet auf den Wafer aufgebracht wird. Um eine Struktur zu erhalten, muss dabei der Drucktisch beheizt werden, so dass die vorhandenen Lösungsmittel schnell verdampfen. Die Abnahme erfolgt in 1%iger HF für 1 min.

Ein weiteres Material, das ebenfalls mittels Inkjet-Verfahren aufgebracht wird, ist ein Hotmelt-Wachs. Dieser wird im Druckkopf des Inkjets erhitzt und verflüssigt. Nach Auftragung auf den Wafer kühlt das Material schnell aus und wird fest. Die Abnahme erfolgt entweder in 50 - 60 °C warmen Isopropanol oder in 2%iger KOH für 1 - 2 Minuten.

Zusätzlich wird noch ein Material verwendet, das sich mittels Siebdruck aufbringen lässt, was gegenüber dem Inkjet-Verfahren in der Industrie weiter verbreitet ist. Das Material ist ein Lack, der als Ätzresist anwendbar und alkalisch löslich ist. Nach dem Drucken muss der Lack noch in einem handelsüblichen Durchlaufofen getrocknet werden. Die spätere Abnahme des Materials nach dem GEB Prozess erfolgt durch 5%ige KOH für 30 Sekunden.

Einen Eindruck der Druckbarkeit und der Barrierewirkung erhält man durch die Abbildungen 7.8 a) bis f), die Lichtmikroskopbilder der Ätzbarrieren vor und nach dem GEB Prozess für die verschiedenen Barrierematerialien zeigen. Der Hotmelt-Wachs wie auch der Lack zeigen keine Veränderung der Barriere nach dem GEB Prozess, was einen Hin-

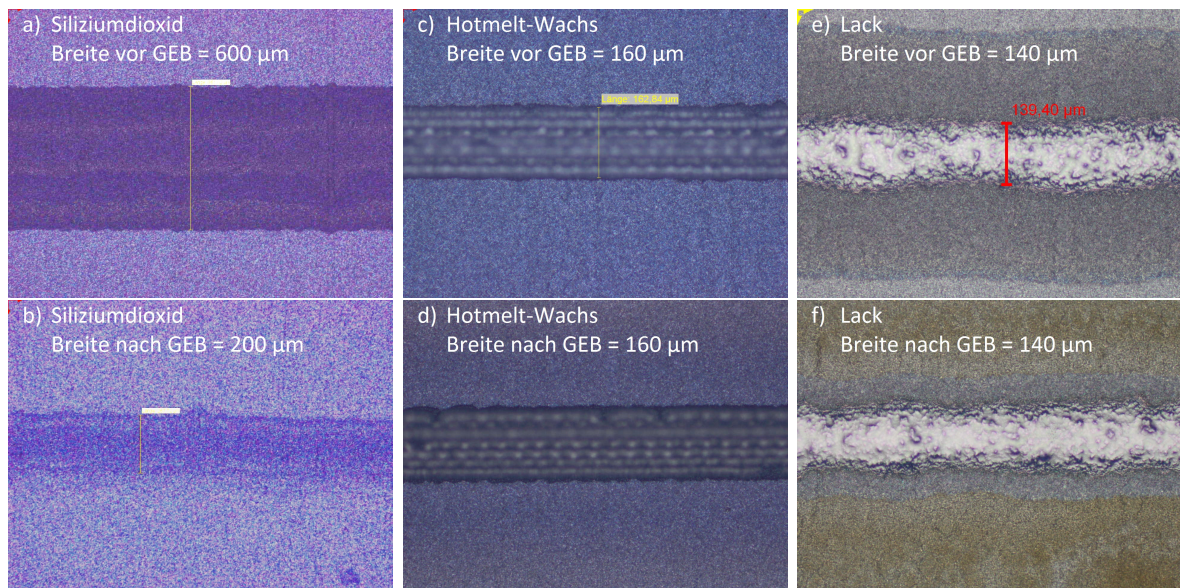


Abb. 7.8: Lichtmikroskopbilder der Ätzbarriere vor und nach dem Gas Phase Etch Back Prozess. Die Bilder zeigen die verschiedenen Barrierematerialien: a) und b) Siliziumdioxid-Lösung, c) und d) Hotmelt-Wachs, e) und f) Lack. Wie an den gemessenen Barrierebreiten sichtbar, halten der Hotmelt-Wachs und der Lack dem GEB Prozess ohne Probleme stand, bei der Siliziumdioxid-Lösung reduziert sich dagegen die Breite der Ätzbarriere um $400\ \mu\text{m}$ auf $200\ \mu\text{m}$ nach dem GEB Prozess. Ebenso ist die Ausgangsbreite von $600\ \mu\text{m}$ zu groß für einen optimalen Prozess.

weis auf eine gute Barrierewirkung gibt. Zudem liegt die gedruckte Breite der Barriere in dem Bereich, der gewünscht und sinnvoll ist. Die Barriere darf nicht zu schmal sein, damit die spätere Justierung der Silberkontaktfinger auf diese Bereiche funktioniert, aber ebenso nicht zu breit, damit der Flächenanteil der niedrigohmigen Ausgangsdiffusion mit erhöhter Rekombination nicht zu groß wird. Im Optimalfall sollte die Ätzbarriere eine Breite im Bereich von $100\ \mu\text{m}$ haben. Das auf Siliziumdioxid basierende Material lässt sich hingegen nicht schmäler als $600\ \mu\text{m}$ drucken. Zudem zeigt sich nach dem GEB Prozess eine Reduzierung der Ätzbarrierenbreite auf $200\ \mu\text{m}$. Da sich dieses Material mit Flusssäure entfernen lässt, was ebenso ein Bestandteil der reaktiven Gasphase ist, führt der GEB Prozess zu einer Reduzierung der Ätzbarrierenbreite.

Tabelle 7.1 fasst die Analyse der Materialien für die Ätzbarriere zusammen. Wie beschrieben, ist die Druckbarkeit und Barrierewirkung beim Hotmelt-Wachs und dem Lack sehr gut, bei der Siliziumdioxid-Lösung dagegen nur annehmbar, da dort Potenzial zur Reduzierung der Emittersättigungsstromdichte durch die zu breite Ätzbarriere verschwendet wird. Bei stärkeren Ätzangriffen besteht mit der Siliziumdioxid-Lösung zudem die Gefahr, dass die Barriere nicht standhält und dadurch auch der Emitter unter den Kontakten geätzt wird. Dies würde im Vergleich zum Referenzprozess mit großer Wahrscheinlichkeit zu einem erhöhten spezifischen Kontaktwiderstand führen und damit keine Verbesserung des Wirkungsgrades gegenüber einer homogen diffundierten Solarzelle. Die Entfernung der Ätzmaske nach dem GEB Prozess lässt sich für alle Barrierematerialien leicht bewerkstelligen.

Tab. 7.1: Auflistung der getesteten Materialien für eine Ätzbarriere beim Gas Phase Etch Back Prozess mit Beurteilung unter verschiedenen Gesichtspunkten. + bedeutet positiv, – negativ und 0 ist neutral. Einer der wichtigsten Punkte ist das Risiko einer Verunreinigung der Anlage, falls es zu einem Waferbruch kommt und die Ätzbarriere in die Nasschemie gelangt. Vom Hotmelt-Wachs und dem Lack verbleiben größere Partikel und Ablagerungen, die Umwälzpumpen und Ventile der Anlage verstopfen können.

Material	Technik	Druck- barkeit	Barriere- wirkung	Entfernung Ätzmaske	Risiko Verunreinigung der Anlage
Siliziumdioxid	Inkjet	0	0	+	+
Hotmelt-Wachs	Inkjet	+	+	+	–
Lack	Siebdruck	+	+	+	–

Der letzte zu betrachtende Punkt ist das Risiko einer Verunreinigung der Anlage durch das verwendete Barrierematerial. Kommt es zu einem Waferstau oder Waferbruch in der Anlage, ist es nicht ausgeschlossen, dass Teile des Wafers mit der Ätzbarriere in die Nasschemie gelangen. Der Wafer an sich wird mit der Zeit vollständig und rückstandslos zersetzt und stellt selbst keine Gefahr da. Dagegen besteht die Gefahr, dass das Barrierematerial, wenn es sich nicht vollständig auflöst, Umwälzpumpen und Ventile in der Anlage verstopft. Dies würde zu einem Ausfall der Anlage und nachfolgend einer aufwendigen Reinigungsprozedur führen. Mit Hilfe von Versuchen im Becherglas zeigt sich, dass sich die Siliziumdioxid-Lösung komplett zersetzt und keine Rückstände bleiben. Der Inkjet-Wachs und der Lack dagegen lösen sich im Ätzmedium zwar mit der Zeit von der Waferoberfläche, aber es bleiben größere Partikel übrig, die sich im Becherglas ablagern. Somit besteht bei den beiden letztgenannten Materialien die Gefahr einer Verunreinigung der Anlage, die aber durch den Einbau zusätzlicher Filter verhindert werden kann.

7.5 Gas Phase Etch Back als Laborprozess

Für die erste Evaluierung des selektiven Emitters mit Gas Phase Etch Back (GEB) auf Basis von PERC Solarzellen liegt das Hauptaugenmerk bei der Wahl der Ätzbarriere auf der Einfachheit des Prozesses und des geringsten Risikos einer Verunreinigung der Polituranlage. Daher fällt die Wahl auf die Siliziumdioxid-Lösung, die mittels Inkjet kontaktlos auf den Wafer aufgebracht wird. Neben den PERC Solarzellen mit selektivem Emitter mittels GEB werden zwei weitere Splitgruppen mit homogenem Emitter prozessiert, die als Vergleichswert dienen. Die Prozessierung der einzelnen Gruppen ist im Folgenden erklärt.

Die wichtigsten Prozessschritte für den GEB selektiven Emitter sind als schematische Zeichnung in Abbildung 7.9 gezeigt. Nach einem Reinigungsprozess werden die Wafer in einem alkalischen Batch Prozess beidseitig texturiert. Nachfolgend wird der Emitter beidseitig durch eine POCl_3 Diffusion ausgebildet. Eine Prozessgruppe wird mit einer Diffusion mit einem Schichtwiderstand von $45 \Omega/\text{sq}$ prozessiert, alternativ erhält die an-

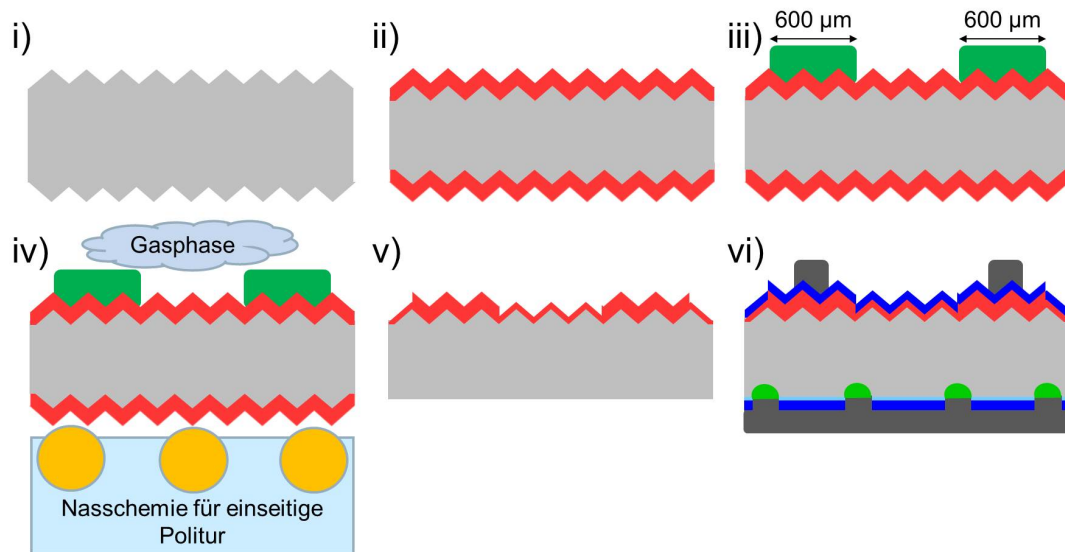


Abb. 7.9: Schematische Zeichnung der Prozessschritte für die Herstellung eines selektiven Emitters mittels Gas Phase Etch Back: i) Beidseitige Textur, ii) Beidseitige POCl_3 Diffusion, iii) Drucken der Ätzbarriere, iv) Polieren der texturierten und diffundierten Rückseite und gleichzeitiges Ätzen der Vorderseite durch reaktive Gasphase, v) Entfernen der Ätzbarriere durch nachfolgende Reinigung, vi) Finale PERC Solarzelle mit einem selektivem Emitter mittels GEB.

dere Prozessgruppe eine POCl_3 Diffusion mit $60\ \Omega/\text{sq}$ Schichtwiderstand. Da die Wafer durch das nach der POCl_3 Diffusion vorhandene Phosphorsilikatglas (PSG) eine hydrophile Oberfläche besitzen, muss das PSG durch einen Ätzschritt entfernt werden, damit sich während des GEB Prozesses die Nasschemie nicht durch Adhäsions- und Kapillarkräfte auf die Vorderseite der Wafer zieht. Anschließend folgt der Druck der Ätzbarriere auf die Vorderseite mittels Inkjet auf die Bereiche, auf denen später ebenfalls das Fingergrid gedruckt wird. Wie im vorigen Kapitel gezeigt, hat die gedruckte Ätzbarriere mit der Siliziumdioxid-Lösung eine Breite von ungefähr $600\ \mu\text{m}$.

Danach wird die Rückseite poliert und durch die eingestellte reaktive Gasphase simultan der Emitter auf der Vorderseite zwischen der Barriere zurückgeätzt. Die Politurzeit wird variiert, was in unterschiedlichen Siliziumabträgen auf der Waferrückseite von $4\ \mu\text{m}$, $4,5\ \mu\text{m}$ und $8\ \mu\text{m}$ und unterschiedlichen Abträgen des Emitters auf der Vorderseite durch die Gasphase resultiert. Die aggressive Gasphase ätzt auch die aufgedruckte Barriere an. Die Ausgangsbreite der Ätzbarriere von $600\ \mu\text{m}$ reduziert sich auf $200\ \mu\text{m}$ nach dem GEB Prozess, wie in Abbildung 7.8 gezeigt. Nach der Politur folgt eine nasschemische Reinigung, welche die restliche Ätzbarriere und das sich gebildete poröse Silizium entfernt und zugleich die Rückseite des Wafers reinigt, um eine exzellente Rückseitenpassivierung zu ermöglichen.

Für die Prozesskombination $45\ \Omega/\text{sq}$ Schichtwiderstand nach Diffusion und $8\ \mu\text{m}$ Politurabtrag (nachfolgend Gruppe GEB (1)) wird ein Emitterschichtwiderstand von $70\ \Omega/\text{sq}$ nach GEB und ein finaler Schichtwiderstand von $88\ \Omega/\text{sq}$ nach der nasschemischen Reinigung erzielt. Für die Kombination $60\ \Omega/\text{sq}$ Diffusion und $4\ \mu\text{m}$ Siliziumabtrag (Gruppe

GEB (2)) steigt der Schichtwiderstand von $80 \Omega/\text{sq}$ nach GEB auf einen finalen Emitterschichtwiderstand von $110 \Omega/\text{sq}$. Die Kombination $60 \Omega/\text{sq}$ Diffusion und $4,5 \mu\text{m}$ Abtrag (Gruppe GEB (3)) resultiert in $90 \Omega/\text{sq}$ nach GEB und $120 \Omega/\text{sq}$ Schichtwiderstand nach der Reinigung vor Passivierung.

Die Rückseite wird nachfolgend passiviert mit einem Schichtstapel aus ALD Al_2O_3 und PECVD SiN_y , während die Vorderseite mit einer PECVD SiN_x Antireflexionsschicht mit einem Brechungsindex von 2,05 und einer Dicke von 70 nm überzogen wird. Die Passivierung auf der Rückseite wird lokal durch Laserablation entfernt, um linienförmige Rückkontakte zu formen. Für den Vorderseitensiebdruck wird ein 3-Kamera System verwendet, um den Silbersiebdruck auf die gleiche Referenzkante auszurichten, die auch für den Druck der Ätzbarriere mit dem Inkjet Drucker genutzt wurde. Als Technik für die Vorderseitenmetallisierung wird der Print-on-Print mit einer Fingeröffnung von $40 \mu\text{m}$ für den ersten und $50 \mu\text{m}$ für den zweiten Druck genutzt. Die Rückseite erhält einen vollflächigen Aluminium Siebdruck.

Für die Herstellung einer industrietypischen Referenz mit homogenem Emitter wird der oben beschriebene Prozess leicht abgewandelt. Auf diese PERC Solarzellen wird keine Ätzbarriere gedruckt. Zudem wird das Politurrezept so modifiziert, dass während des Politurprozesses der Rückseite nur eine schwach reaktive Gasphase entsteht, die für die $45 \Omega/\text{sq}$ Diffusion in einer Erhöhung des Emitterschichtwiderstands von $5 \Omega/\text{sq}$ nach der Politur resultiert. Eine zusätzliche Erhöhung von $15 \Omega/\text{sq}$ folgt nach dem Reinigungsprozess, so dass bei diesen PERC Solarzellen ein finaler homogener Emitterschichtwiderstand von $65 \Omega/\text{sq}$ vorliegt. Der Politurprozess entfernt in diesem Fall $5,4 \mu\text{m}$ des Siliziums auf der Rückseite. Dieser Siliziumabtrag reicht nach *Kranz et al.* [35] im Fall eines $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiN}_y$ Schichtstapels, damit die noch vorhandene Rückseitenrauigkeit keinen Einfluss auf den Wirkungsgrad hat.

Als zusätzlicher Vergleich zu den beiden Zelltypen PERC mit GEB und PERC mit polier-

Tab. 7.2: Verwendete Gruppen der Untersuchung eines Laborprozesses mit selektivem Emitter mittels Gas Phase Etch Back. Die Gruppe PERC Politur hat durch Modifikation des Politurrezeptes nur einen geringen Ätzabtrag des Emitters, der eine homogene Erhöhung des Schichtwiderstandes von $5 \Omega/\text{sq}$ zur Folge hat. Die weitere PERC Gruppe mit homogenem Emitter hat eine Schutzschicht vor Textur und Diffusion auf der Rückseite und benötigt daher keine Politur. Die dargestellten Werte beziehen sich auf den Emitterschichtwiderstand im passivierten Bereich zwischen den Kontaktfingern.

Gruppe	Emitter	R_{sheet} nach Diffusion [Ω/sq]	Politurabtrag Rückseite [μm]	R_{sheet} nach Reinigung [Ω/sq]
GEB PERC (1)	Selektiv	45	8,0	88
GEB PERC (2)	Selektiv	60	4,0	110
GEB PERC (3)	Selektiv	60	4,5	120
PERC Politur	Homogen	45	5,4	65
PERC Schutzschicht	Homogen	60	–	70

ter Rückseite werden PERC Solarzellen mit dem in Kapitel 2.2.1 beschriebenen Basisprozess mit homogenem Emitter produziert. Dabei wird statt einer Politur der Rückseite eine Rückseitenschutzschicht vor Textur und Diffusion aufgebracht. Für diese PERC Solarzellen wird der Diffusionsprozess mit $60 \text{ } \Omega/\text{sq}$ Schichtwiderstand angewendet. Der finale Emitterschichtwiderstand nach allen Reinigungsprozessen beträgt $70 \text{ } \Omega/\text{sq}$. Die nachfolgenden Prozessschritte sind die gleichen wie für PERC Solarzellen mit polierter Rückseite. Die verschiedenen Prozessgruppen dieses Versuchs sind in Tabelle 7.2 aufgelistet.

7.5.1 Emittercharakterisierung

Abbildung 7.10 a) zeigt als Vergleich der verschiedenen Prozesse die mittels ECV gemessenen Dotierprofile der Emitter der PERC Solarzellen mit polierter Rückseite und $65 \text{ } \Omega/\text{sq}$ finalem Schichtwiderstand sowie der Gruppe GEB (1) mit einem finalen Emitterschichtwiderstand von $88 \text{ } \Omega/\text{sq}$, welche beide die gleiche Ausgangsdiffusion hatten. Der $70 \text{ } \Omega/\text{sq}$ POCl_3 Emitter der PERC Solarzellen mit Rückseitenschutzschicht ist in Schwarz dargestellt. Hier zeigt sich insbesondere, abgesehen vom unterschiedlichen Dotierprofil in der Tiefe durch die verwendete Diffusion, die Variation in der Peakkonzentration an der Oberfläche des Emitters. Während der GEB Prozess Phosphorpeakkonzentrationen von $< 1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ erreicht, liegt dieser Wert für die anderen beiden PERC Prozesse $> 1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$.

Am Beispiel der Dotierprofile aus Gruppe GEB (1) mit der $45 \text{ } \Omega/\text{sq}$ Ausgangsdiffusion und des auf $88 \text{ } \Omega/\text{sq}$ zurückgeätzten Emitters zeigt sich eine Verschiebung des GEB

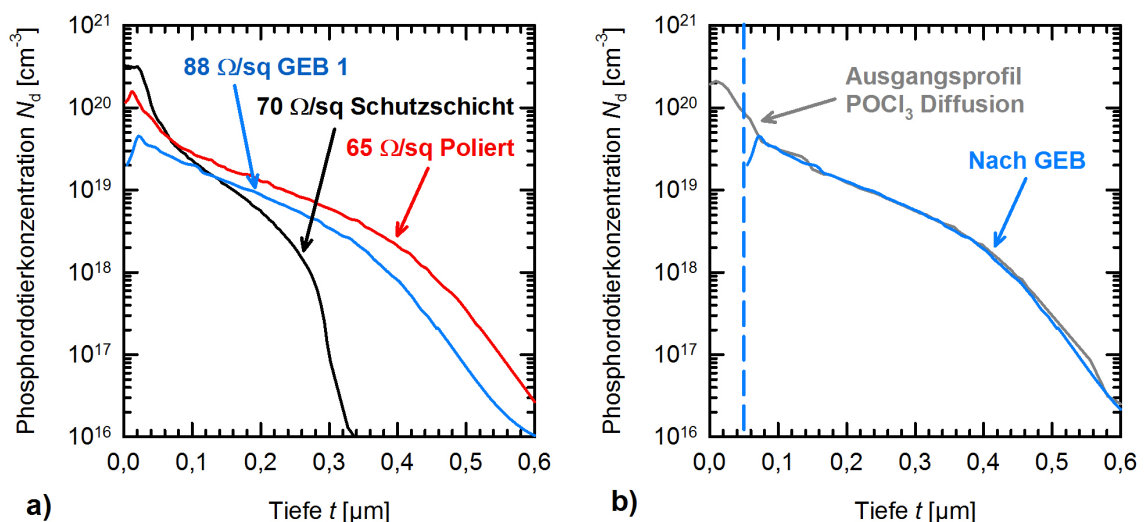


Abb. 7.10: a) Mittels ECV gemessenes Phosphordotierprofil eines zurückgeätzten Emitters (blau) durch den GEB Prozess, eines $65 \text{ } \Omega/\text{sq}$ Emitters (rot), dessen Rückseite poliert und dessen Emitter dabei leicht angeätzt wurde und eines $70 \text{ } \Omega/\text{sq}$ Emitters (schwarz), der für die PERC Zellen mit Rückseitenschutzschicht verwendet wird [147]. b) Vergleich einer POCl_3 Ausgangsdiffusion und des Dotierprofils nach dem GEB Prozess. Das zurückgeätzte Profil ist um 50 nm verschoben.

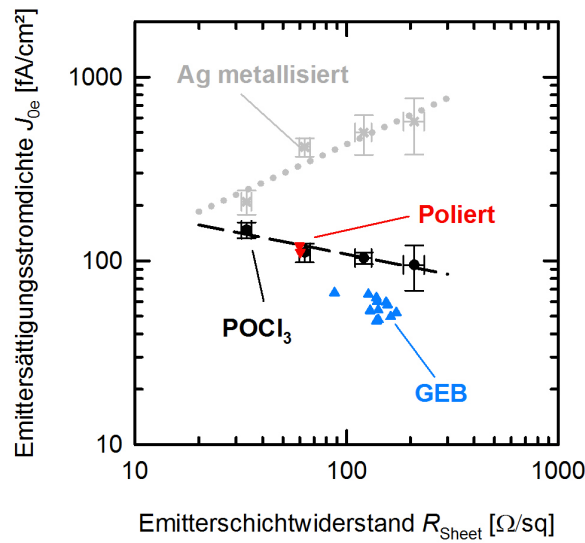


Abb. 7.11: Emittersättigungsstromdichte J_{0e} von homogen POCl_3 diffundierten Emittoren mit Silbersiebdruckkontakten (grau) und SiN_x passivierten Oberflächen (schwarz) aus Abb. 7.2. Der Wert für den Polierprozess mit leicht angeätztem Emittor (rot) liegt geringfügig unter dem der POCl_3 Diffusion. Mit dem GEB Prozess (blau) werden die geringsten Emittersättigungsstromdichten erreicht, die im Vergleich zum diffundierten Emittor ungefähr 40 fA/cm^2 kleiner sind bei gleichem Emitterschichtwiderstand R_{sheet} [147].

Dotierprofilen um 50 nm , wie in Abbildung 7.10 b) dargestellt. Daraus lässt sich ein Abtrag von 50 nm der Emittoroberfläche durch den GEB Prozess bestimmen.

Die zu den Emittordotierprofilen gehörigen Emittersättigungsstromdichten J_{0e} wurden mit der QSSPC Methode gemessen und sind in Abbildung 7.11 gezeigt. Die gemessenen Werte für den PERC Politurprozess (rote Datenpunkte) und den mit GEB zurückgeätzten Emittor (blaue Datenpunkte) werden in die vorhandene Abbildung 7.2 aus Kapitel 7.1 eingefügt.

Die J_{0e} im passivierten Bereich für den PERC Prozess mit polierter Rückseite und schwach angeätztem Emittor liegt geringfügig unter der für eine normale POCl_3 Diffusion. Der Gas Phase Etch Back Prozess erzielt dagegen für einen Schichtwiderstand von $90 \Omega/\text{sq}$ eine $J_{0e,\text{pass}}$ von 67 fA/cm^2 gegenüber 110 fA/cm^2 für den POCl_3 diffundierten Emittor. Allgemein zeigt sich, dass der GEB Prozess in ca. 40 fA/cm^2 geringeren $J_{0e,\text{pass}}$ Werten im Vergleich zu typischen POCl_3 diffundierten Emittoren des gleichen Schichtwiderstandes resultiert. Der Grund dafür ist, dass beim GEB die reduzierte Dicke der hochdotierten Oberfläche zu einer reduzierten Shockley-Read-Hall und Auger-Rekombination führt.

Mithilfe der gemessenen Emittersättigungsstromdichten lässt sich vor der IV Messung der V_{oc} Gewinn durch die reduzierte $J_{0e,\text{pass}}$ abschätzen. Für die J_{0e} der homogen diffundierten PERC Solarzellen mit Rückseitenschutzschicht und $70 \Omega/\text{sq}$ Emittor wird eine Metallisierungsfläche f des Silbersiebdrucks von 6% angenommen. Damit berechnet sich

J_{0e} nach Gleichung 2.7 zu

$$J_{0e} = f \cdot J_{0e,met} + (1 - f) \cdot J_{0e,pass} = 140 \text{ fA/cm}^2$$

mit $J_{0e,pass} = 120 \text{ fA/cm}^2$ und $J_{0e,met} = 450 \text{ fA/cm}^2$.

Die PERC Solarzellen mit polierter Rückseite und schwach angeätztem Emitter mit $65 \text{ } \Omega/\text{sq}$ im metallisierten und passivierten Bereich resultieren in

$$J_{0e} = 94\% \cdot 115 \text{ fA/cm}^2 + 6\% \cdot 450 \text{ fA/cm}^2 = 135 \text{ fA/cm}^2.$$

Für den Gas Phase Etch Back wird diese Berechnung beispielhaft mit den Werten der Gruppe GEB (1) durchgeführt. Für den GEB Prozess enthält J_{0e} die Emittersättigungsstromdichte $J_{0e,met}$ der metallisierten Fläche, $J_{0e,pass}$ der passivierten Fläche direkt neben den Metallkontakten mit POCl_3 diffundiertem Emitter sowie $J_{0e,GEB}$ der Fläche des zurückgeätzten Emitters mittels Gasphase. Auf Basis der auf $200 \text{ } \mu\text{m}$ reduzierten Ätzbarriere nach dem GEB Prozess wird eine Fläche $k = 10\%$ des SiN_x passivierten Emitters direkt neben den Metallkontakten angenommen, die bis zum Ende des Prozesses geschützt war. Aufgrund der Reinigungsprozesse wird dort sowie unter den Metallkontakten ein Schichtwiderstand von $60 \text{ } \Omega/\text{sq}$ abgeschätzt.

Die erzielte J_{0e} der Gruppe GEB (1) mit $88 \text{ } \Omega/\text{sq}$ im zurückgeätzten Bereich beträgt

$$J_{0e} = (1 - f - k) \cdot J_{0e,GEB} + f \cdot J_{0e,met} + k \cdot J_{0e,pass} = 89 \text{ fA/cm}^2 \quad (7.1)$$

mit den eingesetzten Werten $J_{0e,GEB} = 67 \text{ fA/cm}^2$, $J_{0e,met} = 330 \text{ fA/cm}^2$ und $J_{0e,pass} = 125 \text{ fA/cm}^2$.

Dementsprechend reduziert der selektive Emitter mittels Gas Phase Etch Back die J_{0e} um 46 fA/cm^2 gegenüber dem PERC Prozess mit polierter Rückseite bzw. um 51 fA/cm^2 gegenüber dem PERC Prozess mit Rückseitenschutzschicht, was einer Verbesserung der Leerlaufspannung V_{oc} von 4 mV bis 5 mV bei einem J_{0b} Beitrag von 180 fA/cm^2 zur gesamten J_0 der Solarzelle entspricht.

7.5.2 Ergebnisse PERC Solarzellen

Die besten PERC Solarzellen jeder Gruppe mit IV Parametern sind in Tabelle 7.3 aufgelistet. Der beste Wirkungsgrad von $20,3\%$ [147] wird für die Gruppe GEB (1) erzielt und ist vom ISE CalLab unabhängig bestätigt. Die beiden anderen Prozessvariationen des GEB mit einem finalem Schichtwiderstand von $110 \text{ } \Omega/\text{sq}$ bzw. $120 \text{ } \Omega/\text{sq}$ im passivierten Bereich erzielen ähnliche Zellparameter mit einem am ISFH gemessenen Wirkungsgrad von $20,3\%$. Die PERC Solarzellen mit dem selektiven Emitter mittels GEB haben einen um $0,1\%_{\text{abs}}$ höheren Wirkungsgrad als die PERC Solarzelle mit industriellen Politurprozess der Rückseite. Gegenüber dem Basisprozess mit Rückseitenschutzschicht beträgt der Wirkungsgradgewinn mit GEB $0,3\%_{\text{abs}}$. Der Wirkungsgradgewinn beruht dabei auf der Steigerung der Leerlaufspannung V_{oc} und der Kurzschlussstromdichte J_{sc} mit selektivem GEB Emitter. Ein Teil dieses Gewinns wird durch den besseren Füllfaktor der PERC Zellen mit homogenem Emitter kompensiert.

Tab. 7.3: IV Parameter von PERC Silizium Solarzellen mit selektivem Emittter durch Gas Phase Etch Back (GEB) Prozess im Vergleich zu PERC Zellen mit einem industrietypischen Politurprozess der Rückseite und PERC Zellen mit einer Rückseitenschutzschicht. Gemessen unter Standardtestbedingungen (25 °C, AM1.5G, 100 mW/cm²).

Gruppe	Emittter	R_{sheet} metallisiert/ passiviert [Ω/sq]	η [%]	V_{oc} [mV]	J_{sc} [mA/cm ²]	FF [%]
GEB PERC (1)	Selektiv	60/88	20,3*	660	38,3	80,3
GEB PERC (2)	Selektiv	70/110	20,3	657	38,5	80,1
GEB PERC (3)	Selektiv	70/120	20,3	657	38,6	80,0
PERC Politur	Homogen	65/65	20,2	655	38,0	81,0
PERC Schutzschicht	Homogen	70/70	20,0	649	38,1	80,9

*unabhängig bestätigt vom Fraunhofer ISE CalLab

Die um 2 mV bis 5 mV höhere V_{oc} für die GEB Prozesse im Vergleich zur PERC Solarzelle mit Politurprozess ist in Übereinstimmung mit der Abschätzung des V_{oc} Gewinns durch die J_{0e} Analyse. Die nochmals um 6 mV geringere Leerlaufspannung für den PERC Prozess mit Schutzschicht entspricht dagegen nicht der J_{0e} Berechnung und liegt auch unter den normalerweise üblichen V_{oc} Werten dieses Basisprozesses. Ein mögliche Erklärung dafür ist, dass bei der nasschemischen Reinigung vor Passivierung der Gruppe PERC Schutzschicht Verunreinigungen der Siliziumoberflächen entstanden sind. Da die anderen Gruppen aufgrund der Politur der Rückseite andere Reinigungsprozesse durchlaufen haben, wären sie dieser Verunreinigung nicht ausgesetzt gewesen. Die verwendeten Emittersättigungsstromdichten der POCl_3 Diffusion aus Abbildung 7.11 zur Berechnung der gesamten J_{0e} der Gruppe PERC Schutzschicht wurden zu einem anderen Zeitpunkt prozessiert. Daher sind Unterschiede zwischen diesen J_{0e} Werten und denen tatsächlich auf den PERC Solarzellen mit Schutzschicht erzielten aufgrund von Verunreinigungen nicht ausgeschlossen.

Für die Analyse des J_{sc} Gewinns dient die Messung der internen Quanteneffizienz in Abbildung 7.12. Die höchste gemessene Kurzschlussstromdichte aus Gruppe GEB (3) korreliert mit der höchsten Quantenausbeute im blauen Spektralbereich. Die interne Quanteneffizienz der beiden GEB Varianten liegt für kurze Wellenlängen ≤ 600 nm über den IQE der PERC Solarzellen mit homogenem Emittter der Gruppen Rückseitenpolitur und Rückseitenschutzschicht, wodurch die höhere J_{sc} der GEB PERC Solarzellen der erhöhten Quantenausbeute im blauen Spektralbereich zugeschrieben werden kann. Die Auswertung der internen Quanteneffizienz der Gruppe GEB (3) ergibt eine Steigerung von 0,5 mA/cm² im Vergleich zum PERC Prozess mit Schutzschicht und 0,7 mA/cm² zum Politurprozess, was im Rahmen der Messunsicherheit von 0,2 mA/cm² in Übereinstimmung mit den gemessenen J_{sc} ist.

Das Ergebnis dieses Experiments mit dem neuen Prozess zur Herstellung eines selektiven Emitters zeigt erste Ansätze zur Verbesserung des Wirkungsgrades auf Basis eines Laborprozesses und das Potenzial durch die J_{0e} und IQE Analyse.

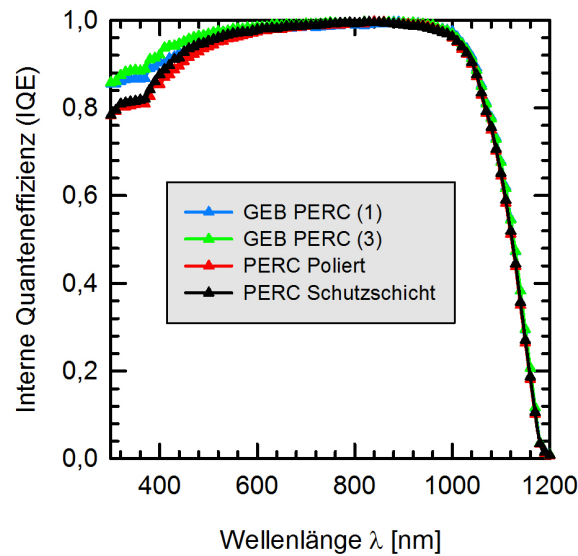


Abb. 7.12: Interne Quanteneffizienz (IQE) der PERC Solarzellen aus Tabelle 7.3. Die PERC Solarzellen mit selektivem Emitter mittels Gas Phase Etch Back zeigen eine verbesserte Ausbeute im blauen Spektralbereich, was zu höheren J_{sc} führt. Die Auswertung der internen Quanteneffizienz ergibt mit Prozess GEB (3) einen Gewinn von $0,5 \text{ mA/cm}^2$ im Vergleich zum PERC Prozess mit Schutzschicht und $0,7 \text{ mA/cm}^2$ zum Politurprozess, was in Übereinstimmung mit den gemessenen J_{sc} ist.

7.6 Gas Phase Etch Back als Industrieprozess mit Dual Print und 5 Busbars

Für eine industrielle Umsetzung des Gas Phase Etch Back (GEB) Prozesses gibt es zwei wesentliche Voraussetzungen, die miteinander zusammenhängen. Während im Laborprozess des vorigen Kapitels das Phosphorsilikatglas (PSG) vor der Politur und dem Emitterätzen entfernt wurde, ist dies für die verwendete industrielle Anlage von RENA nicht praktikabel. Der Grund dafür ist der Aufbau der Anlage für den Politurprozess, bei dem die PSG Ätze im Prozessbad am Ende nach der Entfernung der rückseitigen Textur und Diffusion stattfindet [43].

Eine Alternative ist das Ätzen des PSG durch die Gasphase. Um durch die Gasphase zuerst das PSG im Bereich zwischen den späteren Kontaktfingern zu entfernen und anschließend noch den Emitter zu ätzen, wird eine höhere Ätzrate der reaktiven Gasphase benötigt. Dies wiederum führt dazu, dass die im Laborprozess verwendete Siliziumdioxid-Lösung als Barrierematerial nicht mehr verwendet werden kann, da sie diesem Prozess nicht standhält.

Damit kommen nur die anderen beiden in Kapitel 7.4 untersuchten Barrierematerialien in Frage, trotz der Gefahr einer Verunreinigung der Anlage bei einem Waferbruch. Für das abschließende Experiment mit dem Gas Phase Etch Back als Industrieprozess, bei dem das PSG nicht vor dem Politurprozess abgenommen wird, fällt die Wahl des

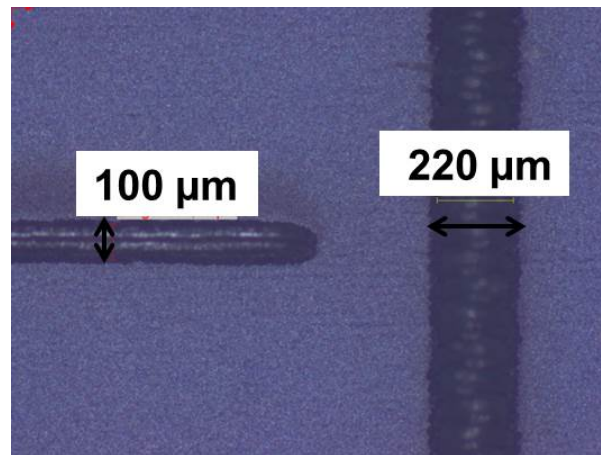


Abb. 7.13: Lichtmikroskopbild der mittels Inkjet aufgedruckten Ätzbarriere für den Gas Phase Etch Back als industriellen Prozess. Die 100 μm breite Ätzbarriere dient als Schutz für die späteren Silberkontaktfinger. Zusätzlich wird eine ungefähr 220 μm breite Ätzbarriere um den Rand des Wafers gedruckt. Dies verhindert den Kantenumgriff des Ätzmediums während des Politurprozesses durch die hydrophile Oberfläche des Wafers aufgrund des vorhandenen Phosphorsilikatglases.

Barriermaterials auf den Hotmelt-Wachs, der mittels Inkjet aufgebracht wird.

Durch das PSG ist die Vorderseite während des Politurprozesses hydrophil. Voruntersuchungen zeigen, dass durch eine hydrophile Oberfläche das Ätzmedium auf den Rand der Vorderseite gelangt und dort nasschemisch ätzt. Abhilfe schafft in dem Fall eine zusätzliche Umrandung des Wafers mit der Ätzbarriere, die gleichzeitig mit der Barriere für das Fingergrid gedruckt wird. Abbildung 7.13 zeigt ein Lichtmikroskopbild mit der ca. 100 μm breiten Ätzbarriere für die Kontaktfinger und die umlaufende Ätzbarriere mit 220 μm Breite als Schutz vor einem Kantenumgriff des Ätzmediums.

Der komplette Prozessfluss für den industriellen GEB Prozess ist in Abbildung 7.14 schematisch als Flussdiagramm dargestellt. Nach der Waferreinigung folgt die beidseitige Textur und Diffusion. Es folgt das Bedrucken der Wafervorderseite mit der Ätzbarriere aus Hotmelt-Wachs mittels Inkjet. Simultan zur Politur der Rückseite erfolgt das Emitterrückätzen zwischen den späteren Kontaktfingern durch die reaktive Gasphase. Nachfolgend wird die Ätzbarriere sowie das sich gebildete poröse Silizium auf der Vorderseite gleichzeitig in KOH entfernt. Das restliche PSG unter der Ätzbarriere wird in einem HF Schritt beseitigt. Die anschließenden Passivierungen und Siebdruckschritte entsprechen dem Prozessverlauf der PERC Solarzellen mit Rückseitenschutzschicht.

Um den Prozess mit dem größten Potenzial für hohe Wirkungsgrade zu verwenden, werden die Erkenntnisse aus den vorigen Kapiteln 5 und 6 für die Silberkontaktfinger und das Busbar-Layout angewendet. Für die Metallisierung der Vorderseite wird der Dual Print Prozess mit einem 5 Busbar-Layout verwendet. Für den Busbardruck beim Dual Print wird eine nicht-durchfeuernde Silberpaste benutzt. Die Kontaktfinger werden mit einer Schablone und 25 μm Fingeröffnung mit Metallrakel und spezieller Silberpaste für Schablonen gedruckt, die eine erhöhte Viskosität aufweist.

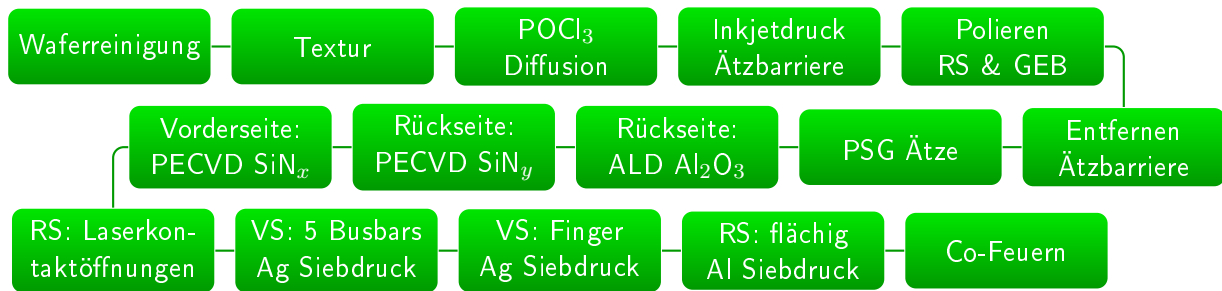


Abb. 7.14: Einzelne Prozessschritte von der Waferreinigung bis zum Co-Feuern des Gas Phase Etch Back Prozesses auf industriellem Maßstab. Der einzig zusätzliche Prozessschritt im Vergleich zu einem industriellen PERC Prozess mit homogenem Emitter ist das Drucken der Ätzbarriere, da die Prozesse zur Entfernung der Ätzbarriere und des PSG auch bei einer reinen Rückseitenpolitur für einen PERC Prozess mit homogenem Emitter verwendet werden.

Der einzige zusätzliche Prozessschritt in diesem Versuch im Vergleich zu einem industriellen PERC Prozess mit homogenem Emitter ist das Drucken der Ätzbarriere, da die Prozessbecken mit KOH zur Entfernung des porösen Siliziums und der Ätzbarriere und mit HF zur Entfernung des PSG in den Anlagen schon integriert sind und für einen PERC Prozess mit homogenem Emitter mit Rückseitenpolitur auch verwendet werden. Dieser einfache Prozessfluss neben der Verwendung von industrietypischen Prozessen und Anlagen macht den Gas Phase Etch Back Prozess in dieser Form auch umsetzbar für die Industrie.

Zum Vergleich wird eine Referenzgruppe prozessiert, die den aus Kapitel 2.2.1 bekannten Prozessfluss ohne Politur, aber mit Rückseitenschutzschicht vor Textur und Diffusion, durchläuft. Als POCl₃ Diffusion für die Referenz wird die analysierte Diffusion aus den Kapiteln 7.1 und 7.2 verwendet, die dort einen Emitterschichtwiderstand von 125 Ω/sq und den besten Wirkungsgrad von 20,8% erzielte.

7.6.1 Analyse des zurückgeätzten Emitters

In dem jetzigen Experiment hat die POCl₃ Diffusion der Referenz nach allen Reinigungsprozessen einen finalen Emitterschichtwiderstand von 107 Ω/sq. Für die Untersuchung der optimalen Kombination aus Diffusion und Politurabtrag für den GEB Prozess werden zwei verschiedene POCl₃ Diffusionen getestet, die einen Emitterschichtwiderstand von 52 Ω/sq (Diffusion X) bzw. 60 Ω/sq (Diffusion Q) direkt nach Diffusion erzeugen. Alle Variationen des GEB Prozesses mit den Schichtwiderständen in den verschiedenen Bereichen sind in Tabelle 7.4 aufgelistet. Für die Diffusion X führt der Emitterabtrag zu einem finalen Schichtwiderstand im geätzten Bereich von 112 Ω/sq. Für die Diffusion Q werden unterschiedliche Politurgeschwindigkeiten verwendet. Damit werden finale Emitterschichtwiderstände zwischen 127 Ω/sq und 156 Ω/sq im passivierten Bereich erzielt. Je länger der Prozess, desto größerer der Siliziumabtrag auf der Rückseite und desto größer auch der Emitterabtrag.

Anhand der Abbildung 7.15 lässt sich verdeutlichen, dass der Prozess des Emitterrückät-

Tab. 7.4: Verwendete Gruppen der Untersuchung eines Industrieprozesses mit selektivem Emitter mittels Gas Phase Etch Back. Die PERC Referenz hat eine Schutzschicht vor Textur und Diffusion auf der Rückseite und benötigt daher keine Politur. Die dargestellten Emitterschichtwiderstände wurden mittels QSSPC Methode bestimmt.

Gruppe	Emitter	R_{sheet} nach Diffusion [Ω/sq]	Finaler R_{sheet} unter Ag Kontakten [Ω/sq]	Finaler R_{sheet} unter Passivierung [Ω/sq]
Referenz	Homogen	90	107	107
GEB 1X	Selektiv	52	57	112
GEB 2Q	Selektiv	60	66	127
GEB 3Q	Selektiv	60	66	145
GEB 4Q	Selektiv	60	66	156

zens durch die Gasphase auch mit PSG auf der Oberfläche funktioniert. Gezeigt ist der Vergleich der Diffusion Q ohne und mit Anwendung des Gas Phase Etch Back. Das Dotierprofil ist in diesem Beispiel um 35 nm verschoben worden, um es mit dem Ausgangsprofil der Diffusion zu überlagern. Der geringere Emitterabtrag im Vergleich zu den 50 nm aus dem Laborprozess in Kapitel 7.5 hat seine Ursache im noch vorhandenen PSG, das während des GEB Prozesses zuerst geätzt werden muss, bevor der eigentliche Emitterabtrag beginnt.

Die zu den verschiedenen Versuchsgruppen aus Tabelle 7.4 gehörigen Emittersättigungsstromdichten wurden mit der QSSPC Methode gemessen und sind in Abbildung 7.16 gezeigt. Die Ergebnisse für die Diffusionen X bzw. Q entsprechen den $J_{0e,\text{pass}}$ Werten der Flächen, die durch die Ätzbarriere vor dem Emitterangriff geschützt waren und nicht metallisiert werden. Bei 100 μm Barrierenbreite und 35 μm finaler Fingerbreite entspricht dies 65 μm je Kontaktfinger und damit 5,5% der Waferoberfläche. Die homogene Referenz für die PERC Solarzellen mit Rückseitenschutzschicht erzielt eine $J_{0e,\text{pass}}$ von 85,7 fA/cm^2 im Mittel. Die verschiedenen GEB Prozesse erzielen kleinere $J_{0e,\text{pass}}$ Werte, unterscheiden sich aber untereinander nur geringfügig mit im Mittel zwischen 43,0 fA/cm^2 und 35,7 fA/cm^2 .

Ein wichtiger Aspekt für einen funktionierenden Prozess ist die Homogenität des Emitterabtrags auf der Vorderseite. Beispielhaft dazu sind in Abbildung 7.17 Mappings der mit 4-Punkt Methode gemessenen Schichtwiderstände der Gruppe GEB 2Q nach verschiedenen Prozesssequenzen gezeigt. Für die Herstellung des Mappings wird automatisch jede 15 mm ein Messpunkt aufgenommen und der Bereich dazwischen interpoliert. Gemessen wird der Schichtwiderstand auf Testwafern, auf die nur die äußere Ätzbarriere als Schutz vor der Nasschemie gedruckt wurde.

Nach Diffusion wird damit über das gesamte Mapping ein durchschnittlicher Schichtwiderstand von 58,5 Ω/sq gemessen mit einer Standardabweichung von 1,8 Ω/sq .

Direkt nach dem Gas Phase Etch Back Prozess, wenn das poröse Silizium noch auf der Vorderseite ist, zeigen die Randbereiche teilweise deutlich höhere Emitterschichtwiderstände durch den Gasphasenangriff; insbesondere an der Kante, die in Fahrtrichtung wä-

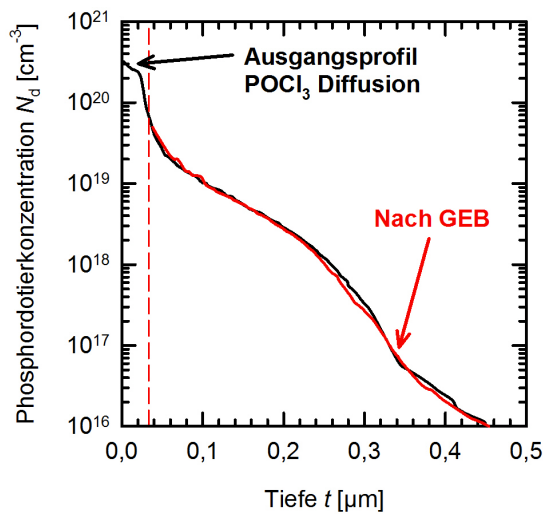


Abb. 7.15: Mittels ECV gemessene Phosphordotierprofile der Diffusion Q ohne und mit Anwendung des GEB. Das Dotierprofil des GEB Prozesses ist um 35 nm verschoben, um es mit dem Ausgangsprofil der Diffusion Q zu überlagern, was auf den selben Wert als Emittierabtrag schließen lässt.

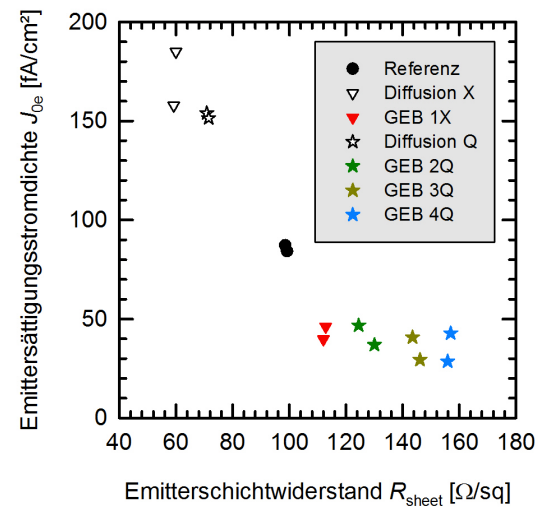


Abb. 7.16: Mittels QSSPC Methode gemessene Emittersättigungsstromdichten J_{0e} zu den in Tabelle 7.4 aufgeführten Versuchsgruppen. Die verschiedenen GEB Prozesse erzielen geringere $J_{0e,pass}$ Werte als die homogene Referenz.

rend des Polierprozesses zeigt (in der Graphik unten). Da diese Bereiche nur geschätzte 10% der Waferoberfläche einnehmen, werden die jeweils äußersten Messpunkte vernachlässigt und der Mittelwert im Folgenden über eine Fläche von $120 \times 120 \text{ mm}^2$ angegeben. Nach GEB wird ein Schichtwiderstandswert von $69,8 \pm 6,5 \text{ } \Omega/\text{sq}$ gemessen und berechnet. Die geringe Standardabweichung des Schichtwiderstandes verdeutlicht die Homogenität des Prozesses.

Nach der Anwendung von KOH und HF zur Entfernung des porösen Siliziums und der Ätzbarriere bzw. des PSG von der Oberfläche ist die Schichtwiderstandsverteilung etwas inhomogener mit einer Standardabweichung von $12,1 \text{ } \Omega/\text{sq}$ bei durchschnittlich $116,1 \text{ } \Omega/\text{sq}$. Bis zu diesem Prozessschritt haben die durchgeführten Prozesse nur Einfluss auf den zurückgeätzten Emittierbereich gehabt und erzeugen dadurch die Selektivität des Emitters.

Die letzten Reinigungen vor Passivierung haben Einfluss auf den kompletten Wafer und erhöhen auch den Schichtwiderstand im Bereich der vorher vorhandenen Ätzbarriere im Fall der PERC Solarzellen. Die Reinigungen führen zu einem finalen Schichtwiderstand von $142,0 \pm 16,6 \text{ } \Omega/\text{sq}$. Dieser Mittelwert stimmt nicht mit dem in Tabelle 7.4 überein, da dort die Schichtwiderstände angegeben sind, die mittels QSSPC Methode gemessen wurden, um sie mit den zugehörigen $J_{0e,pass}$ Werten zu vergleichen. Da die QSSPC Messung nur über einen kleinen Teil in der Mitte des Wafers durchgeführt wird, stimmen diese Werte nur im Rahmen der Standardabweichung überein.

Aufgrund der Verteilung des Emitterschichtwiderstandes direkt nach dem Gas Phase

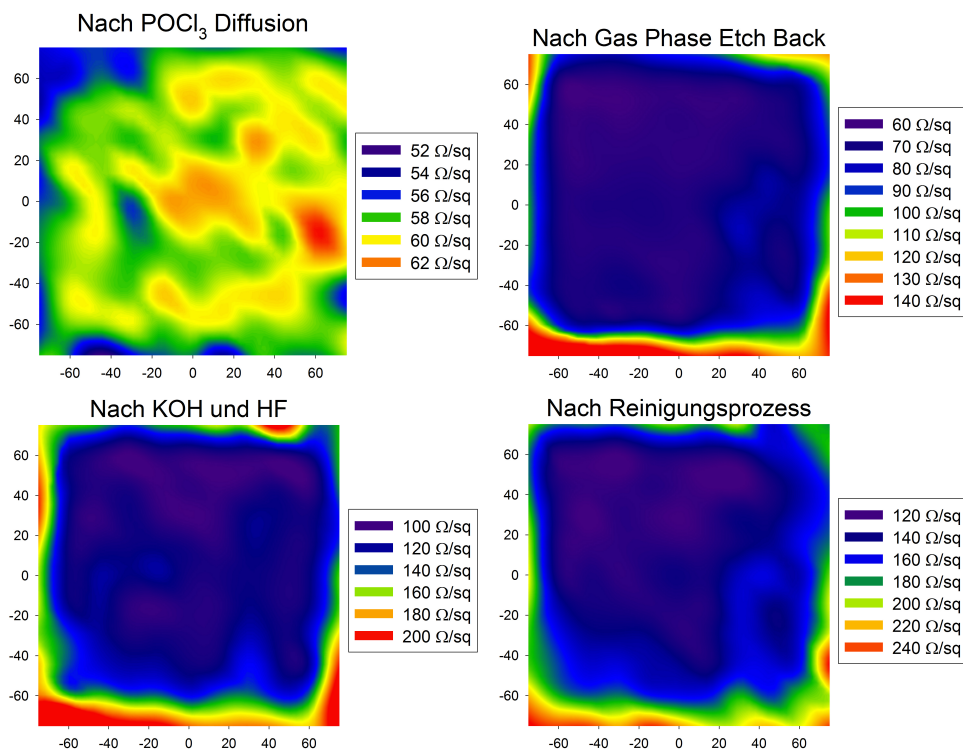


Abb. 7.17: Mappings von Emitterschichtwiderständen der Gruppe GEB 2Q nach verschiedenen Prozesssequenzen. Gemessen auf Testwafern, auf die nur die äußere Ätzbarriere als Schutz vor der Nasschemie gedruckt wurde. Nach dem GEB Prozess zeigen die Randbereiche teilweise deutlich höhere R_{sheet} . Da diese Bereiche nur eine kleine Fläche einnehmen, werden die jeweils äußersten Messpunkte vernachlässigt. Die Mittelwerte über die innere Waferfläche von $120 \times 120 \text{ mm}^2$ betragen: nach POCl_3 Diffusion $58,5 \pm 1,8 \text{ } \Omega/\text{sq}$, nach Gas Phase Etch Back $69,8 \pm 6,5 \text{ } \Omega/\text{sq}$, nach KOH und HF $116,1 \pm 12,1 \text{ } \Omega/\text{sq}$ und nach den Reinigungsprozessen $142,0 \pm 16,6 \text{ } \Omega/\text{sq}$.

Etch Back wird der Prozess als homogen genug für eine Umsetzung angesehen, was die nachfolgenden IV Daten ebenso verdeutlichen.

7.6.2 Ergebnisse PERC Solarzellen

Die am ISFH gemessenen IV Parameter der PERC Solarzellen mit den verschiedenen GEB Prozessvarianten sowie der homogenen Referenz sind in Abbildung 7.18 gezeigt.

Der höchste Wirkungsgrad von 21,6% wird von der Gruppe GEB 1X mit selektivem GEB Emitter erzielt. Mit den anderen GEB Gruppen wird maximal ein η von 21,4% gemessen. Im Vergleich dazu erreicht der höchste Wirkungsgrad mit der homogenen Referenz einen Wert von 21,3%. Im Mittel erzielen die Gruppen der PERC Solarzellen mit selektivem Emitter mittels Gas Phase Etch Back einen Wirkungsgradgewinn von 0,1%_{abs} bis 0,2%_{abs} gegenüber der homogenen Referenz.

Der Wirkungsgradgewinn ist hauptsächlich durch Steigerungen in V_{oc} bedingt. Dort erzielen die PERC Solarzellen mit GEB durch die geringe $J_{0e,pass}$ durchschnittlich um

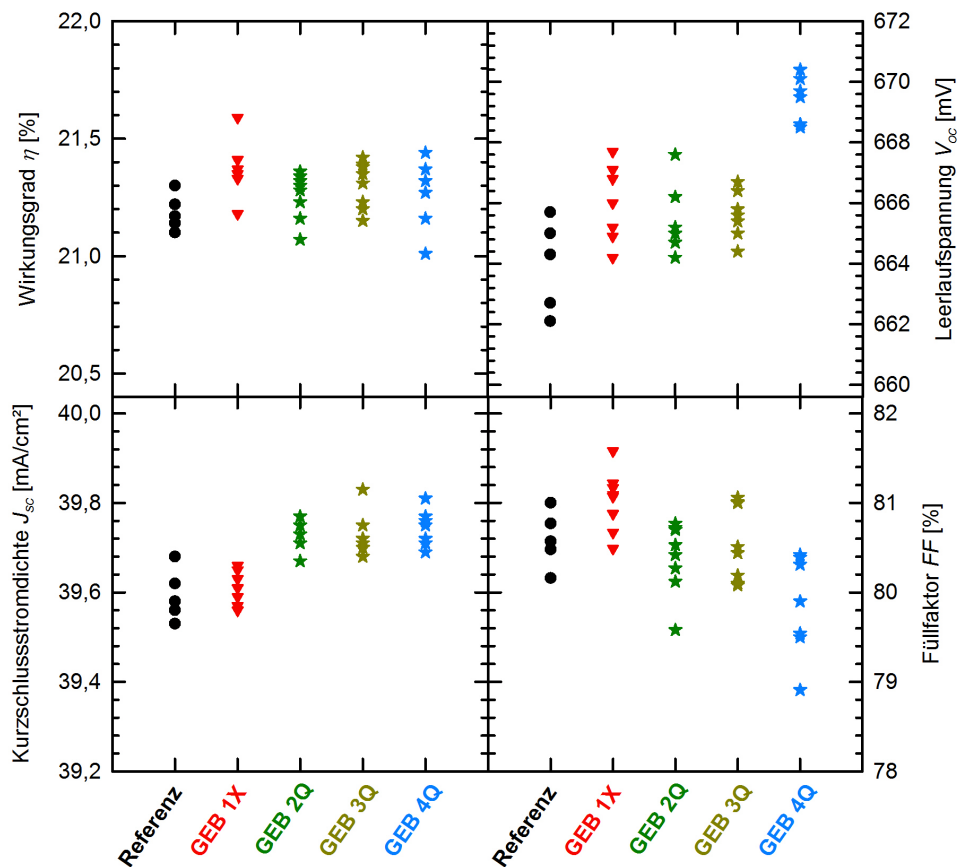


Abb. 7.18: Am ISFH gemessener Wirkungsgrad η , Leerlaufspannung V_{oc} , Kurzschlussstromdichte J_{sc} und Füllfaktor FF von PERC Solarzellen mit selektivem Emitter mittels Gas Phase Etch Back und einer Referenz mit homogenem POCl_3 Emitter. Die Erklärung der verschiedenen Gruppen ist Tabelle 7.4 zu entnehmen. Der beste Wirkungsgrad liegt bei 21,6% und wird von der Gruppe GEB 1X erzielt. Im Vergleich dazu erreicht die homogene Referenz maximal 21,3%.

2 mV bis 5 mV höhere Werte. Die Berechnung nach Gleichung 7.1 erzeugt für die Gruppe GEB 4Q eine um 45 fA/cm² verringerte J_{0e} im Vergleich zur Referenzgruppe, was bei der Annahme eines J_{0b} Beitrags zur Sättigungsstromdichte von 180 fA/cm² eine V_{oc} Steigerung von 5 mV bewirkt. Dies ist in Übereinstimmung mit den IV Messdaten.

Die Verbesserung in J_{sc} von 0,1 mA/cm² der Gruppen GEB 2Q bis GEB 4Q wird durch den im Mittel geringen Füllfaktor wieder ausgeglichen. Der reduzierte FF lässt sich durch den ansteigenden Emitterschichtwiderstand und infolgedessen höheren Serienwiderstand erklären.

Zur Analyse der Unterschiede in der Kurzschlussstromdichte J_{sc} wird die interne Quanteneffizienz in Abbildung 7.19 betrachtet. Die Solarzellen mit selektivem Emitter erzielen im Wellenlängenbereich von 300 nm bis 500 nm nur geringfügig höhere Signale der IQE im Vergleich zur Referenz mit homogen diffundiertem POCl_3 Emitter. Dies ist in Übereinstimmung mit den Kurzschlussstromdichten der IV Messung, bei denen im Mittel nur die Gruppen GEB 2Q bis GEB 4Q eine Steigerung von 0,1 mA/cm² erzielen, was im

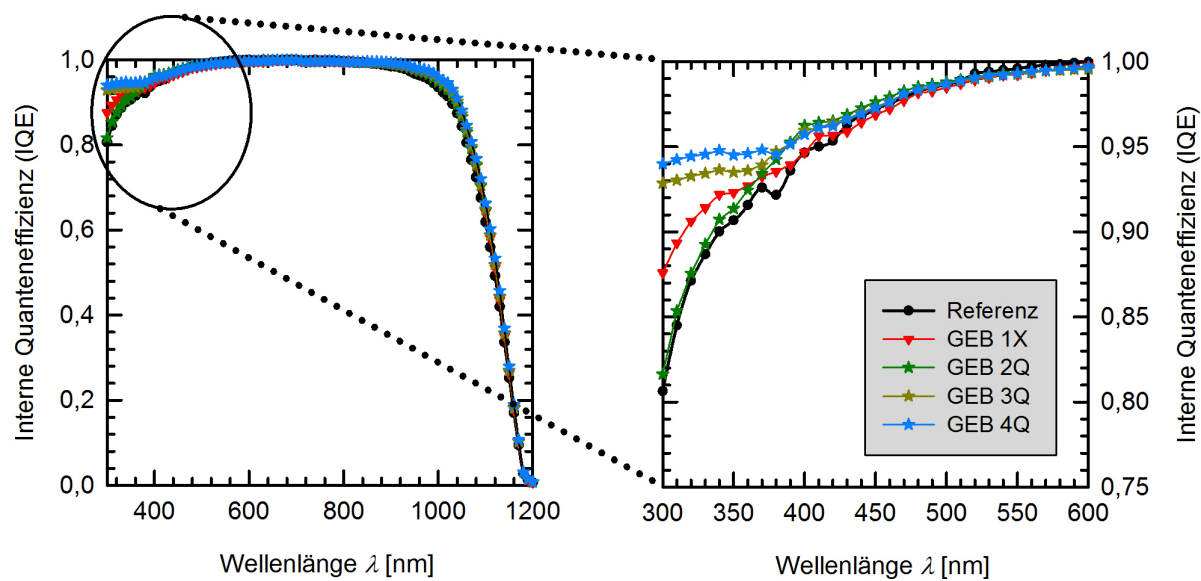


Abb. 7.19: Interne Quanteneffizienz der jeweils besten PERC Solarzelle aus jeder Gruppe der Tabelle 7.4. Die Signale der IQE zeigen kaum Unterschiede im blauen Spektralbereich, was in Übereinstimmung mit den gemessenen Kurzschlussstromdichten ist.

Rahmen der Messunsicherheit liegt.

Abschließend zeigt dieses Experiment durch die Kombination der Optimierungsergebnisse dieser Arbeit mit einem industriellen PERC Prozess mit Dual Print, Multi-Busbar Layout und selektivem Emittter mittels GEB einen Wirkungsgrad über 21,5% - entsprechend dem Ziel dieser Arbeit.

7.7 Zusammenfassung des Kapitels

In diesem Kapitel wurde die Emittersättigungsstromdichte J_{0e} von verschiedenen POCl_3 diffundierten Emitttern bestimmt. Es wurden erstmals die Emittersättigungsstromdichten $J_{0e,met}$ unter industrietypischen siebgedruckten Silberkontakten anhand der kamerabasierten dynamischen Infrarot Lebensdauer Messung (ILM) orts aufgelöst für verschiedene Schichtwiderstände direkt gemessen und analysiert, wodurch in Verbindung mit $J_{0e,pass}$ eine vollständige Beschreibung der J_{0e} möglich ist. Als weiterer Einflussmechanismus der verschiedenen Diffusionen wurde die Auswirkung auf den spezifischen Kontaktwiderstand ρ_c für unterschiedliche Silberpasten untersucht.

Für die Weiterentwicklung von PERC Solarzellen wurde eine neue Technologie zur Herstellung eines selektiven Emitters eingeführt, der sogenannte Gas Phase Etch Back (GEB) Prozess. Dieser basiert auf dem Konzept des Emitterrückätzens in den Bereichen zwischen den Kontaktfingern. Diese neue Technologie hat einen schlanke Prozessfluss, da die genutzte Gasphase während des Polierens der Rückseite von industrietypischen PERC Solarzellen schon vorhanden ist und daher im Optimalfall nur in einem zusätzlichen Prozessschritt eine Ätzbarriere auf die Bereiche der späteren Kontaktfinger gedruckt werden

muss, um den selektiven Emitter zu erzeugen.

In einem ersten Versuch mit labortypischen Prozessen erzielte die GEB Technologie einen Wirkungsgradgewinn von $0,3\%_{\text{abs}}$ gegenüber dem ISFH PERC Basisprozess bzw. $0,1\%_{\text{abs}}$ gegenüber einem PERC Industrieprozess mit homogenem Emitter. Im abschließenden Experiment wurde der GEB Prozess mit industrietypischen Prozessen und Anlagen gefahren und zusätzlich die Erkenntnisse aus den vorigen Kapiteln hinsichtlich der Optimierung der Kontaktfinger und des Busbar-Layouts angewendet. Hierbei wurde für die Kontaktfinger der Dual Print Prozess mit nicht-durchfeuernder Busbarpaste und einem 5 Busbar Layout verwendet.

Damit wurde der beste in dieser Arbeit und am ISFH gemessene Wirkungsgrad von $21,6\%$ erzielt. Der Wirkungsgradgewinn zur Referenz mit homogen diffundiertem Emitter betrug $0,3\%_{\text{abs}}$. Anhand der gemessenen Emittersättigungsstromdichten J_{0e} mit einer Verbesserung von $85,7 \text{ fA/cm}^2$ für den POCl_3 Emitter auf bis zu $35,7 \text{ fA/cm}^2$ für den GEB Emitter und dem dadurch erzielten Gewinn in der Leerlaufspannung V_{oc} von bis zu 5 mV konnte das Potenzial dieses neuen Prozesses gezeigt werden.

8 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden verschiedene Drucktechniken der Kontaktfinger und Veränderungen des Busbar Layouts in Verbindung mit einem neuen Prozess zur Herstellung eines selektiven Emitters experimentell untersucht und analysiert.

Es wurden die drei Drucktechniken Single Print, Print-on-Print und Dual Print optimiert, in dem die Öffnungsbreiten der Kontaktfinger im Sieb bzw. für den Dual Print in der Schablone verringert wurden. Mit der Reduzierung der Fingerbreite konnten die Sieb- bzw. Schablonenparameter herausgearbeitet werden, die zu einer Maximierung des Wirkungsgrades bei gleichzeitiger Minimierung des Silberpastenverbrauchs der Kontaktfinger benötigt werden. Im direkten Vergleich der drei Drucktechniken auf Basis von Solarzellen mit ganzflächigem Al-BSF erzielte der Dual Print mit einer Fingeröffnungsbreite von $30\ \mu\text{m}$ in der Schablone den höchsten Wirkungsgrad von $19,1\%$ und gleichzeitig den niedrigsten Silberpastenverbrauch von $75\ \text{mg}$ für die gesamte Zellvorderseite. Im Vergleich dazu erreichten die beiden anderen Drucktechniken Wirkungsgrade bis $18,8\%$ bei einem Silberpastenverbrauch von $182\ \text{mg}$.

Der Vorteil des Dual Print gegenüber den anderen beiden Drucktechniken liegt in der unabhängig voneinander möglichen Optimierung der Kontaktfinger und Busbars. Für den Druck der Kontaktfinger wird statt einem Sieb eine Schablone verwendet, die kein Maschendrahtgewebe enthält, welches einen Teil der Fingeröffnung verdeckt. Dadurch verringert sich die Variation der Fingerhöhe entlang der Kontaktfinger, was den Linienerwiderstand R_L für eine bestimmte Silberpastenmenge reduziert. Durch Verwendung spezieller Silberpasten für den Busbardruck lassen sich zusätzlich die Rekombination unter der Metallisierung und der Pastenverbrauch verringern.

Anhand des Dual Print Prozesses wurde erstmals eine systematische Analyse der elektrischen Parameter von PERC Solarzellen in Abhängigkeit vom Silberpastenverbrauch der mittels Schablone gedruckten Kontaktfinger gezeigt. Die Variation des Fingerpastenverbrauchs wurde durch Verwendung verschiedener Polyurethanrakel und eines Metallrakels sowie Variation des Rakeldrucks durchgeführt. Hierbei zeigte sich, dass für das verwendete Layout mit 101 Fingern und $40\ \mu\text{m}$ Fingeröffnung in der Schablone ein Fingerpastenverbrauch von mindestens $60\ \text{mg}$ nötig ist, um keine Einbußen im Wirkungsgrad hinnehmen zu müssen. Für einen Fingerpastenverbrauch zwischen $40,7\ \text{mg}$ und $114,1\ \text{mg}$ wurde eine Variation der durchschnittlichen Fingerhöhe von $5,9\ \mu\text{m}$ bis $24,3\ \mu\text{m}$ erzeugt. Dabei wurde nur bei Verwendung eines Metallrakels eine gleichmäßige Verteilung der durchschnittlichen Fingerhöhe über die Solarzelle mit einer Variation von $\leq 0,6\ \mu\text{m}$ gemessen. Mit den verschiedenen Polyurethanrakeln erhöhte sich diese Variation auf bis zu $3,8\ \mu\text{m}$. Durch TLM Messungen wurde eine Abhängigkeit des spezifischen Kontaktwiderstandes ρ_c auf der Vorderseite vom Silberpastenverbrauch beobachtet, die in dieser Art in der Literatur noch nicht gezeigt wurde. Der nachfolgende Vergleich eines modellierten zum

gemessenen Serienwiderstand R_s konnte diese Beobachtung weitestgehend bestätigen. Zur Optimierung der Busbars wurden für den Dual Print Prozess drei Verbesserungsmöglichkeiten untersucht, um den Silberpastenverbrauch zu reduzieren und den Wirkungsgrad zu steigern.

Durch Verwendung spezieller, sogenannter nicht-durchfeuernder Silberpasten für den Busbardruck konnte eine Reduzierung der Emittersättigungsstromdichte $J_{0e,met}$ unter der Busbarmetallisierung gezeigt werden, die im Vergleich zur Verwendung der gleichen Silberpasten für Finger und Busbars zu einer Steigerung der Leerlaufspannung V_{oc} von durchschnittlich bis zu 2 mV führte. Diese Verbesserung in V_{oc} wurde durch geringfügig niedrigere Füllfaktoren FF ausgeglichen. Durch den reduzierten Festkörperanteil der speziellen Busbarpasten in Form von Silber konnte der Silberpastenverbrauch ohne Wirkungsgradverluste um 48 mg gesenkt werden, was einer Ersparnis von \$0,45 Cent/ W_p bei einem Silberpreis von \$500/kg entspricht. Die gemessenen Kräfte in Abrisstests bestätigten die Verwendung dieser Busbarpasten für die Modulverschaltung.

Für die weitere Reduzierung des Silberpastenverbrauchs wurde ein segmentiertes Busbar Layout untersucht. Dieses Layout besteht aus Pads für die IV Messung und als spätere Lötfläche der Verbinderbändchen im Modul. Die Pads sind außen durch zwei schmale Kontaktlinien von 250 μm Breite verbunden. Ohne Wirkungsgradverlust gegenüber dem durchgezogenen Busbar konnte durch Reduzierung der Busbarfläche um bis zu 45% eine Verringerung des Silberpastenverbrauchs um weitere 8 mg bei Verwendung einer nicht-durchfeuernden Silberpaste gemessen werden. Mit dem Layout des segmentierten Busbars wurde der zum damaligen Zeitpunkt niedrigste in der Literatur berichtete Silberpastenverbrauch von 67,7 mg [131] für eine siebgedruckte PERC Siliziumsolarzelle bei einem Wirkungsgrad von 19,8% erzielt.

Zur Steigerung des Wirkungsgrades wurde die Anwendung eines Multi-Busbar Layouts auf PERC Solarzellen untersucht. Experimentell wurde ein konventionelles 3 Busbar Layout mit 3,9 mm Gesamtbreite der Busbars zu einem 5 Busbar Layout mit 2,5 mm Gesamtbreite verglichen. Im Vergleich zum 3 Busbar Layout mit Print-on-Print wurde durch Anwendung des Dual Print Prozesses mit 5 Busbars die Fläche der Vorderseitenmetallisierung von 5,8% auf 4,0% gesenkt und die Kurzschlussstromdichte J_{sc} von 38,9 mA/cm² auf 39,8 mA/cm² erhöht. Mit der dadurch bedingten Wirkungsgradsteigerung von 0,6%_{abs} mit 5 Busbars gegenüber 3 Busbars wurde ein unabhängig bestätigter Wirkungsgrad von 21,2% erzielt, der zum Zeitpunkt der Veröffentlichung [37] der Weltrekordwirkungsgrad für Silizium Solarzellen mit beidseitig gedruckten Metallkontakten war.

Zwar ist die Verschaltung der verwendeten schmalen Busbars von 0,5 mm Breite je Busbar mit der heutigen Technik schwer möglich, eine Verwirklichung ist in den nächsten Jahren aber zu erwarten, da heutzutage schon Kupferbändchen mit 0,8 mm [136] Breite in der Entwicklung sind. Ebenso zeigt sich das Interesse in der Industrie an einem Multi-Busbar Layout in den Ankündigungen von Trina Solar [148] und SolarWorld [149], die 5 Busbar Technologie in die Produktion einzuführen.

Die experimentell erzielten Ergebnisse des Multi-Busbar Layouts wurden mit einem analytischen Modell verglichen. Die Berechnungen für verschiedene Busbar Layouts in der Modellierung verdeutlichten einen Wirkungsgradgewinn von 0,25%_{abs} bei Erhöhung der Busbar Anzahl von 3 auf 5 bei gleichbleibender Gesamtfläche der Busbars. Ein weiterer

Gewinn von $0,2\%_{\text{abs}}$ ergab sich durch die Reduzierung der Gesamtbreite der Busbars von 3,9 mm auf 2,5 mm. In Verbindung mit der nicht im Modell einberechneten Reduzierung der Rekombination durch die verringerte Metallisierungsfläche und den Einsatz der nicht-durchfeuernden Busbarpasten mit Dual Print zeigte sich eine Übereinstimmung mit der experimentell erzielten Wirkungsgradsteigerung von $0,6\%_{\text{abs}}$.

Zur Analyse des Einflusses des Fingerprofils in Kombination mit der Anzahl des Busbars wurden numerische Simulationen durchgeführt. Durch die mit Setaurus Device erzeugte IV Kurve einer Einheitszelle wird mittels einer SPICE Netzwerksimulation die IV Kurve der gesamten Solarzelle mit Metallisierung simuliert, indem die Einheitszelle vielfach erzeugt und mit Widerständen, welche Segmente der Kontaktfinger und Busbars repräsentieren, verbunden wird.

Durch Veränderung der Widerstandselemente der SPICE Simulation wurde der Einfluss der Rauigkeit der Kontaktfinger auf den Wirkungsgrad untersucht. Die Rauigkeit wurde definiert als die Differenz zwischen der maximalen und minimalen Fingerhöhe entlang eines Kontaktfingers mit konstanter Breite. Die Simulationen zeigten, dass mit mehr Busbars die Sensitivität des Wirkungsgrades durch die Rauigkeit der Fingerhöhe abnimmt. Die Simulation des Wirkungsgrades über den Fingerpastenverbrauch durch Veränderung der Fingerhöhe und Rauigkeit bestätigte die experimentellen Ergebnisse mit Dual Print. Zudem konnte dargestellt werden, dass für die Beibehaltung des Wirkungsgrades mit größerer Anzahl Busbars kleinere Fingerhöhen und damit einhergehend ein niedrigerer Silberpastenverbrauch benötigt wird.

Neben der Metallisierung wurde zur Verbesserung der Solarzellenvorderseite die Optimierung des Emitters untersucht. Zur Analyse von POCl_3 diffundierten Emittern wurden erstmals die Emittersättigungsstromdichten $J_{0e,\text{met}}$ unter industrietypischen siebgedruckten Silberkontakten anhand der kamerabasierten dynamischen Infrarot Lebensdauer Messung (ILM) orts aufgelöst für verschiedene Schichtwiderstände direkt gemessen [129]. In Verbindung mit $J_{0e,\text{pass}}$ ist dadurch eine vollständige Beschreibung der J_{0e} möglich. Als weiterer Einflussmechanismus der verschiedenen Diffusionen wurde die Auswirkung auf den spezifischen Kontaktwiderstand ρ_c für unterschiedliche Silberpasten untersucht.

Für die Weiterentwicklung von PERC Solarzellen wurde eine neue Technologie zur Herstellung eines selektiven Emitters eingeführt, der sogenannte Gas Phase Etch Back (GEB) Prozess. Dieser basiert auf dem Konzept des Rückätzens eines POCl_3 diffundierten Emitters in den Bereichen zwischen den Kontaktfingern. Im Gegensatz zu existierenden Prozessen des Emitterrückätzens mit mehreren zusätzlichen Prozessschritten wird beim GEB im Optimalfall nur ein zusätzlicher Prozessschritt im Vergleich zu einem industriellen PERC Prozess benötigt, um den selektiven Emitter herzustellen.

Der GEB Prozess verwendet die vorhandene Gasphase eines einseitigen Polierprozesses der Rückseite von industrietypischen PERC Solarzellen zum Ätzen der Emitteroberfläche. Durch Aufbringen einer Ätzbarriere auf die Bereiche der späteren Kontaktfinger als zusätzlichen Prozessschritt wird die Selektivität des Emitters erzeugt.

In einem ersten Versuch mit labortypischen Prozessen erzielte die GEB Technologie mit einem 3 Busbar Layout einen Wirkungsgradgewinn von $0,3\%_{\text{abs}}$ gegenüber dem ISFH PERC Basisprozess bzw. $0,1\%_{\text{abs}}$ gegenüber einem PERC Industrieprozess mit homogenem Emitter. Dieser Wirkungsgradgewinn durch die Steigerung der V_{oc} konnte anhand

der gemessenen $J_{0e,pass}$ Werte verifiziert werden. Allgemein resultierte der zurückgeätzte Emitter in ca. 40 fA/cm^2 niedrigere $J_{0e,pass}$ Werte als ein homogen diffundierter POCl_3 Emitter.

Im abschließenden Experiment wurde der GEB Prozess mit industrietypischen Prozessen und Anlagen gefahren und zusätzlich die Erkenntnisse aus den Optimierungen der Kontaktfinger und Busbars angewendet. Für die Kontaktfinger wurde der Dual Print Prozess mit Metallrakel und einer Fingeröffnung von $25 \text{ }\mu\text{m}$ verwendet. Die Busbars wurden mit einem 5 Busbar Layout mit je $0,5 \text{ mm}$ Busbarbreite und nicht-durchfeuernder Silberpaste gedruckt. Mit dieser Kombination der Optimierungen wurde der beste in dieser Arbeit erzielte und am ISFH gemessene Wirkungsgrad von $21,6\%$ erreicht. Der Wirkungsgradgewinn zur Referenz mit homogen diffundiertem Emitter betrug $0,3\%_{\text{abs}}$. Anhand der gemessenen Emittersättigungsstromdichten $J_{0e,pass}$ im passivierten Bereich zwischen den Kontaktfingern mit einer Verbesserung von $85,7 \text{ fA/cm}^2$ für den POCl_3 Emitter auf bis zu $35,7 \text{ fA/cm}^2$ für den GEB und dem dadurch erzielten Gewinn in der Leerlaufspannung V_{oc} von bis zu 5 mV konnte das Potenzial dieses neuen Prozesses gezeigt werden.

Literaturverzeichnis

- [1] METZ, A. ; DEMENIK, G. ; RICHTER, A. ; T.VLASENKO ; BUCHOVSKAYA, I. ; ZWEGERS, M. ; XU, H. ; LUAN, A. ; WERTZ, R. ; STASSEN, A. ; FORSTNER, H. ; JOOSS, W. ; HAASE, J. ; DORNBERGER, E. ; RAITHEL, S. ; SZLUFCEK, J. ; COLETTI, G. ; SINKE, W. ; WYERS, P. ; ZHU, J. ; ZHANG, S. ; GUO, A. ; MAOSHENG, L. ; XIA, J. ; YUJUN, Z. ; DONG, J. ; JIAN, C. ; LI, S. ; YUNPENG, J. ; AIMIN, X. ; XING, G. ; FISCHER, M. ; ENGELHARDT, P. ; GERLACH, A. ; PETTER, K. ; SPIESS, T. ; METTE, A. ; METTE, M. ; WANG, K. ; LI, C.-C. ; WAN, Y. ; LI, G. ; LIN, KC ; YONG, L. ; JULSRUD, S.: International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV) 2014 Results. April 2015. – Forschungsbericht
- [2] METTE, A.: *New concepts for front side metallization of industrial silicon solar cells*, Fakultät für Angewandte Wissenschaften der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau, Diss., 2007
- [3] BLAKERS, A. W. ; WANG, A. ; MILNE, A. M. ; ZHAO, J. ; GREEN, M. A.: 22.8% efficient silicon solar cell. In: *Applied Physics Letters* 55 (1989), S. 1363–1365
- [4] ENGELHART, P. ; MANGER, D. ; KLÖTER, B. ; HERMANN, S. ; STEKOLNIKOV, A. A. ; PETERS, S. ; PLOIGT, H.-C. ; EIFLER, A. ; KLENKE, C. ; MOHR, A. ; ZIMMERMANN, G. ; BARKENFELT, B. ; SUVA, K. ; WENDT, J. ; KADEN, T. ; RUPP, S. ; RYCHTARIK, D. ; FISCHER, M. ; MÜLLER, J. W. ; WAWER, P.: Q.ANTUM - Q-Cells next generation high-power silicon cell & module concept. In: *Proceedings 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference* (2011), S. 821–826. – Hamburg, Germany
- [5] LACHOWICZ, A. ; RAMSPECK, K. ; ROTH, P. ; MANOLE, M. ; BLANKE, H. ; HEFNER, W. ; BROUWER, E. ; SCHUM, B. ; METZ, A.: NO_x-free solution for emitter etch-back. In: *Proceedings 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference* (2012), S. 1846–1850. – Frankfurt, Germany
- [6] CHEN, D. ; DENG, W. ; SHENG, J. ; ZHU, H. ; ZHONG, M. ; WANG, W. ; YE, F. ; CAI, W. ; FENG, Z. ; ZHANG, Y. ; SHEN, H. ; VERLINDEN, P. J.: Preventing the formation of voids in the rear local contact areas for industrial-type PERC solar cells. In: *Proceedings 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference* (2013), S. 770–774. – Paris, France
- [7] TJAHJONO, B. ; YANG, M. J. ; WU, V. ; TING, J. ; SHEN, J. ; TAN, O. ; SZIPTALAK, T. ; LIU, B. ; SPERLICH, H.-P. ; HENGST, T. ; BEILBY, B. ; HSU, K.-C.: Optimizing CELCO cell technology in one year of mass production. In: *Proceedings*

28th European Photovoltaic Solar Energy Conference (2013), S. 775–779. – Paris, France

- [8] METZ, A. ; ADLER, D. ; BAGUS, S. ; BLANKE, H. ; BOTHAR, M. ; BROUWER, E. ; DAUWE, S. ; DRESSLER, K. ; DROESSLER, R. ; DROSTE, T. ; FIEDLER, M. ; GASSENBAUER, Y. ; GRAHL, T. ; HERMERT, N. ; KUZMINSKI, W. ; LACHOWICZ, A. ; LAUINGER, T. ; LENCK, N. ; MANOLE, M. ; MARTINI, M. ; MESSMER, R. ; MEYER, C. ; MOSCHNER, J. ; RAMSPECK, K. ; ROTH, P. ; SCHÖNFELDER, R. ; SCHUM, B. ; STICKSEL, J. ; VAAS, K. ; VOLK, M. ; WANGEMANN, K.: Industrial high performance crystalline silicon solar cells and modules based on rear surface passivation technology. In: *Solar Energy Materials & Solar Cells* 120 Part A (2014), S. 417–425
- [9] FISCHER, G. ; STRAUCH, K. ; WEBER, T. ; MÜLLER, M. ; WOLNY, F. ; SCHIEPE, R. ; FÜLLE, A. ; LOTTSPREICH, F. ; STECKEMETZ, S. ; SCHNEIDERLOECHNER, E. ; STEGEMANN, K.-H. ; NEUHAUS, H.: Simulation based development of industrial PERC cell production beyond 20.5% efficiency. In: *Energy Procedia* 55 (2014), S. 425–430. – Proceedings 4th International Conference on Crystalline Silicon Photovoltaics
- [10] WENHAM, S. R. ; HONSBURG, C. B. ; GREEN, M. A.: Buried contact silicon solar cells. In: *Solar Energy Materials & Solar Cells* 34 (1994), S. 101–110
- [11] ZHAO, J. ; WANG, A. ; ALTERMATT, P. P. ; WENHAM, S. R. ; GREEN, M. A.: 24% efficient PERL silicon solar cell: Recent improvements in high efficiency silicon cell research. In: *Solar Energy Materials & Solar Cells* 41/42 (1996), S. 87–99
- [12] MANDELKORN, J. ; LAMNECK, J. H.: Simplified fabrication of back surface electric field silicon cells and novel characteristics of such cells. In: *9th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (1972)*, S. 66–72
- [13] GODLEWSKI, M. P. ; BARAONA, C. R. ; BRANDHORST, H. W.: Low high junction theory applied to solar cells. In: *10th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (1973)*, S. 40–49
- [14] DHARIWAL, S. R. ; KULSHRESHTHA, A. P.: Theory of back surface field silicon solar cells. In: *Solid State Electronics* 24 (1981), Nr. 12, S. 1161–1165
- [15] RALPH, E. L.: Recent advancements in low cost solar cell processing. In: *11th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (1975)*, S. 315–316
- [16] HAIGH, A. D.: Fired through printed contacts on antireflection coated silicon terrestrial solar cells. In: *12th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (1976)*, S. 360–361
- [17] FIELD, M. B. ; SCUDDER, L. R.: Application of thick-film technology to solar cell fabrication. In: *12th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (1976)*, S. 303–308

- [18] FRISSEON, L. ; LAUWERS, P. ; MERTENS, R. ; OVERSTRAETEN, R. van ; GOVAERTS, R.: Screen printed metallization of silicon solar cells. In: *Electrocomponent Science and Technology* 7 (1980), S. 107–111
- [19] CUEVAS, A. ; YAN, D.: Misconceptions and misnomers in solar cells. In: *IEEE Journal of Photovoltaics* 3 (2013), S. 916–923
- [20] GATZ, S.: *Analysis and optimisation of industrial type rear-passivated silicon solar cells*, Fakultät für Mathematik und Physik der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Diss., 2013
- [21] HANNEBAUER, H. ; FALCON, T. ; HESSE, R. ; DULLWEBER, T. ; BRENDDEL, R.: 18.9%-efficient screen-printed solar cells applying a print-on-print process. In: *Proceedings 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference* (2011), S. 1607–1610. – Hamburg, Germany
- [22] COOPER, I. B. ; TATE, K. ; CARROLL, A. F. ; MIKESKA, K. R. ; REEDY, R. C. ; ROHATGI, A.: High efficiency achieved on POCl_3 emitter Si solar cells with low saturation current density while reducing Ag consumption by 40-60%. In: *Proceedings 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference* (2012), S. 614–617. – Frankfurt, Germany
- [23] DASTGHEIB-SHIRAZI, A. ; STEYER, M. ; MICARD, G. ; WAGNER, H. ; ALTERMATT, P. P. ; HAHN, G.: Relationships between diffusion parameters and phosphorus precipitation during the POCl_3 diffusion process. In: *Energy Procedia* 38 (2013), S. 254–262. – Proceedings 3rd International Conference on Crystalline Silicon Photovoltaics
- [24] TUCCI, M. ; TALGORN, E. ; SERENELLI, L. ; SALZA, E. ; IZZI, M. ; MANGIAPANE, P.: Laser fired back contact for silicon solar cells. In: *Thin Solid Films* 516 (2008), S. 6767–6770
- [25] ROHATGI, A. ; MEIER, D.: Developing novel low-cost, high-throughput processing techniques for 20%-efficient monocrystalline silicon solar cells. In: *Photovoltaics International* 10 (2010), S. 87–93
- [26] NARASIMHA, S. ; ROHATGI, A.: Optimized aluminum back surface field techniques for silicon solar cells. In: *26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference* (1997), S. 63–66. – Anaheim, CA
- [27] PETERS, S.: *Rapid thermal processing of crystalline silicon materials and solar cells*, Universität Konstanz, Diss., 2004
- [28] DULLWEBER, T. ; GATZ, S. ; HANNEBAUER, H. ; FALCON, T. ; HESSE, R. ; SCHMIDT, J. ; BRENDDEL, R.: Towards 20% efficient large-area screen-printed rear-passivated silicon solar cells. In: *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 20 (2012), Nr. 6, S. 630–638

- [29] GATZ, S. ; MÜLLER, J. ; DULLWEBER, T. ; BRENDDEL, R.: Analysis and optimization of the bulk and rear recombination of screen-printed PERC solar cells. In: *Energy Procedia* 27 (2012), S. 95–102. – Proceedings 2nd International Conference on Crystalline Silicon Photovoltaics
- [30] HEZEL, R. ; JAEGER, K.: Low temperature surface passivation of silicon for solar cells. In: *Journal of the Electrochemical Society* 136 (1989), S. 518–523
- [31] HOEX, B. ; HEIL, S. B. S. ; LANGEREIS, E. ; SANDEN, M. C. M. d. ; KESSELS, W. M. M.: Ultralow surface recombination of c-Si substrates passivated by plasma-assisted atomic layer deposited Al_2O_3 . In: *Applied Physics Letters* 89 (2006), S. 042112
- [32] SCHMIDT, J. ; MERKLE, A. ; BRENDDEL, R. ; HOEX, B. ; SANDEN, M. C. M. d. ; KESSELS, W. M. M.: Surface passivation of high-efficiency silicon solar cells by atomic-layer-deposited Al_2O_3 . In: *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 16 (2008), Nr. 6, S. 461–466
- [33] SCHMIDT, J. ; VEITH, B. ; BRENDDEL, R.: Effective surface passivation of crystalline silicon using ultrathin Al_2O_3 films and $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiN}_x$ stacks. In: *Physica Status Solidi Rapid Research Letter* 9 (2009), S. 287–289
- [34] SCHMIDT, J. ; KERR, M. ; CUEVAS, A.: Surface passivation of silicon solar cells using plasma-enhanced chemical-vapour-deposited SiN films and thin thermal SiO_2 /plasma SiN stacks. In: *Semiconductor Science and Technology* 16 (2001), S. 164–170
- [35] KRANZ, C. ; WYCZANOWSKI, S. ; DORN, S. ; WEISE, K. ; KLEIN, C. ; BOTHE, K. ; DULLWEBER, T. ; BRENDDEL, R.: Impact of the rear surface roughness on industrial-type PERC solar cells. In: *Proceedings 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference* (2012), S. 557–560. – Frankfurt, Germany
- [36] DULLWEBER, T. ; KRANZ, C. ; PEIBST, R. ; BAUMANN, U. ; HANNEBAUER, H.: PERC+: Industrial PERC solar cells with rear Al grid enabling bifaciality and reduced Al paste consumption. In: *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* (2015). – in press
- [37] HANNEBAUER, H. ; DULLWEBER, T. ; BAUMANN, U. ; FALCON, T. ; BRENDDEL, R.: 21.2%-efficient fineline-printed PERC solar cell with 5 busbar front grid. In: *Physica Status Solidi Rapid Research Letter* 8 (2014), Nr. 8, S. 675–679
- [38] GREEN, M. A.: *Solar cells - Operating principles, technology and system applications*. The University of New South Wales, 1992
- [39] KERN, W. ; PUOTINEN, D. A.: Cleaning solutions based on hydrogen peroxide for use in silicon semiconductor technology. In: *RCA review* 31 (1970), S. 187–206

- [40] PFLEGING, W. ; LUDWIG, A. ; SEEMANN, K. ; PREU, R. ; MÄCKEL, H. ; GLUNZ, S. W.: Laser micromachining for applications in thin film technology. In: *Applied Surface Science* 154-155 (2000), S. 633–639
- [41] ENGELHART, P. ; HARDER, N.-P. ; HORSTMANN, T. ; GRISCHKE, R. ; MEYER, R. ; BRENDEL, R.: Laser ablation of passivating SiN_x layers for locally contacting emitters of high-efficiency solar cells. In: *Proceedings 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion* (2006), S. 1024–1027. – Hawaii
- [42] KRANZ, C. ; WYCZANOWSKI, S. ; BAUMANN, U. ; WEISE, K. ; KLEIN, C. ; DELAHAYE, F. ; DULLWEBER, T. ; BRENDEL, R.: Wet chemical polishing for industrial type PERC solar cells. In: *Energy Procedia* 38 (2013), S. 243–249. – 3rd International Conference on Crystalline Silicon Photovoltaics
- [43] QUEISSER, S. ; KEERSMAECKER, K. D. ; BORGERS, T. ; WEFRINGHAUS, E. ; NAGEL, D. ; SANDER, B.-U. ; LOEHMANN, M. ; WEBER, M. ; DELAHAYE, F.: Inline single side polishing and junction isolation for rear side passivated solar cells. In: *Proceedings 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference* (2009), S. 1792–1794. – Hamburg, Germany
- [44] KRANZ, C. ; WYCZANOWSKI, S. ; BAUMANN, U. ; DORN, S. ; QUEISSER, S. ; SCHWECKENDIEK, J. ; PYSCH, D. ; DULLWEBER, T.: Industrial cleaning sequences for Al₂O₃-passivated PERC solar cells. In: *Energy Procedia* 55 (2014), S. 211–218. – 4th International Conference on Crystalline Silicon Photovoltaics
- [45] KRANZ, C. ; PETERMANN, J. H. ; DULLWEBER, T. ; BRENDEL, R.: Simulation-based efficiency gain analysis of 21.2%-efficient screen-printed PERC solar cells. (2015). – presented at 5th International Conference on Crystalline Silicon Photovoltaics
- [46] HAHN, G.: Status of selective emitter technology. In: *Proceedings 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference* (2010), S. 1091–1096. – Valencia, Spain
- [47] GOETZBERGER, A. ; VOSS, B. ; KNOBLOCH, J.: *Sonnenenergie: Photovoltaik*. Teubner Studienbücher, 1997
- [48] KIMMERLE, A. ; WOLF, A. ; BELLEDIN, U. ; BIRO, D.: Modelling carrier recombination in highly phosphorus-doped industrial emitters. In: *Energy Procedia* 8 (2011), S. 275–281. – 1st International Conference on Crystalline Silicon Photovoltaics
- [49] RÖDER, T. ; GRABITZ, P. ; EISELE, S. ; WAGNER, C. ; KÖHLER, J. R. ; WERNER, J. H.: 0.4% absolute efficiency gain of industrial solar cells by laser doped selective emitter. In: *34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference* (2009), S. 871–873. – Philadelphia, USA

- [50] RÖDER, T. C. ; EISELE, S. J. ; GRABITZ, P. ; WAGNER, C. ; KULUSHICH, G. ; KÖHLER, J. R. ; WERNER, J. H.: Add-on laser tailored selective emitter solar cells. In: *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 18 (2010), S. 505–510
- [51] PLETZER, T. ; STEGEMANN, E. ; JANSSEN, L. ; WINDGASSEN, H. ; BÄTZNER, D. L. ; KURZ, H.: Selective emitters by phosphorus screen-printing for industrial processing of very thin MC-Si solar cells. In: *Proceedings 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference* (2007), S. 1604–1607. – Milan, Italy
- [52] ANTONIADIS, H.: Silicon ink high efficiency solar cells. In: *34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference* (2009), S. 650–654. – Philadelphia, USA
- [53] ANTONIADIS, H. ; JIANG, F. ; SHAN, W. ; LIU, Y.: All screen printed mass produced silicon ink selective emitter solar cells. In: *35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference* (2010), S. 1193–1196. – Honolulu, USA
- [54] SCHUBERT, G. ; HORZEL, J. ; KOPECEK, R. ; HUSTER, F. ; FATH, P.: Silver thick film contact formation on lowly doped phosphorous emitters. In: *Proceedings 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference* (2005), S. 934–937. – Barcelona, Spain
- [55] ZERGA, A. ; SLAOU, A. ; MULLER, J.C. ; BAZER-BACHI, B. ; BALLUTAUD, D. ; QUANG, N. L. ; GOAER, G.: Selective emitter formation for large-scale industrially MC-Si solar cells by hydrogen plasma and wet etching. In: *Proceedings 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference* (2006), S. 865–869. – Dresden, Germany
- [56] HAVERKAMP, H. ; DASTGHEIB-SHIRAZI, A. ; RAABE, B. ; BOOK, F. ; HAHN, G.: Minimizing the electrical losses on the front side: Development of a selective emitter process from a single diffusion. In: *33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference* (2008), S. 430–433. – San Diego, USA
- [57] LAUERMANN, T. ; DASTGHEIB-SHIRAZI, A. ; BOOK, F. ; RAABE, B. ; HAHN, G. ; HAVERKAMP, H. ; HABERMANN, D. ; DEMBERGER, C. ; SCHMID, C.: inSECT: An inline selective emitter concept with high efficiencies at competitive process costs improved with inkjet masking technology. In: *Proceedings 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference* (2009), S. 1767–1770. – Hamburg, Germany
- [58] GREEN, M. A.: *High efficiency silicon solar cells*. TransTech Publications, 1987
- [59] BOOK, F. ; WIEDENMANN, T. ; DASTGHEIB-SHIRAZI, A. ; RAABE, B. ; HAHN, G.: Large area n-type silicon solar cells with selective front surface field and screen printed aluminum-alloyed rear emitter. In: *Proceedings 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference* (2010), S. 1465–1468. – Valencia, Spain
- [60] SCHÄFER, U.: Siebdrucktechnik für multikristalline Siliziumsolarzellen / Ekra - Material Deposition Technology. 2003. – Forschungsbericht

- [61] FALCON, T.: Aspect ratio improvements for printed frontside conductors on silicon solar cells. In: *Proceedings 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference* (2009), S. 1338–1346. – Hamburg, Germany
- [62] FALCON, T.: Ultra fine line frontside metalisation on crystalline silicon solar cells by screen & stencil printing. In: *Proceedings 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference* (2011), S. 1686–1690. – Hamburg, Germany
- [63] FALCON, T. ; HOBBY, A.: High accuracy, high aspect ratio metallization on silicon solar cells using a print on print process. In: *Proceedings 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference* (2010), S. 1651–1655. – Valencia, Spain
- [64] LIDE, D. R. (Hrsg.): *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. CRC Press, 2005
- [65] FORSTNER, H. ; BANDIL, S. ; ZWEGERS, M. ; BOLLEN, R. ; COLETTI, G. ; SINKE, W. ; BULTMAN, J. ; WYERS, P. ; WERTZ, R. ; WU, S. ; LIN, K. C. ; METZ, A. ; MEIXNER, M. ; FISCHER, M. ; SPIESS, T. ; METTE, M. ; METTE, A. ; PETTER, K. ; GERLACH, A. ; ENGELHART, P. ; XING, G. ; DEMENIK, A. ; MCMULLEN, D. ; MOHR, C. ; STASSEN, A. ; SLUFCEK, J. ; YONG, L. ; KAUFMANN, S. ; WAN, Y. ; WANG, Y. ; LIU, S. ; RICHTER, A. ; PAI, R. ; WANG, K. ; CHEN, B. ; LUAN, A. ; BUCHOVSKAJA, I. ; SPILL, B. ; PINGEL, R. ; RAMAKRISHNAN, A. ; JULSRUD, S. ; OSBORNE, W. ; FLORES, A. ; FATH, P. ; NUSSBAUMER, H. ; RAITHEL, S. ; PINGEL, S. ; FRANK, O. ; ZHU, J. ; RISTOW, A. ; OBERBECK, L. ; DEMENIK, G.: International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV) 2013 Results. March 2014. – Forschungsbericht
- [66] HOORNSTRA, J. ; WEEBER, A. W. ; MOOR, H. H. C. ; SINKE, W. C.: The importance of paste rheology in improving fine line, thick film screen printing of front side metallization. In: *Proceedings 14th European Photovoltaic Solar Energy Conference* (1997), S. 823–826. – Barcelona, Spain
- [67] SCHUBERT, G.: *Thick film metallisation of crystalline silicon solar cells - Mechanisms, models and applications*, Universität Konstanz, Diss., 2006
- [68] SCHUBERT, G. ; HUSTER, F. ; FATH, P.: Current transport mechanism in printed Ag thick film contacts to an n-type emitter of a crystalline silicon solar cell. In: *Proceedings 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference* (2004), S. 813–816. – Paris, France
- [69] SCHUBERT, G. ; HUSTER, F. ; FATH, P.: Physical understanding of printed thick-film front contacts of crystalline Si solar cells - Review of existing models and recent developments. In: *Solar Energy Materials & Solar Cells* 90 (2006), S. 3399–3406
- [70] FIROR, K. ; HOGAN, S. J. ; BARRET, J. M. ; COYLE, R. T.: Series resistance associated with thick-film contacts to solar cells. In: *11th IEEE Photovoltaic Specialists Conference* (1982), S. 824–827

- [71] GZOWSKI, O. ; MURAWSKI, L. ; TRZEBIATOWSKI, K.: The surface conductivity of lead glasses. In: *Journal of Applied Physics* 15 (1982), S. 1097–1101
- [72] NAKAJIMA, T. ; KAWAKAMI, A. ; TADA, A.: Ohmic contact of conductive silver paste to silicon solar cells. In: *International Journal of Hybrid Microelectronics* 6 (1983), S. 580–586
- [73] BALLIF, C. ; HULJIC, D. M. ; WILLEKE, G. ; HESSLER-WYSER, A.: Silver thick-film contacts on highly doped n-type silicon emitters: Structural and electronic properties of the interface. In: *Applied Physics Letters* 82 (2003), S. 1878–1880
- [74] HULJIC, D. M. ; BALLIF, C. ; HESSLER-WYSE, A. ; WILLEKE, G.: Microstructural analyses of Ag thick-film contacts on n-type silicon emitters. In: *Proceedings 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion* (2003), S. 83–86. – Osaka, Japan
- [75] GRUPP, G. ; HULJIC, D. M. ; PREU, R. ; WILLEKE, G. ; LUTHER, J.: Peak firing temperature dependence of the microstructure of Ag thick-film contacts on silicon solar cells - a detailed AFM study of the interface. In: *Proceedings 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference* (2005), S. 1379–1382. – Barcelona, Spain
- [76] HÖRTEIS, M.: *Fine-line printed contacts on crystalline silicon solar cells*, Universität Konstanz, Diss., 2009
- [77] LI, Z. G. ; LIANG, L. ; CHENG, L. K.: Electron microscopy study of front-side Ag contact in crystalline Si solar cells. In: *Journal of Applied Physics* 105 (2009), S. 066102
- [78] CHENG, L. K. ; LIANG, L. ; LI, Z.: Nano-Ag colloids assisted tunneling mechanism for current conduction in front contact of crystalline Si solar cells. In: *Proceedings 34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference* (2009), S. 2344–2348. – Philadelphia, USA
- [79] HILALI, M. M. ; TO, B. ; ROHATGI, A.: A review and understanding of screen-printed contacts and selective emitter formation. In: *Proceedings 14th Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells and Modules NREL* (2004), S. 109–116. – Winter Park, Colorado, USA
- [80] PYSCH, D. ; METTE, A. ; FILIPOVIC, A. ; GLUNZ, S. W.: Comprehensive analysis of advanced solar cell contacts consisting of printed fine-line seed layers thickened by silver plating. In: *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 17 (2009), S. 101–114
- [81] HOENIG, R. ; DUERRSCHNABEL, M. ; MIERLO, W. van ; AABDIN, Z. ; BERNHARD, J. ; BISKUPEK, J. ; EIBL, O. ; KAISER, U. ; WILDE, J. ; CLEMENT, F. ; BIRO, D.: The nature of screen printed front side silver contacts - results of the project MikroSol. In: *Energy Procedia* 43 (2013), S. 27–36

- [82] RAABE, B. ; HUSTER, F. ; MCCANN, M. ; FATH, P.: High aspect ratio screen printed fingers. In: *Proceedings 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference* (2005), S. 930–933. – Barcelona, Spain
- [83] ZHANG, D. ; SHAHBAZI, S. ; ZHANG, W. ; MOYER, J. ; GUO, T.: A screen printable front side silver conductor paste achieving high aspect ratio finger lines for solar cell applications. In: *Proceedings 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference* (2008), S. 1458–1460. – Valencia, Spain
- [84] CARROLL, A. F. ; POSER, D. E.: High performance screen printed silver metallizations. In: *Proceedings 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference* (2008), S. 1820–1823. – Valencia, Spain
- [85] HOORNSTRA, J. ; HEURTAULT, B.: Stencil print applications and progress for crystalline silicon solar cells. In: *Proceedings 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference* (2009), S. 989–992. – Hamburg, Germany
- [86] GALIAZZO, M. ; FURIN, V. ; CELLERE, G. ; BACCINI, A.: New technologies for improvement of metallization line. In: *Proceedings 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference* (2009), S. 1502–1505. – Hamburg, Germany
- [87] ERATH, D. ; FILIPOVIC, A. ; RETZLAFF, M. ; GÖTZ, A. ; CLEMENT, F. ; BIRO, D. ; PREU, R.: Advanced screen printing technique for high definition front side metallization of crystalline silicon solar cells. In: *Presentation at the 1st Metallization Workshop* (2008). – Utrecht, Netherlands
- [88] GAO, X. ; PRUNCHAK, R. ; JAEGER, F. K. ; HERMES, S. ; EBONG, A. ; ROHATGI, A.: One-step screen-printing metallization forming high aspect ratio grid lines on crystalline solar cells. In: *Proceedings 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference* (2010), S. 2360–2363. – Valencia, Spain
- [89] GALIAZZO, M. ; FURIN, V. ; TONINI, D. ; CELLERE, G. ; BACCINI, A.: Double printing of front contact Ag in c-Si solar cells. In: *Proceedings 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference* (2010), S. 2338–2340. – Valencia, Spain
- [90] GALIAZZO, M.: Reliable double printing of Ag contacts for c-Si cell manufacturing. In: *Presentation at the 2nd Metallization Workshop* (2010). – Constance, Germany
- [91] BERGER, M. ; WELSCH, M. ; FISCHER, M. ; MÜLLER, J. ; KRITSCHIL, A. ; SPIESS, T. ; PETTER, K. ; ENGELHART, P. ; KÜSTERS, K. H. ; METZ, A. ; LEMKE, C. ; LENCK, N. ; MARTIN, R. ; NEUHAUS, H. ; STORBECK, O. ; SEIFERT, C. ; FLEUSTER, M. ; COPELLI, M. ; COPETTI, C. ; DONKER, M. van d. ; PAPE, M. ; BOUEKE, A. ; RAITHEL, S. ; MALKOWSKI, B. ; BLAUÄRMEL, A. ; LEMKE, M. ; SCHRAMM, H. ; PINGEL, S. ; FRANK, O. ; BARTEL, T. ; SZLUFCHIK, J. ; VANLAEKE, P. ; NWOFA, L. ; VLASENKO, T. ; BUCHOVSKA, I. ; ANSPACH, O. ; OEVER, P. van d. ; TISCHER, A. ; JEONG, J.-W. ; SUAREZ, F. ; LIU, Y.: International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV) Results 2011. March 2012. – Forschungsbericht

- [92] LAUDISIO, G. ; MIKESKA, K. R. ; LI, Z. ; VERNOOY, P. D. ; LIANG, L. ; CARROLL, A. F.: Reduced contact resistance of new FS silver pastes towards fine line printing and cost reduction. In: *Presentation at the 3rd Metallization Workshop* (2011). – Charleroi, Belgium
- [93] VAZQUEZ, C. ; LAUDISIO, G. ; ANDERSON, R. ; CLARK, D. A. ; CABALLERO, L. J. ; VAZQUEZ, M. A. ; ALONSO, J. ; RAMOS-BARRADO, J.R.: Improvement of metallization process in a commercial Cz-Si solar cell. In: *Proceedings 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference* (2011), S. 1787–1790. – Hamburg, Germany
- [94] FALCON, T. ; HOBBY, A.: Development of a „Print On Print“ process for high aspect ratio frontside conductors. In: *Presentation at the 2nd Metallization Workshop* (2010). – Constance, Germany
- [95] FALCON, T. ; ANDERSON, R. D. ; CLARK, D. A.: Fine line printing of front side metallisations using ultra fine mesh and stencil technologies. In: *Proceedings 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference* (2012), S. 1739–1743. – Frankfurt, Germany
- [96] FALCON, T.: Ultra fine line printing for silicon solar cells - mesh screens or metal stencils? In: *Presentation at the 3rd Metallization Workshop* (2011). – Charleroi, Belgium
- [97] MOOR, H. H. C. ; WEEBER, A. W. ; HOORNSTRA, J. ; SINKE, W. C.: Fine-line screen printing for silicon solar cells. In: *6th Colorado Workshop* (1996), S. 154–170. – Snowmass
- [98] MOOR, H. H. C. ; HOORNSTRA, J. ; WEEBER, A. W. ; BURGERS, A. R. ; SINKE, W. C.: Printing high and fine metal lines using stencils. In: *Proceedings 14th European Photovoltaic Solar Energy Conference* (1997), S. 404–407. – Barcelona, Spain
- [99] HEURTAULT, B. ; HOORNSTRA, J.: Towards industrial application of stencil printing for crystalline silicon solar cells. In: *Proceedings 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference* (2010), S. 1912–1916. – Valencia, Spain
- [100] LAUDISIO, G. ; WILLMOTT, P. J. ; ROSE, M. ; YOUNG, R. J. S.: Improved c-Si cell performance through metallizations adapted to reduce recombination effects. In: *Proceedings 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference* (2009), S. 1446–1448. – Hamburg, Germany
- [101] PYSCH, D. ; METTE, A. ; GLUNZ, S. W.: A review and comparison of different methods to determine the series resistance of solar cells. In: *Solar Energy Materials & Solar Cells* 91 (2007), S. 1698–1706
- [102] FUYUKI, T. ; KONDO, H. ; YAMAZAKI, T. ; TAKAHASHI, Y. ; URAOKA, Y.: Photographic surveying of minority carrier diffusion length in polycrystalline silicon solar cells by electroluminescence. In: *Applied Physics Letters* 86 (2005), S. 262108

- [103] BOTHE, K. ; POHL, P. ; SCHMIDT, J. ; WEBER, T. ; ALTERMATT, P. ; FISCHER, B. ; BRENDL, R.: Electroluminescence imaging as an in-line characterisation tool for solar cell production. In: *Proceedings 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference* (2006), S. 597–600. – Dresden, Germany
- [104] HANNEBAUER, H. ; SCHIMANKE, S. ; FALCON, T. ; ALTERMATT, P. P. ; DULLWEBER, T.: Optimized stencil print for low Ag paste consumption and high conversion efficiencies. In: *Energy Procedia* 67 (2015), S. 108–115. – Proceedings 5th Workshop on Metallization of Crystalline Silicon Solar Cells
- [105] ROMMEL, S. ; EINSELE, F. ; GUO, H. ; AMETOWOBLA, M. F. ; MANZ, D.: Homogeneity of screen printed metallization lines and relevance for solar cell efficiency. In: *Proceedings 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference* (2011), S. 1538–1541. – Hamburg, Germany
- [106] YANG, Y. ; ALTERMATT, P. P. ; ZHU, W. ; LIANG, X. ; SHEN, H.: Analysis of Industrial c-Si solar cell's front metallization by advanced numerical simulation. In: *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 20 (2012), S. 490–500
- [107] SHANMUGAM, V. ; WONG, J. ; PETERS, I. M. ; CUNNUSAMY, J. ; ZAHN, M. ; ZHOU, A. ; YANG, R. ; CHEN, X. ; ABERLE, A. G. ; MUELLER, T.: Analysis of fine-line screen and stencil-printed metal contacts for silicon wafer solar cells. In: *IEEE Journal of Photovoltaics* (2015), S. 525–533
- [108] SHOCKLEY, W.: Research and investigation of inverse epitaxial UHF power transistors / Report No. AI-TDR-64-207, AF Avionics Laboratory, Research and Technology Division, Air Force Systems Command. Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, 1964. – Forschungsbericht
- [109] SCHRODER, D. K. ; MEIER, D. L.: Solar cell contact resistance - A review. In: *IEEE Transactions on Electron Devices* 31 (1984), Nr. 5, S. 637–647
- [110] HANNEBAUER, H. ; DULLWEBER, T. ; FALCON, T. ; BRENDL, R.: Fineline printing options for high efficiencies and low Ag paste consumption. In: *Energy Procedia* 38 (2013), S. 725–731. – Proceedings 3rd International Conference on Crystalline Silicon Photovoltaics
- [111] SYNOPSYS INC. (Hrsg.): *Sentaurus User Manual*. Synopsys Inc., 2013. – Mountain View, CA
- [112] ALTERMATT, P. P.: Models for numerical device simulations of crystalline silicon solar cells - a review. In: *Journal of Computational Electronics* 10 (2011), S. 314–330
- [113] NAGEL, L. W. ; PEDERSON, D. O.: Simulation program with integrated circuit emphasis (SPICE). In: *16th Midwest Symp. Circuit Theory* (1973). – Waterloo, ON, Canada

- [114] *LTspice IV*. <http://www.linear.com/designtools/software/#LTspice>, 2011
- [115] DULLWEBER, T. ; KRANZ, C. ; BAUMANN, U. ; HESSE, R. ; WALTER, D. ; SCHMIDT, J. ; ALTERMATT, P. ; BRENDEL, R.: Silicon wafer material options for highly efficient p-type PERC solar cells. In: *Records 39th IEEE Photovoltaic Specialists Conference* (2013), S. 3074–3078. – Tampa, Florida
- [116] KRANZ, C. ; LIM, B. ; BAUMANN, U. ; DULLWEBER, T.: Determination of the contact resistivity of screen-printed Al contacts formed by laser contact opening. In: *Energy Procedia* 67 (2015), S. 64–69. – Proceedings 5th Workshop on Metallization of Crystalline Silicon Solar Cells
- [117] BRENDEL, R.: Sunrays: a versatile ray tracing program for the photovoltaic community. In: *Proceedings 12th European Photovoltaic Solar Energy Conference* (1994), S. 1339–1342. – Amsterdam, The Netherlands
- [118] ALTERMATT, P. P. ; SCHUMACHER, J. O. ; CUEVAS, A. ; KERR, M. J. ; GLUNZ, S. W. ; KING, R. R. ; HEISER, G. ; SCHENK, A.: Numerical modeling of highly doped Si-P emitters based on Fermi-Dirac statistics and self-consistent material parameters. In: *Journal of Applied Physics* 92 (2002), S. 3187–3197
- [119] EITNER, U. ; RENDLER, L. C.: Peel testing of ribbons on solar cells at different angles - consistent comparison by using adhesive fracture energies. In: *Proceedings 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference* (2014), S. 3406–3408. – Amsterdam, The Netherlands
- [120] DUPONT MICROCIRCUIT MATERIALS: *DuPont Solamet PV51M*. <http://www.dupont.com/content/dam/assets/products-and-services/solar-photovoltaic-materials/assets/dec-Solamet-PV51M.pdf>
- [121] DUPONT MICROCIRCUIT MATERIALS: *DuPont Solamet PV506*. <http://www.dupont.com/content/dam/assets/products-and-services/solar-photovoltaic-materials/assets/dec-Solamet-PV506.pdf>
- [122] HERAEUS PRECIOUS METALS GMBH & Co. KG: *SOL325 Series*. http://heraeus-pvsilverpaste.com/en/products/novelcellpastest/c180_1/c180_3.aspx
- [123] HERAEUS PRECIOUS METALS GMBH & Co. KG: *SOL9410S & SOL9411*. <http://heraeus-pvsilverpaste.com/en/products/frontsidepastest/sol9400/sol9410SOL9411.aspx>
- [124] HERAEUS PRECIOUS METALS GMBH & Co. KG: *SOL9620 Series*. http://heraeus-pvsilverpaste.com/en/products/frontsidepastest/sol9620_series/sol9620_series_1.aspx

- [125] DUPONT MICROCIRCUIT MATERIALS: *DuPont Solamet PV19A*. <http://www.dupont.com/content/dam/dupont/products-and-services/solar-photovoltaic-materials/solar-photovoltaic-materials-landing/documents/Solamet-PV19A-Data-Sheet.pdf>
- [126] HERLUFSEN, S. ; SCHMIDT, J. ; HINKEN, D. ; BOTHE, K. ; BRENDEL, R.: Camera-based photoluminescence lifetime imaging of crystalline silicon wafers. In: *Proceedings 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference* (2009), S. 913–917. – Hamburg, Germany
- [127] KANE, D. E. ; SWANSON, R. M.: Measurement of the emitter saturation current by a contactless photoconductivity decay method. In: *Proceedings of the 18th IEEE Photovoltaic Specialists Conference* (1985), S. 578–583. – Las Vegas, USA
- [128] MÜLLER, J. ; BOTHE, K. ; HERLUFSEN, S. ; HANNEBAUER, H. ; FERRÉ, R. ; BRENDEL, R.: Reverse saturation current density imaging of highly doped regions in silicon: A photoluminescence approach. In: *Solar Energy Materials & Solar Cells* 106 (2012), S. 76–79
- [129] HANNEBAUER, H. ; SOMMERFELD, M. ; MÜLLER, J. ; DULLWEBER, T. ; BRENDEL, R.: Analysis of the emitter saturation current density of industrial type silver screen-printed front contacts. In: *Proceedings 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference* (2012), S. 1360–1363. – Frankfurt, Germany
- [130] YANG, Y. ; DENG, W. ; FENG, Z. ; HUANG, Q.: An improved busbar design to save the cost of PV modules - experiment and simulation. In: *Proceedings 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference* (2011), S. 1620–1622. – Hamburg, Germany
- [131] HANNEBAUER, H. ; DULLWEBER, T. ; FALCON, T. ; CHEN, X. ; BRENDEL, R.: Record low Ag paste consumption of 67.7 mg with dual print. In: *Energy Procedia* 43 (2013), S. 66–71. – Proceedings 4th Workshop on Metallization of Crystalline Silicon Solar Cells
- [132] SCHNEIDER, A. ; RUBIN, L. ; RUBIN, G.: Solar cell efficiency improvement by new metallization techniques - the Day4 electrode concept. In: *Proceedings 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion* (2006), S. 1095–1098. – Waikoloa, Hawaii
- [133] BRAUN, S. ; MICARD, G. ; HAHN, G.: Solar cell improvement by using a multi busbar design as front electrode. In: *Energy Procedia* 27 (2012), S. 227–233. – Proceedings 2nd International Conference on Crystalline Silicon Photovoltaics
- [134] BRAUN, S. ; HAHN, G. ; NISSLER, R. ; PÖNISCH, C. ; HABERMANN, D.: Multi-busbar solar cells and modules: high efficiencies and low silver consumption. In: *Energy Procedia* 38 (2013), S. 334–339. – Proceedings 3rd International Conference on Crystalline Silicon Photovoltaics

- [135] SÖDERSTRÖM, T. ; PAPET, P. ; UFHEIL, J.: Smart wire connection technology. In: *Proceedings 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference* (2013), S. 495–499. – Paris, France
- [136] CHUNDURI, S. K.: The buzz on busbars. In: *Photon International* (2013), September, Nr. 84-87
- [137] SCHMIDT, J. ; BOTHE, K.: Structure and transformation of the metastable boron- and oxygen-related defect center in crystalline silicon. In: *Physical Review B* 69 (2004), S. 024107
- [138] LIM, B.: *Boron-oxygen-related recombination centers in crystalline silicon and the effects of dopant-compensation*, Fakultät für Mathematik und Physik der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Diss., 2012
- [139] DULLWEBER, T. ; HANNEBAUER, H. ; BAUMANN, U. ; FALCON, T. ; BOTHE, K. ; STECKEMETZ, S. ; BRENDEL, R.: Fine-line printed 5 busbar PERC solar cells with conversion efficiencies beyond 21%. In: *Proceedings 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference* (2014), S. 621–626. – Amsterdam, The Netherlands
- [140] BLOOD, P.: Capacitance-voltage profiling and the characterisation of III-V semiconductors using electrolyte barriers. In: *Semiconductor science and technology* 1 (1986), S. 7–27
- [141] SCHRODER, D. K.: *Semiconductor material and device characterization*. John Wiley & Sons, Inc., 2006
- [142] RAMSPECK, K. ; REISSENWEBER, S. ; SCHMIDT, J. ; BOTHE, K. ; BRENDEL, R.: Dynamic carrier lifetime imaging of silicon wafers using an infrared-camera-based approach. In: *Applied Physics Letters* 93 (2008), S. 102104
- [143] MÜLLER, J. ; BOTHE, K. ; GATZ, S. ; HAASE, F. ; MADER, C. ; BRENDEL, R.: Recombination at laser-processed local base contacts by dynamic infrared lifetime mapping. In: *Journal of Applied Physics* 108 (2010), S. 124513
- [144] CUEVAS, A. ; BASORE, P. A. ; GIROULT-MATLAKOWSKI, G. ; DUBOIS, C.: Surface recombination velocity of highly doped n-type silicon. In: *Journal of Applied Physics* 80 (1996), Nr. 6, S. 3370–3375
- [145] FELLMETH, T. ; BORN, A. ; KIMMERLE, A. ; CLEMENT, F. ; BIRO, D. ; PREU, R.: Recombination at metal-emitter interfaces of front contact technologies for highly efficient silicon solar cells. In: *Energy Procedia* 8 (2011), S. 115–121. – 1st International Conference on Crystalline Silicon Photovoltaics
- [146] SINTON, R. A. ; CUEVAS, A.: Contactless determination of current-voltage characteristics and minority-carrier lifetimes in semiconductors from quasi-steady-state photoconductance data. In: *Applied Physics Letters* 69 (1996), S. 2510

-
- [147] HANNEBAUER, H. ; DULLWEBER, T. ; WYCZANOWSKI, S. ; WEISE, K. ; DELAHAYE, F. ; DOLL, O. ; KÖHLER, I. ; BRENDDEL, R.: Gas Phase Etch Back: A new selective emitter technology for high-efficiency PERC solar cells. In: *Proceedings 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference* (2013), S. 752–756. – Paris, France
- [148] TRINA SOLAR: *Hocheffiziente PERC Technologie geht in die Serienfertigung*. http://www.trinasolar.com/de/about-us/newinfo_748.html. – 20. Januar 2015
- [149] SOLARWORLD: *SolarWorld AG setzt auf 5-Busbar-Technologie*. <http://www.solarworld.de/konzern/presse/aktuelles/corporate-news-ad-hoc/single-ansicht/article/solarworld-ag-setzt-auf-5-busbar-technologie/>. – 4. Mai 2015

Liste der Publikationen

Im Rahmen dieser Arbeit entstandene Publikationen.

Veröffentlichungen in internationalen Fachzeitschriften und Konferenzen als Erstautor

- a) H. Hannebauer, T. Falcon, R. Hesse, T. Dullweber, R. Brendel: 18.9%-efficient screen-printed solar cells applying a print-on-print process, *Proceedings of 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, S. 1607-1610 (2011)
- b) H. Hannebauer, M. Sommerfeld, J. Müller, T. Dullweber, R. Brendel: Analysis of the emitter saturation current density of industrial type silver screen-printed front contacts, *Proceedings of 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, S. 1360-1363 (2012)
- c) H. Hannebauer, T. Dullweber, S. Wyczanowski, K. Weise, F. Delahaye, O. Doll, I. Köhler, R. Brendel: Gas Phase Etch Back: A new selective emitter technology for high-efficiency PERC solar cells, *Proceedings of 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, S. 752-756 (2013)
- d) H. Hannebauer, T. Dullweber, T. Falcon, R. Brendel: Finesline printing options for high efficiencies and low Ag paste consumption, *Proceedings of 3rd International Conference on Crystalline Silicon Photovoltaics, Energy Procedia* **38** S. 725-731 (2013)
- e) H. Hannebauer, T. Dullweber, T. Falcon, X. Chen, R. Brendel: Record low Ag paste consumption of 67.7 mg with dual print, *Proceedings of 4th Workshop on Metallization for Crystalline Silicon Solar Cells, Energy Procedia* **43** S. 66-71 (2013)
- f) H. Hannebauer, T. Dullweber, U. Baumann, T. Falcon, R. Brendel: 21.2%-efficient finesline-printed PERC solar cell with 5 busbar front grid, *Physica Status Solidi - Rapid Research Letters* **8** S. 675-679 (2014)
- g) H. Hannebauer, S. Schimanke, T. Falcon, P.P. Altermatt, T. Dullweber: Optimized stencil print for low Ag paste consumption and high conversion efficiencies, *Proceedings of 5th Workshop on Metallization for Crystalline Silicon Solar Cells, Energy Procedia* **67** S. 108-115 (2015)

Veröffentlichungen in internationalen Fachzeitschriften und Konferenzen als Co-Autor

- a) S. Steingrube, H. Wagner, H. Hannebauer, S. Gatz, R. Chen, S.T. Dunham, T. Dullweber, P.P. Altermatt R. Brendel: Loss analysis and improvements of industrially fabricated Cz-Si solar cells by means of process and device simulations, *Proceedings of 1st International Conference on Crystalline Silicon Photovoltaics, Energy Procedia* **8** S. 263-268 (2011)
- b) S. Gatz, H. Hannebauer, R. Hesse, F. Werner, A. Schmidt, T. Dullweber, J. Schmidt, K. Bothe, R. Brendel: 19.4%-efficient large-area fully screen-printed silicon solar cells, *Physica Status Solidi - Rapid Research Letters* **5** S. 147-149 (2011)
- c) T. Dullweber, S. Gatz, H. Hannebauer, T. Falcon, R. Hesse, J. Schmidt, R. Brendel: Towards 20% efficient large-area screen-printed rear-passivated silicon solar cells, *Progress in Photovoltaics - Research and Applications* **20** S. 630-638 (2011)
- d) T. Dullweber, S. Gatz, T. Falcon, H. Hannebauer: High-efficiency rear-passivated screen-printed silicon solar cells, *Photovoltaics International* **13** S. 81-87 (2011)
- e) T. Dullweber, S. Gatz, H. Hannebauer, T. Falcon, R. Hesse, J. Schmidt, R. Brendel: 19.4%-efficient large area rear-passivated screen-printed silicon solar cells, *Proceedings of 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, S. 811-816 (2011)
- f) J. Müller, K. Bothe, S. Herlufsen, H. Hannebauer, R. Ferré, R. Brendel: Reverse saturation current density imaging of highly doped regions in silicon: A photoluminescence approach, *Solar Energy Materials and Solar Cells* **106** S. 76-79 (2012)
- g) T. Dullweber, H. Hannebauer, C. Kranz, R. Hesse, S. Wyczanowski, V. Bhosle, C. Dubé, K. Weise, R. Delahaye, O. Doll, I. Köhler, R. Brendel: Emitter technology options for industrial PERC solar cells with up to 20.3% conversion efficiency, *Photovoltaics International* **21** S. 1-7 (2013)
- h) A. Zhou, H. Hannebauer, T. Dullweber, T. Falcon, X. Chen: Fine line printing for low silver consumption and higher cell efficiencies, *7th International Photovoltaic Power Generation Conference (SNEC)* **PO-199** 2013
- i) R. Brendel, T. Dullweber, R. Gogolin, H. Hannebauer, N.-P. Harder, J. Hensen, S. Kajari-Schröder, R. Peibst, J.H. Petermann, U. Römer, J. Schmidt, H. Schulte-Huxel, V. Steckenreiter: Recent progress and options for future crystalline silicon solar cells, *Proceedings of 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, S. 676-690 (2013)
- j) J. Müller, H. Hannebauer, C. Mader, F. Haase, K. Bothe: Dynamic infrared lifetime mapping for the measurement of the saturation current density of highly doped regions in silicon, *IEEE Journal of Photovoltaics* **4** S. 540-548 (2014)

-
- k) T. Dullweber, H. Hannebauer, U. Baumann, T. Falcon, K. Bothe, S. Steckemetz, R. Brendel: Fine-line printed 5 busbar PERC solar cells with conversion efficiencies beyond 21%, *Proceedings of 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, S. 621-626 (2014)
 - l) T. Dullweber, H. Hannebauer, U. Baumann, T. Falcon, R. Brendel: Five busbar PERC solar cells with record 21.2% conversion efficiency, *Photovoltaics International* **25** S. 35-40 (2014)
 - m) T. Dullweber, C. Kranz, R. Peibst, U. Baumann, H. Hannebauer, A. Fülle, S. Steckemetz, T. Weber, M. Kutzer, M. Müller, G. Fischer, P. Palinginis, H. Neuhaus: PERC+: Industrial PERC solar cells with rear Al grid enabling bifaciality and reduced Al paste consumption, *Progress in Photovoltaics - Research and Applications*, in press (2015)
 - n) T. Dullweber, C. Kranz, R. Peibst, U. Baumann, H. Hannebauer, A. Fülle, S. Steckemetz, T. Weber, M. Kutzer, M. Müller, G. Fischer, P. Palinginis, D. H. Neuhaus: The PERC+ cell: a 21%-efficient industrial bifacial PERC solar cell, *Proceedings of 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, S. 341-350 (2015)
 - o) T. Dullweber, C. Kranz, R. Peibst, U. Baumann, H. Hannebauer: The PERC+ cell: more output power for less aluminum paste, *Photovoltaics International* in press (2015)

Preise und Auszeichnungen

- Gewinner enercity Energie-Effizienzpreis für Norddeutschland 2015 in der Kategorie *Wissenschaftliche Leistungen* mit dem Projekt-Team HighScreen am Institut für Solarenergieforschung Hameln (ISFH)
- SiliconPV Award 2012 to J. Müller, K. Bothe, R. Brendel, R. Ferré, H. Hannebauer, and S. Herlufsen for the contribution of *Reverse saturation current density imaging of highly doped regions in silicon: A photoluminescence approach* for one of the 10 best ranked contributions of SiliconPV 2012.

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name	Helge Hannebauer
Anschrift	Alte Dorfstraße 8b, 31629 Estorf
Geburtsdatum	17.11.1984
Geburtsort	Nienburg/Weser
Nationalität	deutsch
Familienstand	ledig

Schulbildung

1991 - 1995	Friedrich-Ebert-Schule Nienburg/Weser
1995 - 1997	Orientierungsstufe I Nienburg/Weser
1997 - 2004	Gymnasium Albert-Schweitzer-Schule Nienburg/Weser Abschluss der allgemeinen Hochschulreife im Juni 2004

Zivildienst

Aug. 2004 - Juli 2005	Heilpädagogische Kindertagesstätte Löwenzahn in Nienburg/Weser (Erichshagen)
------------------------------	---

Universitätsausbildung

Okt. 2005 - März 2011	Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover Studium der Technischen Physik Diplomprüfung bestanden am 10. März 2011
------------------------------	--

Anstellung

Seit Nov. 2010	Institut für Solarenergieforschung Hameln/Emmerthal: Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich Produktionsprozesse
-----------------------	---

Danksagung

Zum Schluss möchte ich mich bei allen bedanken, die mich im Laufe dieser Arbeit auf alle erdenklichen Arten unterstützt haben:

Prof. Dr. H. Jörg Osten für die wissenschaftliche Betreuung dieser Arbeit, die angenehmen und lehrreichen Diskussionen und insbesondere die Möglichkeit, durch Übernahme der Betreuung diese Arbeit zu beenden;

Prof. Dr. Giso Hahn für die Übernahme des Korreferats;

Prof. Dr. Tobias Wietler für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes;

Prof. Dr. Nils-Peter Harder für die wissenschaftliche Betreuung dieser Arbeit in den ersten 2 Jahren;

Prof. Dr. Rolf Brendel für die Möglichkeit der Promotion am ISFH;

Dr. Thorsten Dullweber für die sehr gute und freundliche Betreuung vor Ort, die hilfreichen Diskussionen zu wissenschaftlichen Fragen und das Korrekturlesen meiner Arbeit;

Dr. Jan Hendrik Petermann, Anna und Nicolai Krichevsky für das Korrekturlesen meiner Arbeit;

Dr. Pietro Altermatt für die Unterstützung bei Simulationen;

Renate Winter, Sabrina Schimanke, Michael Siebert, Rafael Krain, Ulrike Baumann und Melanie Ripke für das nette Zusammensein im Büro;

Birgit Beier, Rene Hesse, Sabrina Schimanke, Ulrike Baumann, Melanie Ripke und Silke Dorn für die Prozessierung der Solarzellen und Wafer;

Allen *Mitarbeitern des ISFH* für das sehr nette Arbeitsklima, die Hilfsbereitschaft und die gemeinsamen Unternehmungen;

Meinen *Eltern*, die mir das Studium durch ihre Unterstützung ermöglicht haben;

Meiner Freundin *Antje Wolter* für die moralische Unterstützung, das Antreiben zum Weiter-schreiben, wenn die Motivation nicht vorhanden war und die Erheiterung durch den ein oder anderen Spruch.