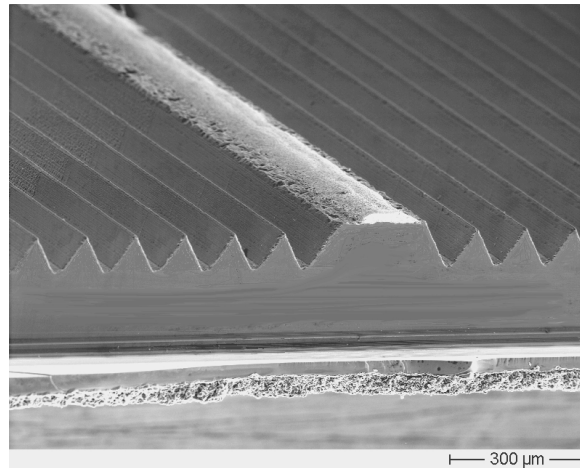


Mechanisch texturierte, großflächige, multikristalline Siliziumsolarzellen

Christoph Gerhards



Mechanisch texturierte, großflächige, multikristalline Siliziumsolarzellen

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
des Doktors der Naturwissenschaften
(Dr. rer. nat.)
an der Universität Konstanz
Fachbereich Physik
Lehrstuhl Prof. Dr. E. Bucher

vorgelegt von

Christoph Gerhards

Konstanz, Februar 2002

Tag der mündlichen Prüfung: 07.05.2002
Referent: Prof. Dr. E. Bucher
Referent: Prof. Dr. W. Wettling

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	1
1 Grundlagen	3
1.1 Die Silizium-Industriesolarzelle	3
1.1.1 Standardprozess	3
1.1.2 Das Zwei-Dioden-Modell	5
1.1.3 Der Dickfilmkontakt	8
1.2 Kontaktwiderstand	9
1.2.1 Das Transmission Line Model (TLM)	9
1.2.2 Messung des Kontaktwiderstandes	11
1.3 Spektrale Empfindlichkeit	13
1.3.1 Messung der IQE	14
2 Prozessoptimierung	16
2.1 Design of Experiment	16
2.2 Optimierung des Standardprozesses	19
2.2.1 Defektätzen	19
2.2.2 Reinigung	20
2.2.3 Diffusion	21
2.2.4 Isolation	22
2.2.5 Antireflexionsbeschichtung (ARC)	24
2.2.6 Metallisierung durch Siebdruck	25
2.2.7 Homogenität und Streuung	30
3 Physikalische Betrachtungen zur V-Textur	35
3.1 Effekte zur Stromsteigerung	36
3.1.1 Analyse der Reflexion	37
3.1.2 Analyse der IQE	39
3.2 Einfluss der V-Textur auf die Zellparameter	41
3.2.1 Diodensättigungsstrom I_{01}	41
3.2.2 Diodensättigungsstrom I_{02}	42
3.2.3 Serienwiderstand	42
3.2.4 Berechnung der Zellparameter	42
3.2.5 Schlussfolgerungen für maximale Wirkungsgradsteigerung	47
4 Mechanisches Texturieren von Silizium	48
4.1 Grundlagen des Schleifens	48
4.1.1 Schleifparameter	49

4.1.2	Schleifen von Silizium	51
4.1.3	Verschleiß von Werkzeugen	53
4.2	Mechanisches V-Texturieren für Solarzellen	54
4.2.1	Optimierung der Schleifparameter	55
4.2.2	Optimierung der Ausbeute	59
4.3	Mechanische Mikrotexturierung von Silizium	60
5	Mechanisch texturierte Solarzellen	62
5.1	Anpassung des Prozesses an V-texturierte Solarzellen	62
5.1.1	Defektätzen	62
5.1.2	Emitterdiffusion	63
5.1.3	Isolation	63
5.1.4	Antireflexbeschichtung	65
5.1.5	Siebdruck	65
5.2	Vergleich verschiedener V-Profile	66
5.2.1	Zellen aus Laborfertigung (Experiment 1)	67
5.2.2	Zellen aus Produktionsfertigung (Experiment 2)	70
5.2.3	Vergleich V-Textur - Isotextur - untexturiert (Experiment 3)	73
5.3	Texturierte Solarzellen im Modul	75
5.3.1	Vergleich von verschiedenen Oberflächentexturierungen	76
5.3.2	Spitzenwirkungsgrade in der Produktion	79
5.3.3	Schlussfolgerung aus Experimenten zur Textur	80
5.3.4	Variation des Einfallswinkels im Modul	81
5.4	Solarzellen mit selektivem Emitter	81
5.4.1	Simulationsrechnungen	83
5.4.2	Ergebnisse	84
5.4.3	Industrielle Umsetzung	85
5.5	Mechanisch mikrotexturierte Solarzellen	86
6	Technologietransfer	87
6.1	Oberflächentexturierung in industrieller Anwendung	87
6.1.1	Mechanische Textur	87
6.1.2	Isotextur auf Basis von Säuren	88
6.1.3	Reaktives Ionenätzen (RIE)	88
6.2	Wirkungsgrad und Ausbeute	88
6.2.1	Inline Prozesskontrolle	89
6.3	Prozessfluss: Inline oder Batch	90
7	Zusammenfassung und Ausblick	92
7.1	Zusammenfassung	92
7.2	Ausblick	93
A	Herleitungen und Berechnungen	96
A.1	Die Leitungsgleichungen (line equations)	96
A.2	Kontaktwiderstand	98
A.3	Berechnung der Verluste einer Solarzelle	99

A.4 Geometrie der V-Textur	100
B Siebdruck	102
B.1 Anlagenparameter beim Siebdruck	102
B.1.1 Rakel	102
B.1.2 Rakelgeschwindigkeit	102
B.1.3 Rakeldruck	102
B.1.4 Rakelhöhe	103
B.1.5 Absprung	103
B.2 Siebparameter	103
B.2.1 Gewebe	103
B.2.2 Theoretisches Farbvolumen	104
B.2.3 Rahmen	104
Publikationen	105
Literaturverzeichnis	107
Danksagung	116

Einleitung

Es ist bekannt, dass fossile Energieträger den Welternegiebedarf dieses Jahrhunderts nicht decken können [1] [2] [3]. Alternativ steht derzeit nur die Technologie der Kernspaltung oder Nutzung regenerativer Energiequellen zur Verfügung. Ob und wann Kernfusion wirtschaftlich nutzbar sein wird ist ungewiss. Da die Kernspaltung aufgrund der Entsorgungsproblematik und des Sicherheitsrisikos politisch mehr und mehr abgelehnt wird, gewinnen regenerative Energien immer mehr an Bedeutung. In verschiedenen Studien wird dabei der Nutzung von Solarenergie eine große Rolle beigemessen [4]. Im Jahre 2050 wird mit einer in Deutschland installierten Leistung von bis zu 93 GW_{peak} ausgegangen [5]. Sehr bekannt ist inzwischen die Prognose des Shell-Konzerns [6], die belegt, dass die Fotovoltaik in Großunternehmen nicht nur ein Aspekt ist sich einen "grünen Anstrich" zu geben, sondern ein zukunftsreicher Wirtschaftszweig. Die größten Hersteller von Solarzellen sind heute weltweit operierende Konzerne aus den Öl-, Energie- und Technologie-sektoren wie BP (BP Solar), Kyocera, Sanyo, Sharp, Shell (Siemens & Shell Solar) sowie RWE (RWE Solar). Besonders in Deutschland werden neue Unternehmen im Bereich Siliziumsolarzellen gegründet, die inzwischen auch weltweit einen signifikanten Marktanteil einnehmen (z.B. Ersol AG, sunways AG, Q-Cells AG und Deutsche Solar AG).

Die meisten Solarzellenhersteller haben nur eine kleine eigene Entwicklungsabteilung und arbeiten eng mit Forschungsinstituten zusammen. Dadurch wächst die Bedeutung von angewandter Forschung an den Instituten und Hochschulen. Bis vor wenigen Jahren wurde in den führenden deutschen Solarforschungszentren hauptsächlich an Hochleistungs-solarzellen und Grundlagenforschung gearbeitet. Entgegen diesem vorherrschenden Trend wurde am Lehrstuhl von Prof Dr. Bucher an der Universität Konstanz schon früh neben der Grundlagenforschung ein Schwerpunkt auf anwendungsnahe Konzepte, Prozesse und Technologien gelegt.

Bei Solarzellen auf Basis von monokristallinen oder blockgegossenen Siliziumwafern entfällt über die Hälfte der Herstellungskosten und Energieaufwendung auf die Herstellung des Wafers. Somit ergeben sich zwei wesentlichen Ansatzpunkte, die Kosten pro Watt und die Energierückzahlzeit¹ zu senken: die Verwendung von alternativen Verfahren zur Waferherstellung wie z.B. Folienziehverfahren [8] und die Erzielung eines möglichst hohen Wirkungsgrades unter Verwendung von blockgegossenen Siliziumwafern.

An der Universität Konstanz wird in beiden Bereichen gearbeitet. Im Rahmen der Entwicklung und Optimierung industriell anwendbarer Hochleistungsprozesse für blockge-gossene Siliziumwafer wird sowohl das Buried Contact Metallisierungsverfahren verfolgt [9], als auch die auf Dickfilmtechnik basierende Sieb- und Rollendruckverfahren.

Ein wesentlicher Bestandteil dieser Arbeit war die Optimierung des Solarzellprozesses un-

¹Die Energierückzahlzeit ist die Zeitdauer, die ein Solarmodul betrieben werden muss, um soviel Energie bereitzustellen, wie zu seiner Herstellung nötig war. Die Energierückzahlzeit für ein in einem modernem Prozess hergestelltes Solarmodul beträgt weniger als 2 Jahre im sog. Sonnengürtel und weniger als 4 Jahre in Mitteleuropa [7].

ter Verwendung der Siebdruckmetallisierung. Dieser Prozess ist inzwischen mehrfach in die Industrie transferiert worden und wird hier als "Standardprozess" bezeichnet. War der höchste erreichte Wirkungsgrad im ersten Jahr (1997) noch 14,3% [10] auf einer Zellfläche von 25 cm², so wird inzwischen im Mittel fast 15% auf einer Fläche von 156 cm² erreicht, wobei nur Technologie verwendet wird, die auch industriell im Einsatz ist. Spitzenwerte liegen bei über 16%. Da viel im Team gearbeitet wurde, ist nicht immer klar abzugrenzen, wer welche Ideen gehabt hat bzw. was entwickelt hat. An der Optimierung des Standardprozesses waren insbesondere folgende KollegInnen mit den jeweiligen Schwerpunkten beteiligt: F. Huster (Metallisierung), B. v. Finckenstein (PECVD² SiN_x), A. Hauser (Diffusion) sowie B. Fischer (Charakterisierung).

Im ersten Kapitel dieser Arbeit werden Grundlagen zum Prozess und Solarzellenphysik gegeben sowie wesentliche Messverfahren erläutert. Es folgt im zweiten Kapitel die Beschreibung einiger vom Autor geplanter und durchgeführter Experimente zur Optimierung des Standardprozesses. Die Zellfläche ist dabei generell 10 × 10 cm² oder 12,5 × 12,5 cm². Da der Standardprozess fortlaufend verbessert werden soll, ist die Fragestellung für den weiteren Verlauf der Arbeit, ob der Wirkungsgrad eines Solarmoduls unter Verwendung einer mechanisch erzeugten V-Textur kosteneffektiv gesteigert werden kann. Deshalb werden in Kapitel 3 die Auswirkung einer V-Textur auf die Solarzelle und die mögliche Wirkungsgradsteigerung diskutiert. Technologische Aspekte wie die Anforderungen an Maschine und Werkzeug für die mechanische Texturierung werden in Kapitel 4 behandelt. Schwerpunkt in Kapitel 5 ist der Vergleich von Solarzellen und Modulen mit unterschiedlicher Oberflächentextur. Den Abschluss bilden in Kapitel 6 Aspekte zum Technologietransfer und schließlich wird in Kapitel 7 eine Zusammenfassung und ein Ausblick gegeben.

Da der hier beschriebene Standardprozess Gegenstand eines Technologietransfers ist, unterliegen die Prozessparameter der Vertraulichkeit und können deshalb nicht explizit genannt werden.

²Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition

Kapitel 1

Grundlagen

Zu Beginn dieser Arbeit werden Grundlagen der Theorie und Messtechnik vorgestellt, die eine wichtige Basis für die durchgeführten Rechnungen und Messergebnisse sind. Begonnen wird dabei mit dem Standardprozess zur Herstellung einer typischen Industriesolarzelle und einem Modell für Generation, Rekombination und Widerstandsverluste in einer Solarzelle, dem Zwei-Dioden-Modell. Es folgt eine Beschreibung des Dickfilmkontaktes, der für alle in dieser Arbeit behandelten Solarzellen verwendet wurde. Den Abschluss bildet die Diskussion zweier für diese Arbeit wichtiger Messmethoden, zum einen die Messung des Kontaktwiderstandes und zum anderen die Messung der internen Quantenausbeute (IQE). Zwar sind solche Messungen in der Solarzellenforschung allgemein seit langem üblich, jedoch wurden sie für Hochleistungssolarzellen mit einer kleinen Zellfläche entwickelt und sind nicht ohne Anpassung für Industriesolarzellen mit Zellfläche größer 100 cm^2 geeignet.

1.1 Die Silizium-Industriesolarzelle

1.1.1 Standardprozess

Herstellung der Wafer

Die in dieser Arbeit behandelten Solarzellen sind alle unter Verwendung multikristalliner Siliziumwafer hergestellt worden. Die Wafer sind standardmäßig etwa $330 \mu\text{m}$ dick und haben eine Bor-Grunddotierung (p) von etwa $10^{16} \text{ Atomen/cm}^3$, was einer Leitfähigkeit von $0,5 - 2 \Omega\text{cm}$ entspricht ¹. Typische Wafergrößen in der industriellen Produktion sind $10 \times 10 \text{ cm}^2$, $12,5 \times 12,5 \text{ cm}^2$ sowie $15 \times 15 \text{ cm}^2$. Ausgangsmaterial zur Herstellung der Wafer ist reines Silizium, entweder in Form von Endstücken der monokristallinen Kristalle, die in der Halbleiterindustrie nicht mehr verwendet werden können, oder polykristallines Silizium, wie es zum Beispiel aus Quarzsand mittels Reduktion und anschließender Reinigung gewonnen werden kann. Zur Herstellung von Solarzellen ist die Reinheit dieses "electronic grade" Siliziums nicht notwendig, deshalb wird an einem weniger aufwendigen und kostengünstigeren Reinigungsprozess für "solar grade" Silizium gearbeitet, welches mehr Verunreinigungen enthält als das "electronic grade" Silizium [11] [12].

Das Silizium wird aufgeschmolzen und kristallisiert zu einem etwa $60 \times 60 \times 40 \text{ cm}^3$ großen **Ingot** (siehe Abb. 1.1). Alternativ kann es auch separat aufgeschmolzen werden

¹Solarzellen lassen sich auch auf Basis von n-dotierten Wafers herstellen, üblich ist jedoch mit Bor p-dotiertes Material.

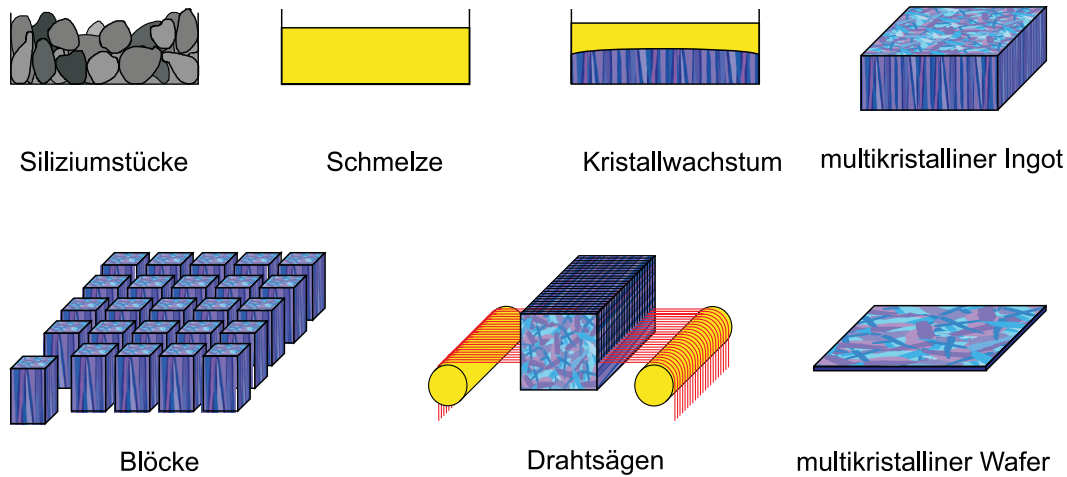


Abbildung 1.1: Herstellung multikristalliner Wafer mittels HEM (Heat Exchange Method). Reines Silizium wird in einer Form aufgeschmolzen, kontrolliert abgekühlt und kristallisiert zu einem Ingot. Dieser wird zunächst in Blöcke, dann in Wafer geschnitten [14].

und dann zum Erstarren in eine Form gegossen werden [13] [14] [15]. Der Ingot wird dann in **Blöcke** gesägt, aus denen wiederum mit einer Drahtsäge die **Wafer** geschnitten werden (siehe Abb. 1.1).

Herstellung von Siebdrucksolarzellen

Das Sägen der Wafer aus dem Block verursacht Risse und Versetzungen (siehe Abb.4.7) an denen Ladungsträger rekombinieren. Die obere Schicht von ca. 5 - 10 μm wird deshalb als **“Sägeschaden“** bezeichnet und muss entfernt werden, da die hohe Rekombination einen Abfall von Kurzschlussstrom, Leerlaufspannung und Füllfaktor verursacht. Anschließend wird der Wafer gereinigt und mittels POCl_3 - **Diffusion** ein Phosphoremitter erzeugt und die Front- und Rückseite elektrisch voneinander getrennt. Nach dem Aufbringen der Antireflexschicht werden die Kontakte im Siebdruckverfahren gedruckt und eingebrannt.

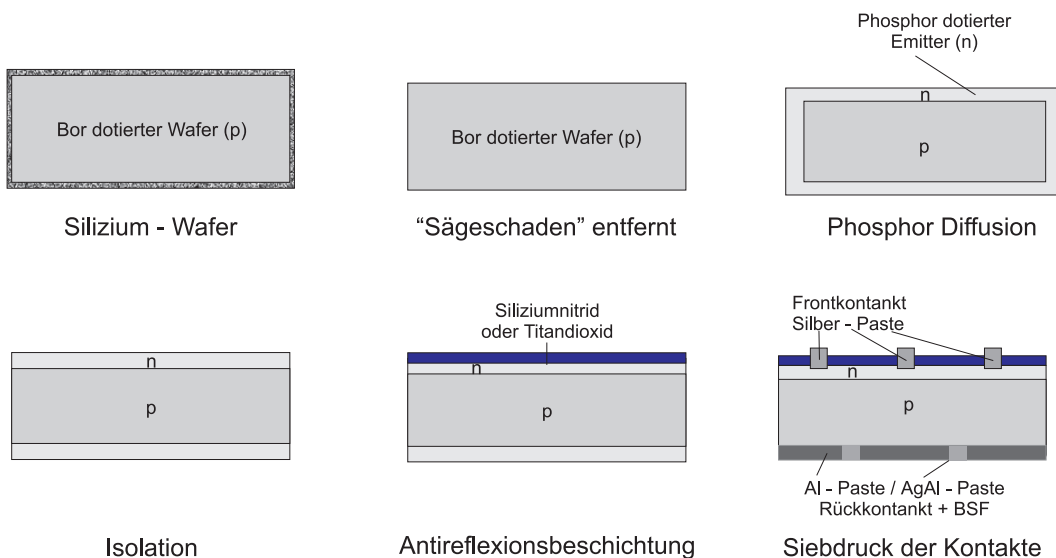


Abbildung 1.2: Standardprozess zur Herstellung von Silizium-Industriesolarzellen. Wegen der Schädigung der Kristallstruktur durch das Sägen wird die obere Schicht entfernt. Mittels Phosphordiffusion wird ein Emitter erzeugt und die Front- und Rückseite elektrisch voneinander getrennt. Nach dem Aufbringen der Antireflexschicht werden die Kontakte im Siebdruckverfahren gedruckt und eingebrannt.

(n) erzeugt. Auch die Kanten sind danach n - dotiert und somit sind Front- und Rückseite elektrisch leitend verbunden und die Solarzelle kurzgeschlossen. Die Unterbrechung dieser Verbindung wird mit **Isolation** oder Trennen des parasitären pn - Übergangs bezeichnet. Darauf folgt die **Antireflexbeschichtung** aus TiO_2 oder SiN_x . Als letzter Schritt werden mittels Siebdruck die **Kontakte** aufgebracht und eingebrannt, letzteres wird auch "Feuern" genannt ².

1.1.2 Das Zwei-Dioden-Modell

Eine Solarzelle kann durch ein Netzwerk aus zwei Dioden, zwei Widerständen, einer Stromquelle und einem Verbraucher beschrieben werden (siehe Abb. 1.3 und Gl. 1.1). Die Stromquelle steht hierbei für die Generation von Ladungsträgern in der Solarzelle, über den Verbraucher wird der Stromkreis geschlossen. Rekombination wird durch die Dioden beschrieben, dabei steht die erste Diode mit dem Sättigungsstrom I_{01} (siehe Gleichung 1.2) für Rekombination in Basis und Emitter und eine zweite Diode mit dem Sättigungsstrom I_{02} (siehe Gleichung 1.2) für Rekombination in der Raumladungszone.

$$I(U) = I_{01} \left(e^{\frac{U-IR_S}{n_1 k_B T}} - 1 \right) + I_{02} \left(e^{\frac{U-IR_S}{n_2 k_B T}} - 1 \right) + \frac{U - IR_S}{R_{Sh}} - I_{PH} \quad (1.1)$$

mit

$$I_{01} = \frac{qD_n n_i^2}{L_n N_A} + \frac{qD_p n_i^2}{L_p N_D} \quad (1.2)$$

und

$$I_{02} = \frac{kT\pi n_i}{\tau_0 E_{max}} \quad (1.3)$$

²Alternativ zum Siebdruckverfahren kann Metallisierungspaste auch durch Spritzendruck [16] oder Pad Printing [17] aufgebracht werde. Dies ist besonders für Wafer mit welliger Oberfläche wie EFG [18] geeignet, jedoch nicht der industrielle Standard.

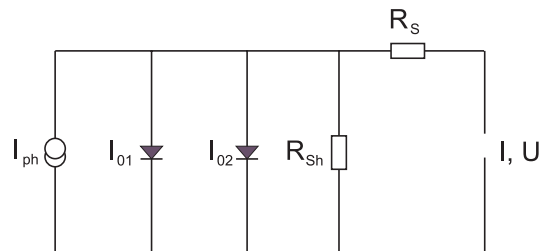


Abbildung 1.3: Ersatzschaltbild für eine Solarzelle im Zwei-Dioden-Modell .

Dabei ist:

$I(U)$	Strom, der durch den Verbraucher fließt
U	Spannung, die am Verbraucher anliegt
R_S	Serienwiderstand
R_{Sh}	Shuntwiderstand (Parallelwiderstand)
I_{PH}	Fotostrom, der in der Solarzelle erzeugt wird
I_{01}	Sättigungsstrom für Rekombination in der Basis dem Emitter
I_{02}	Sättigungsstrom für Rekombination in der Raumladungszone
q	Elementarladung
D_n/D_p	Diffusionskoeffizient der Elektronen / Löcher
n_i	intrinsische Ladungsträgerdichte
L_n/L_p	Diffusionslänge der Elektronen / Löcher
N_A/N_D	Akzeptorenkonzentration / Donatorenkonzentration
k	Boltzmann - Konstante
T	absolute Temperatur
τ_0	Ladungsträgerlebensdauer
E_{max}	elektrisches Feld am p-n-Übergang

Der Serienwiderstand R_S der Solarzelle lässt sich als Netzwerk der folgenden Komponenten darstellen:

- Der **Lateralwiderstand des Busbars** $R_{S \text{ Busbar}}$ ist nur auf Zellebene von Bedeutung, denn beim Modul wird ein verzinntes Kupferband (auch Verbinder oder Tabbing genannt) aufgelötet, welches einen wesentlich geringeren Widerstand hat, als der gedruckte Busbar ³.
- Der **Lateralwiderstand der Finger** $R_{S \text{ Finger}}$ liefert einen der Hauptbeiträge und ist im wesentlichen von der Geometrie und dem verwendeten Material (z. B. Siebdruckpaste) abhängig. Hier wiederum sind durch den Herstellungsprozess enge Grenzen gesetzt.
- Der **Kontaktwiderstand des Frontkontaktes** R_c ist stark vom Herstellungsprozess und der Emitterdotierung der Solarzelle abhängig. Der spezifische Kontaktwiderstand liegt für Siebdrucksolarzellen in der Größenordnung von $\rho_c < 10 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$, wodurch der Kontaktwiderstand ein Hauptbeitrag zum Serienwiderstand liefert. Für Hochleistungssolarzellen ist der Beitrag des Kontaktwiderstandes R_c in der Regel deutlich geringer, da bei aufgedampften Kontakten ein spezifischer Kontaktwiderstand bis zu $0,01 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$ erreicht werden kann.
- Der **Schichtwiderstand des Emitters** ρ_s liefert einen der Hauptbeiträge zum Serienwiderstand, demnach ist ein niedriger Schichtwiderstand günstig. Allerdings lässt sich mit einem gering dotiertem Emitter, also einem Emitter mit hohem Schichtwiderstand ein höherer Strom erreichen, da weniger Ladungsträger im Emitter rekombinieren.
- Der **Volumenwiderstand** wird durch die Grunddotierung des Wafers bestimmt. Bei der üblicherweise verwendeten Dotierung von $0,5 - 2 \Omega\text{cm}$ fällt er nicht ins Gewicht.

³Im Modul beeinflusst der Widerstand des Tabblings die maximale Leistung jedoch signifikant [19].

- Der **Kontaktwiderstand des Rückkontaktes** ist so gering, dass er bei ganzflächigem Kontakt vernachlässigbar ist, bei einem lokalen Rückkontakt ist er jedoch signifikant.

Für eine quantitative Betrachtung der Widerstandsbeiträge siehe Abb. 2.9. Eine großflächigen Industriesolarzelle lässt sich nicht immer durch das Zwei-Dioden-Modell beschreiben, da oft weder die Lebensdauer des Wafers, noch Kontaktwiderstand homogen über die Fläche sind. So fließt z.B. nahe des Busbars deutlich mehr Strom durch einen Finger und es fällt eine geringere Spannung ab, als am Rand der Zelle. Aufgrund des Widerstands im Frontkontakt liegt nicht der gesamte Frontkontakt auf einem Potential, sondern ein Teil des Frontkontaktes kann als Widerstand betrachtet werden, an dem auch Spannung abfällt. Dies kann mathematisch berücksichtigt werden, indem man die Solarzelle als kleine parallel geschaltete Unterzellen mit jeweils konstanten Widerstandsbeiträgen betrachtet (siehe Abb. 1.4). In diesem Modell sind unter dR die Serienwiderstandsbeiträge des Busbars und der Finger zusammengefasst; dR_s berücksichtigt den Serienwiderstand im Emitter, Kontaktwiderstand des Front- und Rückkontaktes sowie Bulk - Widerstand. Es kann dann ein sog. "lumped" Serienwiderstand angegeben werden, der die verteilt berechneten Serienwiderstandsbeiträge zusammenfasst⁴ [20]. Sind die Widerstandsbeiträge dR bzw. dR_s jedoch nicht jeweils gleich, was im Falle des Kontaktwiderstandes bei nicht optimal prozessierten Siebdrucksolarzellen durchaus häufig der Fall ist, kann eine IV-Kennlinie auch mit diesem Modell nicht beschrieben werden. Es müssten voneinander unabhängige "Teilsolarzellen" betrachtet werden, die dann parallel geschaltet sind. Sollte dieses Modell in einem Fitprogramm zur Beschreibung einer gemessenen IV-Kennlinie eingesetzt werden, so hätte man zu viele Parameter für einen Fit zur Verfügung, so dass neben der Kennlinie weitere Informationen über die Solarzelle benötigt würden. Dies könnte z.B. eine orts aufgelöste Messung des Kontaktwiderstands sein [21]. Neben dem Widerstand ist natürlich auch Generation und Rekombination von Ladungsträgern nicht immer homogen über eine großflächigen Industriesolarzelle [22].

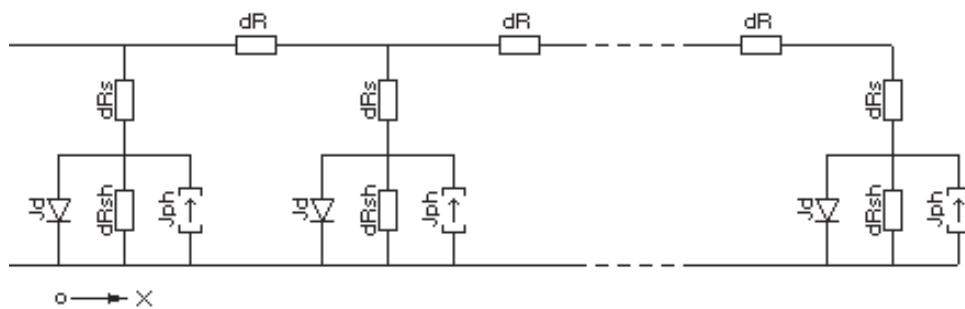


Abbildung 1.4: Modell für die verteilte Generation, Rekombination und Widerstände in einer Solarzelle. Unter dR sind Serienwiderstandsbeiträge des Busbars und der Finger zusammengefasst, dR_s berücksichtigt den Serienwiderstand im Emitter, Kontaktwiderstand der Front und Rückkontakte sowie Bulk - Widerstand [20].

⁴Dieses Modell liegt dem Simulations- und Fitprogramm "IVCC" für IV-Kennlinien von B. Fischer zu Grunde, welches für Fits der gemessenen Kennlinien in dieser Arbeit verwendet wurde.

1.1.3 Der Dickfilmkontakt

Etwa 70% der weltweit hergestellten Solarzellen werden mittels Dickfilmpasten metallisiert [25]. Die dazu verwendete Paste enthält im Wesentlichen folgende Bestandteile:

- Lösungsmittel, um sie leicht auftragen zu können,
- organische Binder, über die die gewünschte Viskosität eingestellt wird,
- Metallpartikel in Form von wenigen Mikrometer großen Kugeln und Flocken, die den Kontakt zum Wafer herstellen und eine gute Leitfähigkeit bewirken,
- eine Mischung von Borsilikatglas mit verschiedenen Metalloxiden, die gewöhnlich als Glasfritte bezeichnet wird.

Nach dem Druck wird die Paste getrocknet und eingebrannt (gefeuert). Beim Trocknen entweichen die Lösungsmittel aus der Paste und es wird ein schwacher mechanischer Kontakt hergestellt. Beim Feuern der Kontakte werden die organischen Bestandteile verbrannt und die Glasfritte schmilzt [26]. Sie ätzt in den Wafer und fördert die Bildung des Kontaktes zum Wafer und das Zusammenschmelzen der Metallpartikel, so dass eine leitende Verbindung im Kontakt entsteht [27]. Dabei kann auch eine dielektrische Antireflexschicht wie SiN_x oder TiO_2 durchdrungen werden. Ob die Glasfritte in den Wafer ätzt, hängt noch entscheidend von der Benetzung des Wafers durch die Paste, also den organischen Bestandteilen ab. Erhitzt man z.B. Aluminium auf einem Siliziumwafer, so wird dieses zwar flüssig, jedoch bildet sich eine Oxidschicht, die eine Verbindung mit dem Wafer verhindert. Die richtige Mischung aus Binder, Metall und Fritte ist somit ein sehr komplexes Problem und wegen des kommerziellen Interesses der Pastenhersteller in der Literatur so gut wie gar nicht beschrieben. Da das Ätzverhalten der Glasfritte anisotrop ist, entsteht ein raues Interface (siehe Abb. 1.5a). Die richtige Feuertemperatur, Temperaturrampen und Prozesszeiten ist somit von entscheidender Bedeutung. Für den Fall einer Antireflexschicht aus TiO_2 mit einer darunter liegenden SiO_x Schicht hat R. Young [23] ein vierstufiges Modell vorgeschlagen (siehe Abb. 1.5b):

Bei zu geringer Intensität wird das TiO_2 nicht durchdrungen. Bei steigender Intensität des Feuerns (entweder längere Zeit oder höhere Temperatur) wird zwar das TiO_2 durchdrungen, jedoch fungiert das SiO_x als Ätzstop. Im dritten Schritt liegen optimale Bedingungen

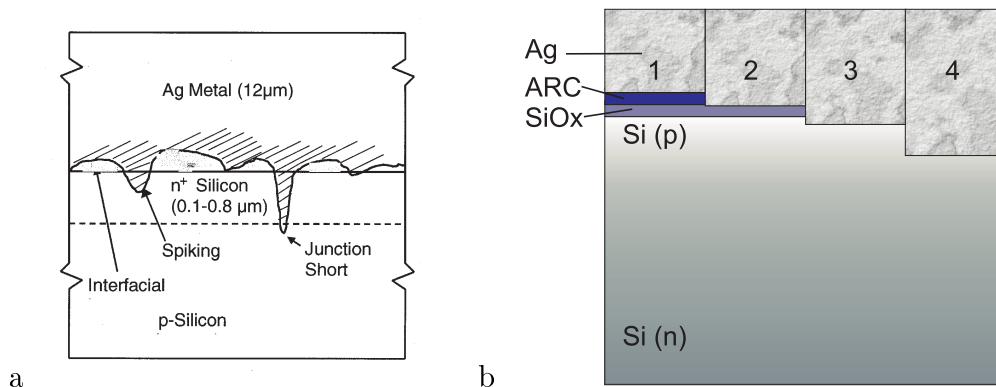


Abbildung 1.5: a) Interface zwischen dem Siebdruckkontakt und dem Wafer [24]. b) Modell der Kontaktbildung für einen Siebdruckkontakt durch eine Antireflexschicht aus TiO_2 [23]

vor, die Paste durchdringt sowohl TiO_2 als auch SiO_x und hat einen guten elektrischen und mechanischen Kontakt zum Emitter der Solarzelle. Bei weiterer Steigerung der Feuerintensität wird der Emitter soweit von der Paste durchdrungen, dass einzelne Partikel in die Raumladungszone gelangen. Dies hat dann verstärkte Rekombination in der Raumladungszone und somit eine niedrigere Leerlaufspannung zur Folge. Bei weiterer Steigerung der Feuerintensität kommt es dann zu Kurzschlüssen. In der Praxis ist der Kontaktwiderstand ein gutes Maß zur groben Ermittlung einer optimalen Region der Feuerparameter. Für eine Feinoptimierung sind jedoch auch die anderen Zellparameter wichtig. Ist die Geometrie des Fingergrids an die Widerstände im Emitter und der Metallisierung angepasst, werden optimale Feuerparameter meist anhand eines Maximums des Füllfaktors ermittelt. Hier gehen die wesentlichen Parameter wie Serienwiderstand, Shuntwiderstand und Rekombination ein.

In Abb. 1.6 sind Elektronenmikroskopaufnahmen von einem gefeuertem Front und Rückkontakt zu sehen. Deutlich sind die zusammengesinterten Metallpartikel zu erkennen, der Kontakt gleicht eher einem Schwamm, als einem reinen Metallkontakt. Der Lateralwiderstand ist deshalb um etwa den Faktor 3 höher als bei reinem Silber. Da ebenfalls nicht über die ganze Fläche der Metallisierung mechanischer Kontakt zwischen Paste und Silizium besteht, sondern nur da, wo die Metallpartikel die Zelle berühren, weist der Dickfilmkontakt einen deutlich höheren Kontaktwiderstand auf als aufgedampfte Kontakte.

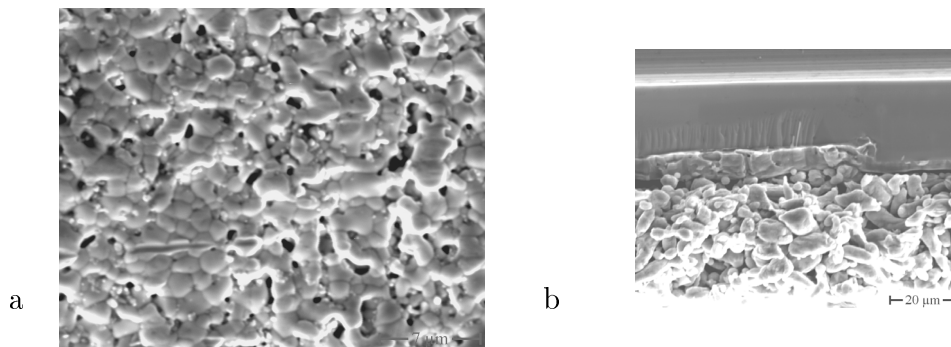


Abbildung 1.6: a) Aufsicht auf den gefeuerten Frontkontakt mit Ag-Paste. Man sieht die zusammengesinterten Metallpartikel, der Kontakt gleicht eher einem Schwamm als einem reinen Metall. b) Schnitt durch den gefeuerten Rückkontakt mit Al-Paste. Oberhalb der Paste ist eine ein eutektisches Gemisch aus Aluminium und Silizium, darüber der Siliziumwafer zu sehen.

1.2 Kontaktwiderstand

1.2.1 Das Transmission Line Model (TLM)

Das Transmission Line Model ist ein einfaches Modell zur Erklärung des Kontaktwiderstandes. Im TLM wird der Kontakt zwischen einer dünnen leitenden Schicht, wie zum Beispiel dem Emitter einer Solarzelle und einem gut leitenden Material, zum Beispiel dem Metall des Fingers, betrachtet (siehe Abb. 1.7a). Dabei werden folgende Annahmen gemacht [28] [29]:

- Der Schichtwiderstand ist über die ganze Probe homogen, insbesondere auch unter dem Kontakt.
- Der Widerstand des Metallkontakts ist vernachlässigbar klein.

- Der Strom fließt eindimensional, also durch eine Schicht mit infinitesimal kleiner Dicke und senkrecht durch diese Schicht zum Kontakt.
- Der Strom geht nicht am Anfang des Kontaktes komplett in den Kontakt über, sondern durchfließt teilweise eine charakteristische Strecke, die **Transferlänge L_T** , unter dem Kontakt (Siehe Abb. 1.7b).

Über die Transferlänge und den Schichtwiderstand läßt sich der **spezifische Kontaktwiderstand**⁵ ρ_c folgendermaßen berechnen:

$$\rho_c = \rho_s L_T^2 \quad \Leftrightarrow \quad L_T = \sqrt{\frac{\rho_c}{\rho_s}} \quad (1.4)$$

Um den Stromfluss aus der Halbleiterschicht in den Kontakt mathematisch zu beschreiben wird ein infinitesimal kleiner Abschnitt einer elektrischen Leitung betrachtet und der serielle sowie parallele Widerstandsanteil einer Leitung der entsprechenden Größen im Falle des Kontaktes zugeordnet. Es werden folgenden Größen verwendet:

- B Breite des Kontakts
- d Abstand der Kontaktfinger
- I Strom durch den Kontakt
- ρ_c spezifischer Kontaktwiderstand
- ρ_s Schichtwiderstand des Emitters
- R_c Kontaktwiderstand
- Z Fingerlänge
- L_T Transferlänge

Mit Hilfe der Leitungsgleichungen und der Annahme, dass der gesamte Strom durch den Kontakt abfließt erhält man für den Kontaktwiderstand folgende Beziehung (siehe Anhang A.1):

$$R_c = \frac{\sqrt{\rho_s \rho_c}}{Z} \coth \left(\sqrt{\frac{\rho_s}{\rho_c}} \cdot B \right) = \frac{\rho_s L_T}{Z} \coth \left(\frac{B}{L_T} \right) = \frac{\rho_c}{L_T Z} \coth \left(\frac{B}{L_T} \right). \quad (1.5)$$

Der Faktor $\coth \left(\frac{B}{L_T} \right)$ trägt der Tatsache Rechnung, dass der Strom nicht homogen über den ein Fläche des Kontaktes den Kontakt übergeht, sondern inhomogen verteilt über die Transferlänge (siehe Abb. 1.7 b)).

⁵Der spezifische Kontaktwiderstand kann definiert werden als $\rho_c = \frac{\partial V}{\partial j} |_{V \rightarrow 0}$ [30] oder $\rho_c = \lim_{(\Delta A \rightarrow 0)} (R_c \cdot \Delta A)$, wobei ΔA die Kontaktfläche ist [31]. Diese Größen sind jedoch über eine Messung nicht zugänglich, deshalb wird der spezifische Kontaktwiderstand über die Transferlänge berechnet.

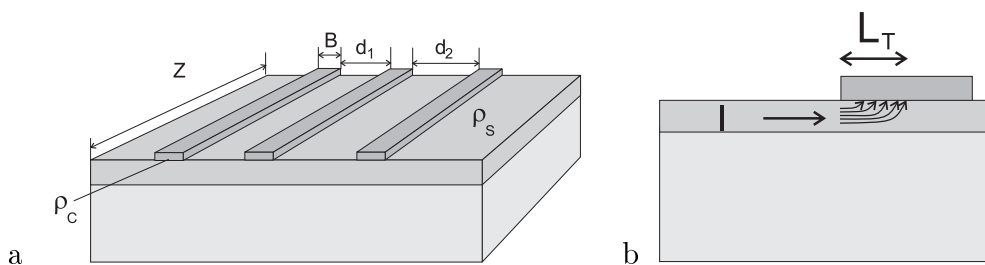


Abbildung 1.7: a) Geometrie einer Solarzelle, wie sie für das Transmission Line Model (TLM) vorliegen muss, damit der Kontaktwiderstand erklärt werden kann. b) Veranschaulichung der Transferlänge: der Strom geht nicht am Anfang des Kontaktes komplett in den Kontakt über, sondern durchfließt teilweise zunächst eine Strecke unter dem Kontakt.

1.2.2 Messung des Kontaktwiderstandes

Transfer Length Method

Eine Methode zur Bestimmung des Kontaktwiderstandes einer Metall-Halbleiter-Grenzschicht wurde zuerst 1964 von William Shockley vorgeschlagen [31]. Da der spezifische Kontaktwiderstand über die Transferlänge berechnet wird, wird diese Methode **Transfer Length Method** genannt und wie das Transmission Line Model ebenfalls TLM abgekürzt. Es wird angenommen, dass der Strom vollständig von einem Kontaktstreifen durch die Halbleiterschicht in den zweiten Kontaktstreifen fließt.

Zur Messung werden mindestens drei Kontaktstreifen mit gleichen geometrischen und elektrischen Eigenschaften in den Abständen d_1 und d_2 verwendet (siehe Abb. 1.7). Damit ergibt sich für den Gesamtwiderstand zwischen je zwei benachbarten Kontaktstreifen ($i = 1, 2$):

$$R_{Ti} = \frac{\rho_s d_i}{Z} + 2R_c. \quad (1.6)$$

Trägt man den Gesamtwiderstand für verschiedene Abstände d_i auf, so ist der doppelte Kontaktwiderstand $+2R_c$ der Schnittpunkt mit der y-Achse (siehe Abb. 1.8). Es folgt für den absoluten Kontaktwiderstand und Gleichung 1.5 :

$$R_c = \frac{(R_{T2}d_1 - R_{T1}d_2)}{2(d_1 - d_2)} = \frac{\rho_s L_T}{Z} \coth\left(\frac{B}{L_T}\right) \quad (1.7)$$

Mit dieser Gleichung lässt sich die Transferlänge L_T berechnen und über Gleichung 1.4 auch der spezifische Kontaktwiderstand ρ_c . Sie ist nicht analytisch lösbar, jedoch sind zwei Näherungslösungen von besonderem Interesse:

1. $B < 0.5 L_T$, dann ist der $\coth\left(\frac{B}{L_T}\right) \approx \frac{L_T}{B}$ und somit

$$R_c \approx \frac{\rho_c}{B Z} \quad (1.8)$$

d.h. der absolute Kontaktwiderstand ist abhängig von der Kontaktfläche $B \cdot Z$ und damit der Kontaktbreite und unabhängig von der Transferlänge.

2. $B > 1.5 L_T$, dann ist $\coth\left(\frac{B}{L_T}\right) \approx 1$ und somit

$$R_c \approx \frac{\rho_c}{L_T Z} \quad (1.9)$$

d.h. der absolute Kontaktwiderstand ist unabhängig von der Kontaktbreite. An die Stelle der Kontaktbreite B tritt die Transferlänge L_T .

In Abb. 1.8b sind die Bereiche grau hinterlegt, in denen die jeweilige Näherung bei einem $35 \Omega/\square$ Emitter gilt.

Messung

Um den spezifischen Kontaktwiderstand zu bestimmen, wird der totale Widerstand R_{Ti} zwischen jeweils zwei Kontaktstreifen gemessen. Der Schichtwiderstand zwischen den Kontaktstreifen wird als homogen angenommen. Liegen weitere Kontaktstreifen zwischen denen der Messung wird evtl. das Ergebnis beeinflusst. Die gemessenen Gesamtwiderstände R_{Ti} werden über die Abstände des jeweiligen Kontaktpaares aufgetragen, nach

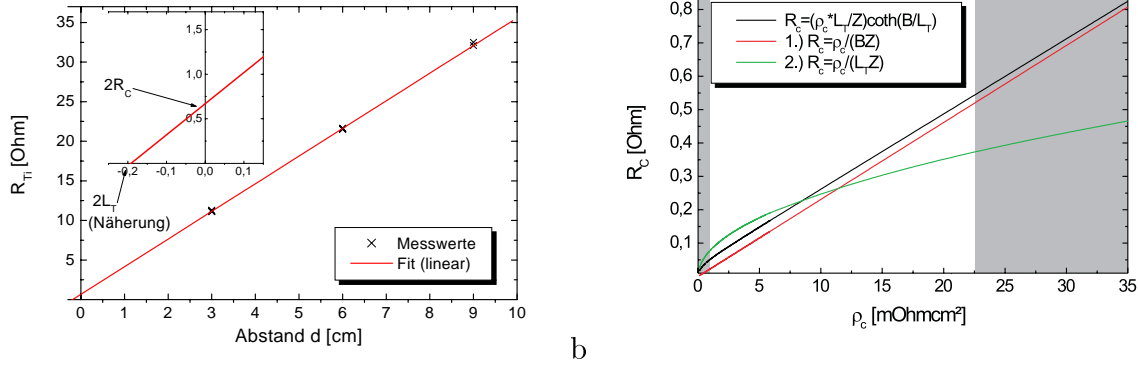


Abbildung 1.8: a) Bestimmung des Kontaktwiderstandes durch Auftrag des totalen Widerstandes R_T in Abhängigkeit des Abstandes d der vermessenen Kontaktpaare. Der Schnittpunkt mit der x-Achse ist der doppelte absolute Kontaktwiderstand R_c und der Schnittpunkt mit der y-Achse näherungsweise die doppelte Transferlänge L_T . b) Näherung für den Kontaktwiderstand bei einem $35 \Omega/\square$ Emitter und Kontaktbreite von $120 \mu\text{m}$.

Gl. (1.6) liegen sie auf einer Gerade wie in Abb. 1.8b. Aus der Steigung dieser Geraden läßt sich mit Hilfe der Länge der Kontaktstreifen Z der Schichtwiderstand ρ_s und aus dem y-Achsenabschnitt der absolute Kontaktwiderstand R_c bestimmen. Der absolute Kontaktwiderstand R_c ist deutlich kleiner als die eigentlichen Messwerte, was leicht zu Fehlern führt, wenn die Abstände zwischen den Kontaktstreifen (Fingerabstände) relativ groß sind. Eine Abschätzung der Fehler wird am Ende dieses Kapitels vorgenommen. Für den Fall $B \geq 1.5 L_T$ ist der x-Achsenabschnitt gleich der doppelten Transferlänge L_T , und somit leicht zu bestimmen. Gilt diese Näherung nicht, muss die Gleichung 1.5 numerisch gelöst werden. Über den Schichtwiderstand und die Transferlänge kann nun nach Gleichung (1.4) der spezifische Kontaktwiderstand ρ_c berechnet werden.

Zur Messung kann z.B. ein ca. 10 mm breiter Streifen einer Solarzelle mit Kontakten oder ein Streifen mit einer spezieller Teststruktur verwendet werden. Damit weder der Kontaktwiderstand zwischen Probe und Kontaktspitze noch der Innenwiderstand des Messgerätes in die Messung eingeht, wird die Probe mit zwei Doppelspitzen kontaktiert (Vierpunktmessung). Die für die Messung verwendete Stromstärke sollte in der Größenordnung des Kurzschlussstromes der Solarzelle liegen, um annähernd reale Bedingungen zu erhalten. Für einen Fingerabstand von 2,5 mm und einer Kurzschlussstromdichte von $J = 30 \text{ mA/cm}^2$ folgt 7,5 mA/cm Kontaktlänge. Die Probe sollte zur Messung abgedunkelt werden.

Das Messprogramm [32] führt eine lineare Regression des Gesamtwiderstandes R_T gegen den Fingerabstand d^6 durch und berechnet R_c mit einer Standardabweichung aus dem x-Achsenabschnitt und ρ_s aus der Steigung. Die Transferlänge L_T wird mit Hilfe des Newton-Verfahrens aus Gleichung (1.5) bestimmt und daraus der spezifische Kontaktwiderstand ρ_c berechnet. Als Fehlergrenzen für ρ_c wird $\Delta\rho_c = \rho_c(R_c + \Delta R_c) - \rho_c(R_c)$ berechnet.

⁶Im Messprogramm wird der Fingerabstand von Fingermitte zu Fingermitte eingegeben. Davon wird dann die ebenfalls eingegebene Fingerbreite abgezogen.

Fehlerabschätzung

Die vom Auswerteprogramm angegebenen Werte suggerieren unter Umständen eine Genauigkeit, die so nicht erreicht wird, da nur die Streuung der Messwerte als Fehlerquelle berücksichtigt wird, jedoch nicht die Streuung des Schichtwiderstandes auf dem Wafer und die Fingerbreite. Angenommen, die Probe ist ein Streifen einer Solarzelle mit einem Emitterschichtwiderstand von $\rho_S = 35 \Omega/\square$, die Fingerlänge sei $Z = 10 \text{ mm}$, die Fingerbreite $B = 0,1 \text{ mm}$, der Fingerabstand $s = 3 \text{ mm}$ und der absolute Kontaktwiderstand $R_c = 0,5 \Omega$. Es wird der Widerstand zwischen zwei aufeinander folgenden Fingern gemessen. Damit ergibt sich bei einfachem Fingerabstand ein Widerstand von $R = 2,9 \text{ mm}/10 \text{ mm} \times 35 \Omega + 2 \times 0,5 \Omega = 11,15 \Omega$ und bei doppeltem Fingerabstand $R = 2,9 \text{ mm}/10 \text{ mm} \times 35 \Omega + 2 \times 0,5 \Omega = 21,65 \Omega$.

In Tabelle 1.1 sind mit Gl. 1.6 und 1.5 die Werte für Kontaktwiderstand, spez. Schichtwiderstand und Transferlänge für verschiedene Widerstände des zweiten Fingers aufgrund einer Variation des Schichtwiderstandes bzw. der Fingerbreite berechnet. Hierbei handelt es sich um den Extremfall, dass nur drei Kontaktstreifen (Finger) betrachtet werden, natürlich erhöht sich die Messgenauigkeit durch Messung von mehreren. Man sieht, dass durch verhältnismäßig kleine, realistische Schwankungen in der Fingerbreite das Ergebnis nicht wesentlich beeinflusst wird, sich allerdings Variationen im Schichtwiderstand deutlich auswirken. Wie schon aus dem Graph in Abb. 1.8b zu erkennen war ist der gemessene Widerstand an einer Solarzelle wesentlich größer als der Kontaktwiderstand bzw. der Schnittpunkt mit der y-Achse. Der Fingerabstand sollte möglichst klein sein, damit sich Schwankungen im Schichtwiderstand nicht so stark auswirken und genaue Werte ermittelt werden können. Die Messung an einem Streifen einer Solarzelle ist demnach geeignet, um zu erkennen, ob sich der Kontaktwiderstand homogen über die Zelle ist, ob er sich außergewöhnlich stark auf den Serienwiderstand auswirkt oder mit Werten unter $10 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$ in einem akzeptablen Bereich liegt. Soll mit höherer Genauigkeit gemessen werden, so muss eine Teststruktur verwendet werden, bei der die Finger einen geringen Abstand haben.

Tabelle 1.1: Errechnete Werte für den Kontaktwiderstand, Schichtwiderstand und Transferlänge bei Variation der Breite des zweiten Fingers und dem Schichtwiderstand zwischen den zweiten Fingerpaar. Der veränderte Wert ist jeweils fett gedruckt, der Standard in der ersten Zeile.

$R_1[\Omega]$	$R_2[\Omega]$	$\rho_{S2}[\Omega/\square]$	$B_2[\mu\text{m}]$	$R_C[\Omega]$	$\rho_S[\Omega/\square]$	L_T	$\rho_C[\Omega\text{cm}^2]$
11,15	21,65	35	100	0,5	35	105,5	3,9
11,15	21,615	35	110	0,517	34,9	108	4,07
11,15	21,685	35	90	0,483	35,1	103	3,73
11,15	21,06	34	100	0,752	33	143,3	6,78
11,15	22,24	36	100	0,215	37	55,11	1,12

1.3 Spektrale Empfindlichkeit

Als Spektrale Empfindlichkeit (Spectral Response, SR) bezeichnet man das Verhältnis des erzeugten Kurzschlussstroms $I_{sc(\lambda)}$ zur auf die Fläche eingestrahelter Lichtleistung $F_{(\lambda)}$ bei

einer Wellenlänge⁷ (siehe Gleichung 1.10) [33] [34].

$$SR_{(\lambda)} = \frac{I_{sc(\lambda)}}{F_{(\lambda)}} \quad (1.10)$$

Aus der SR kann die externe Quantenausbeute (EQE) berechnet werden, die angibt, wie viele Ladungsträger pro eingestrahlt Photon zum Kurzschlussstrom bei einer Wellenlänge beitragen (siehe Gleichung 1.11).

$$EQE_{(\lambda)} = SR_{(\lambda)} \frac{hc}{q \cdot \lambda} \quad (1.11)$$

Hierbei ist h die Plancksche Konstante, q die Elementarladung und c die Lichtgeschwindigkeit.

Die EQE ist ein genaues Mass für die Qualität der Solarzelle unter Berücksichtigung der Reflexionseigenschaften und Metallisierungsabschattung. Es wird die gesamte Fläche der Solarzelle betrachtet. Wird die EQE mit dem Sonnenspektrum gefaltet, erhält man den Kurzschlussstrom der gesamten Zelle. Oft ist man allerdings an der internen Quantenausbeute (IQE) interessiert, da hier die Reflexion und Absorbtion in der Antireflexschicht sowie Abschattung durch die Metallisierung nicht berücksichtigt wird (siehe Gl. 1.12) [35] [36].

$$IQE_{(\lambda)} = EQE_{(\lambda)} \frac{1}{1 - R_{(\lambda)} - A_{(\lambda)}} \quad (1.12)$$

Hierbei ist $R_{(\lambda)}$ die Reflexion⁸ der Zelle und $A_{(\lambda)}$ die Absorption in der Antireflexschicht.

1.3.1 Messung der IQE

Um die IQE einer Zelle zu messen muss im Idealfall die ganze Zelle gleichmäßig mit Licht der entsprechenden Wellenlänge ausgeleuchtet sein. Ebenso muss auch die Reflexion der gesamten Zelle bestimmt werden. Dies ist bei dem vorhanden Messstand am Institut nicht möglich, sondern es kann jeweils nur ein kleiner Bereich gemessen werden. Es besteht jedoch die Möglichkeit einer guten Näherung, indem die Zelle unter dem Messfleck verfahren wird und ein mittlerer Wert berechnet wird. An der Lehrstuhl Bucher, UKN wird nicht die absolute spectral response gemessen, sondern mit Hilfe von Lock-In Verstärkern die Änderung bei einer kleinen wellenlängenabhängigen Störung. Über die Beleuchtungsstärke des Bias Lichts wird eingestellt, dass die so gemessene differentielle SR der der absoluten entspricht. Bei den hier gemessenen Industriesolarzellen liegt diese Beleuchtungsstärke des Bias Lichts bei etwa 0,3 Sonnen. Idealer Weise wird der Kurzschlussstrom der IV-Messung durch den aus der EQE errechneten kalibriert⁹. Während der Messung wird

⁷Bei großflächigen Zellen kann nicht immer die gesamte Zelle ausgeleuchtet werden, evt. muss deshalb die unterschiedliche Metallisierungsabschattung bei der SR-Messung und der IV-Messung berücksichtigt werden.

⁸Bei der Reflexion wird angenommen, dass der Metallkontakt zu 100 % reflektiert. Ist das nicht der Fall, muss sie entsprechend korrigiert werden (siehe Gl. 1.14).

⁹Bestehen systematische Messfehler im Absolutwert der EQE, kann diese so skaliert werden, dass der durch Faltung der EQE mit dem Sonnenspektrum berechnete Kurzschlussstrom gleich dem der IV-Messung ist. Es wird ein entsprechender Skalierungsfaktor eingeführt (siehe Anhang A.25). Dafür muss der der Kurzschlussstrom der IV-Messung genau bekannt sein, z.B. über eine Messung mit einer geeigneten Monitorzelle.

das Lampenintensität mit einer Monitorzelle überwacht, so können kleine Schwankungen in der Lampenintensität korrigiert werden. Für die Messung der EQE wird zunächst die SR einer Kalibrierzelle mit bekannter EQE gemessen. Dann wird die SR der zu messende Zelle aufgenommen und mit der EQE der Kalibrierzelle verrechnet nach 1.13:

$$EQE_{(\lambda)} = EQE_{(\lambda)}^{cal} \frac{\left(\frac{V^{cell}}{V^{mon}}\right)_{cell}}{\left(\frac{V^{cell}}{V^{mon}}\right)_{cal}} \cdot S \quad (1.13)$$

Dabei ist

$EQE_{(\lambda)}$	die EQE der zu messenden Zelle
$EQE_{(\lambda)}^{cal}$	die EQE der Kalibrierzelle
$\left(\frac{V^{cell}}{V^{mon}}\right)_{cell}$	SR der Zelle
$\left(\frac{V^{cell}}{V^{mon}}\right)_{cal}$	SR der Kalibrierzelle
S	der Skalierungsfaktor (siehe A.25)

Die IQE kann nun nach Gleichung 1.12 berechnen werden. Die Reflexion muss dafür entweder ohne Metallisierung gemessen¹⁰ oder die Metallisierung herausgerechnet werden. Dies ist nötig, da bei SR-Messung die Fläche der Metallisierung als Abschattung wirkt, während die Reflexion der Kontaktfinger nicht 100% ist und auch von der Wellenlänge abhängt. Die Reflexionsmessung an einer Zelle mit Metallisierung wird somit durch die Reflexion der Metallisierung verfälscht. Es ist also:

$$R_{(\lambda)}^{cary} = (1 - M^{cary})R_{(\lambda)}^{cell} + M^{cary}R_{(\lambda)}^{metal} \quad (1.14)$$

$$R_{(\lambda)}^{cell} = \frac{R_{(\lambda)}^{cary} - M^{cary}R_{(\lambda)}^{metal}}{1 - M^{cary}} \quad (1.15)$$

dabei ist $R_{(\lambda)}^{cary}$ die gemessene Reflexion inkl. Metallisierung, $R_{(\lambda)}^{cell}$ die Reflexion der Zelle ohne Metallisierung, $R_{(\lambda)}^{metal}$ die Reflexion der Metallisierung und M^{cary} der Anteil der metallisierten Fläche bei der Reflexionsmessung. Idealer Weise wird die Reflexion der gesamten Fläche aufgenommen, dies konnte realisiert werden, indem die Zelle unter einer Ulbrichtkugel verfahren wird.

¹⁰Wird die Reflexion ohne Metallisierung gemessen, muss sie um den Anteil der Metallisierten Fläche bei der SR-Messung skaliert werden, um die IQE zu berechnen.

Kapitel 2

Prozessoptimierung

In diesem Kapitel wird die Optimierung des Herstellungsprozess für untexturierte Industriesolarzellen beschrieben, der als Standard am Lehrstuhl von Prof. Bucher (LSB) an der Universität Konstanz etabliert ist. Dabei wird zunächst auf Aspekte zur Gestaltung von Optimierungsexperimenten eingegangen und dann Ergebnisse solcher Experimente vorgestellt.

2.1 Design of Experiment

Die Optimierung eines Solarzellenprozesses ist ein komplexes Problem, das nicht mit wenigen Experimenten zu bewältigen ist. Unter “**Design of Experiment**“ (DOE) versteht man eine Strategie, mit möglichst wenig Aufwand einen komplexen Prozess zu optimieren [37]. Die Grundlagen der Strategie werden im folgenden mit Bezug zu den Besonderheiten beim Solarzellenprozess vorgestellt.

Für eine erfolgreiche Optimierung, sei es für einen Teilprozessschritt oder den Gesamtprozess, ist es unerlässlich zu wissen, was die **Ergebnisgröße** wie z.B. den Füllfaktor oder den Wirkungsgrad beeinflusst. Die Faktoren, die Einfluss auf die Ergebnisgröße haben werden, in **Einflussfaktoren**, die sich steuern lassen, wie etwa die Dauer eines Prozessschrittes, und in **Störfaktoren**, die sich nicht steuern lassen, unterteilt. So ist zum Beispiel der Wirkungsgrad einer multikristallinen Solarzelle stark von der Beschaffenheit des Siliziumwafers abhängig. Zwei Wafer haben meist nur gleiche elektrische Eigenschaften, wenn sie übereinander im Block waren, also “benachbart“ sind. Ist die genaue Position eines Wafers im Ingot unbekannt, wie dies in der Regel der Fall ist, kann die “Position im Ingot“ als Störfaktor für die Ergebnisgröße “Wirkungsgrad“ angesehen werden. Wird gezielt ein Experiment mit Wafern aus der Mitte und dem Randbereich eines Ingots durchgeführt, so ist die “Position im Ingot“ eine Einflussfaktor. Streuung in den Ergebnisgrößen entsteht somit durch Störfaktoren und Schwankung der Einflussfaktoren.

In einem Experiment werden die Einflussfaktoren variiert und die Effekte der jeweiligen Einflussfaktoren und deren Kombinationen auf die Ergebnisgröße quantifiziert. So hat z.B. die Kombination der Einflussfaktoren “Dauer“ und “Temperatur“ beim Feuern der Kontakte einen größeren Einfluss, wenn beide gleichzeitig erhöht werden, als wenn nur ein Faktor erhöht wird. Mit diesen Informationen wird ein Modell aufgestellt anhand dessen die weitere Entwicklung der Ergebnisgröße in Abhängigkeit der Einflussfaktoren vorausgesagt werden kann. Bei zwei Eingangsgrößen, wie z.B. Dauer und Temperatur, und einer betrachteten Ergebnisgröße, wie zum Beispiel dem Wirkungsgrad, ist eine Darstellung in Form einer Ergebnisoberfläche hilfreich. Hierbei wird ein Fit an die Werte der

Ergebnisgröße über die Werte der Einflussfaktoren dargestellt (siehe Abb. 2.1a). Die Lage des Optimums sowie die Entwicklung bei anderen Kombinationen der Einflussfaktoren ist leicht zu erkennen.

Ein wesentliches Problem beim Herstellungsprozess für Industriesolarzellen ist, dass die einzelnen Schritte nicht alle voneinander unabhängig sind. Also kann man sich nicht auf die Betrachtung der Effekte für die jeweiligen Einflussfaktoren beschränken, sondern muss die Effekte berücksichtigen, die aus der Kombination verschiedener Einflussfaktoren entstehen. Von der Theorie her erhält man mit den wenigsten Versuchen einen optimalen Wert, wenn alle oder viele Einflussfaktoren gleichzeitig variiert werden. In der Praxis erfordern solche Experimente jedoch eine große Anzahl von Gruppen und sind somit schwierig durchzuführen.

Durch Kenntnis der physikalischen Vorgänge können Faktoren ausgewählt werden, die man separat optimieren kann. Einige Prozessschritte werden also zunächst unabhängig voneinander optimiert, wie zum Beispiel die Dicke und Absorption der Antireflexschicht sowie Homogenität der Emitterdiffusion. Anschließend müssen sie jedoch aufeinander abgestimmt werden, so zum Beispiel das Feuern der Kontakte auf den jeweiligen Emitter und die Antireflexschicht. Weiterhin kann es hilfreich sein, Computersimulationen durchzuführen, um einen möglichst guten Startwert zu haben.

Neben den Einflussfaktoren können auch Störfaktoren von entscheidender Bedeutung sein. Bei ausreichend großer Stichprobe enthält der Mittelwert die gewünschten Informationen. Werden Mittelwerte betrachtet, ergibt sich die Frage, ob diese signifikant unterschiedlich sind, oder die Unterschiede auch durch die Streuung erklärbar sind. Für den Fall, dass die Stichprobe groß genug ist, dass man die Verteilung durch eine Normalverteilung annähern kann, kann die Signifikanz zum Beispiel mit dem Fisher Test mathematisch beurteilt werden [38]. Dies sei an einem Beispiel veranschaulicht:

Mit einem Parametersatz P_X wird eine Gruppe X prozessiert, der Mittelwert der Ergebnisgröße sei M_X , die Streuung σ_X . Entsprechend wird mit einem Parametersatz P_Y bei einer vergleichbaren Gruppe Y ein Mittelwert M_Y und eine Streuung σ_Y erzielt. Ist die Verteilung der Ergebnisse durch eine Normalverteilung beschreibbar, so spricht man von Signifikanz auf 5% Niveau, dass beide Ergebnisse unterschiedlich sind, wenn die Wahrscheinlichkeit als Ergebnis M_Y zu erzielen kleiner als 5% ist, obwohl der Erwartungswert der Verteilung für die Ergebnisgröße $\eta = M_X$ und die Varianz $\sigma = \sigma_X$ ist. Ist die Ergebnisgröße nicht durch eine geeignete Verteilung, wie z.B. die Normalverteilung, beschreibbar kann kein Erwartungswert und auch keine Wahrscheinlichkeit für ein Ergebnis berechnet werden. Liegen die beiden Mittelwerte M_X und M_Y nahe zusammen, muss entweder die Streuungen klein oder die Stichprobe groß sein. Zu beachten ist auch, dass die Streuung bei beiden Gruppen nicht unbedingt gleich sein muss. So kann es durchaus sein, dass ein Mittelwert M_X außerhalb der 5 % Grenze einer Verteilung mit dem Erwartungswert $\eta = M_Y$ und Varianz $\sigma = \sigma_Y$ ist aber ein Mittelwert M_Y nicht außerhalb der 5 % Grenze einer Verteilung mit dem Erwartungswert $\eta = M_X$ und der Varianz $\sigma = \sigma_X$ (siehe Abb. 2.1b).

Der Fisher Test liefert somit eine Aussage, ob ein Satz Prozessparameter ein besseres Ergebnis liefert als ein Referenzsatz von Prozessparametern. Ist dies der Fall, sollte aber noch die Streuung der Ergebnisgröße berücksichtigt werden. Hat eine kleine Änderung der Eingangsgrößen oder Störfaktoren einen starken Einfluss auf die Ergebnisgröße, sollte dieser Parametersatz nur verwendet werden, wenn diese Eingangsgröße bzw. der Störfaktor leicht zu kontrollieren sind, da sonst die Prozesssicherheit gering ist, also bei kleinen Störungen der Anlagen die Ergebnisse deutlich schlechter werden. Ist ein Parametersatz

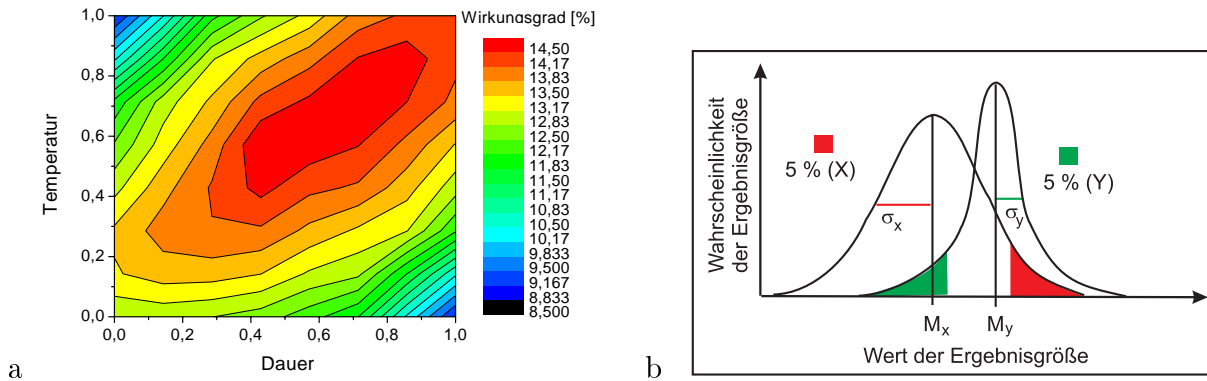


Abbildung 2.1: a) Ergebnisoberfläche, als Beispiel ist hier der Wirkungsgrad über Temperatur und Dauer eines Prozessschrittes dargestellt. b) Beispiel für die Signifikanz eines Ergebnisses, farblich hinterlegt ist jeweils der Bereich, in dem ein Ergebnis mit Wahrscheinlichkeit kleiner 5% liegt. M_X wird bei der Verteilung Y mit weniger als 5% erreicht, M_Y wird bei der Verteilung X aufgrund der größeren Varianz jedoch einer Wahrscheinlichkeit größer als 5% erreicht.

nicht signifikant besser bedeutet dies aber nicht, dass der andere gleichwertig ist. Bei vergleichbarer Streuung sollte natürlich dem Prozess mit dem besseren Mittelwert der Ergebnisgröße der Vorzug gegeben werden.

Bei Betrachtung der Streuung ist wichtig, dass alle Störfaktoren in die Streuung eingehen, damit Effekte der Störfaktoren nicht fälschlicher Weise einer Einflussgröße zugeordnet werden. In dem obigem Beispiel eines Experimentes mit dem Wirkungsgrad als Ergebnisgröße kann man zum Beispiel direkt benachbarte Wafer verwenden, um den Einfluss des Störfaktors "Position im Ingot" und dadurch die Streuung gering zu halten. Hat man zum Beispiel 100 benachbarte Wafer und prozessiert die ersten 50 mit Parametersatz X, die weiteren 50 mit dem Parametersatz Y wird die Streuung gering sein. Allerdings wird man den Einfluss der Materialunterschiede durch die Position im Ingot in den beiden Gruppen fälschlicher Weise den Prozessparametern zuordnen. Besser ist die Gruppen zufällig zu sortieren, also aus den 100 Wafers 50 für Gruppe X auszulosen und die verbleibenden für Gruppe Y zu verwenden. Die Streuung der beiden Gruppen ist nun jeweils größer, aber der Einfluss des Störfaktors "Position im Ingot" geht nur in die Streuung ein und kann nicht eine Tendenz vortäuschen. Manchmal kann es auch sinnvoll sein, die Gruppen nicht auszulosen, sondern zu sortieren. Zum Beispiel kann aus den 100 Wafers zwei "benachbarte Gruppen" sortieren werden, d.h. Wafer Nr. 1,3,5,7 usw. für Gruppe X und Wafer Nr. 2,4,6,8 usw. für Gruppe Y. Damit lässt sich der Einfluss des Störfaktors "Position im Ingot" sichtbar machen, wenn die Ergebnisgröße über die Nummer aufgetragen wird. Natürlich muss dabei sichergestellt werden, dass nicht eine andere Störfaktoren den Effekt in gleicher Weise beeinflusst, wie etwa die Reihenfolge, in der die Wafer den Prozess durchlaufen. Ist diese gleich der Nummerierung kann es leicht zu einer Fehlinterpretation kommen, wenn man den Effekt eines Störfaktors quantifizieren will. Durch die Sortierung in benachbarte Gruppen lassen sich auch gut Experimente mit nicht benachbarten Wafers durchführen, da bei Betrachtung der Ergebnisgröße der Einfluss des Störfaktors über die Nummer bekannt ist. Will man zum Beispiel 10 unterschiedliche Feuerparameter vergleichen und benötigt mindestens 5 Wafer pro Parameter, kann man statt 50 benachbarte Wafer auch 10 mal 5 benachbarte Wafer verwenden. So kann man dann zwar nicht unbedingt absolute Mittelwerte vergleichen, sondern in den 10 Gruppen jeweils den Ersten der Gruppen und jeweils den Zweiten usw.

Experimente werden um so unübersichtlicher, je mehr Proben und Parameter sie enthalten. Um einen Trend zu sehen und unter der Erwartung, dass sich die Ergebnisgröße mit den Einflussfaktoren stark ändert, ist es unter Umständen gut, die Anzahl der Parameter hoch und die Anzahl der Proben pro Parameter niedrig zu halten. Erwartet man, dass die Ergebnisgröße sich wenig mit den Einflussfaktoren ändert, muss die Anzahl pro Parameter hoch sein, damit der Effekt nicht durch Streuung überdeckt wird. In der Regel ist es somit sinnvoll, zunächst einen Trend festzustellen und dann genauer den Effekt im wichtigen Bereich zu untersuchen. Was "viele" oder "wenige" Proben sind, hängt entscheidend von der Experimentumgebung ab. So ist für den Labormassstab vielleicht 2 Proben pro Parameter für einen Trend und 25 pro Parameter für die Feinabstimmung ausreichend. In einer Produktionslinie mit einem Durchsatz von 1000 Zellen je Stunde sollten Experimente mit 1000 oder mehr Proben pro Parameter durchgeführt werden, bevor ein neuer Satz von Parameter als Standard festgesetzt wird.

2.2 Optimierung des Standardprozesses

2.2.1 Defektätzen

Im Standardprozess wird der Sägeschaden in einer wässrigen NaOH-Lösung abgeätzt (siehe Gleichung 2.1). Alternativ kann auch KOH verwendet werden [39].



Diese alkalischen Lösungen ätzen das Silizium anisotrop, die 111 Richtung wird bis zu einem Faktor 100 langsamer geätzt als die 100 Richtung [40]. Bei monokristallinem Silizium mit 100 Orientierung entstehen bei der Ätzung mit NaOH-Lösung unter Zugabe von Isopropanol Zufallspyramiden und somit eine sehr effektive Oberflächentextur [41]. Als Alternative zu dieser Texturätze kann auch Na_2CO_3 verwendet werden [42].

Bei multikristallinen Siliziumwafern variiert die Oberflächenbeschaffenheit nach dem alkalischen Ätzen somit mit der Kornorientierung, wie in der Elektronenmikroskopaufnahme in Abb. 2.2a deutlich zu sehen ist. Durch die unterschiedliche Ätzrate entstehen Stufen, welche zu Problemen wie Fingerunterbrechungen und Ausschmieren beim Siebdruck führen können. Die Ätzrate ist jedoch nicht nur von der Kristallorientierung abhängig, sondern auch von der Beschaffenheit des Kristalls. So wird die stark geschädigte Oberflächenschicht schneller, ein defektfreier Kristall derselben Orientierung.

Um eine ausreichende Ätztiefe zu bestimmen, wurden aus unterschiedlich lang geätzten multikristallinen Wafern Solarzellen hergestellt und die Leerlaufspannung V_{oc} als Maß für die Rekombination betrachtet. Abb. 2.2b zeigt den Einfluss der Ätzdauer auf die Leerlaufspannung. Es ist ersichtlich, dass 500 s als Ätzdauer ausreichend sind. Eine weitere Verlängerung hat eine unwesentlichen Steigerung in V_{oc} zur Folge, verstärkt aber die Probleme beim Siebdruck.

Alternativ zu alkalischen Lösungen kann auch eine saure Ätzlösung basierend auf HF, HNO_3 und CH_3COOH [43], verwendet werden, die ein isotropes Ätzverhalten aufweist. Im Gegensatz zu dem alkalischen Verfahren wird hierbei nicht das Silizium direkt geätzt, sondern zunächst oxidiert und dann das Oxid geätzt. Bei einem Mischungsverhältnis von 1:43:7 wird eine glatte Oberfläche erreicht (Politurätze). Bei einem anderem Mischungsverhältnis und durch Zugabe von Additiven kann aber auch eine texturierte Oberfläche

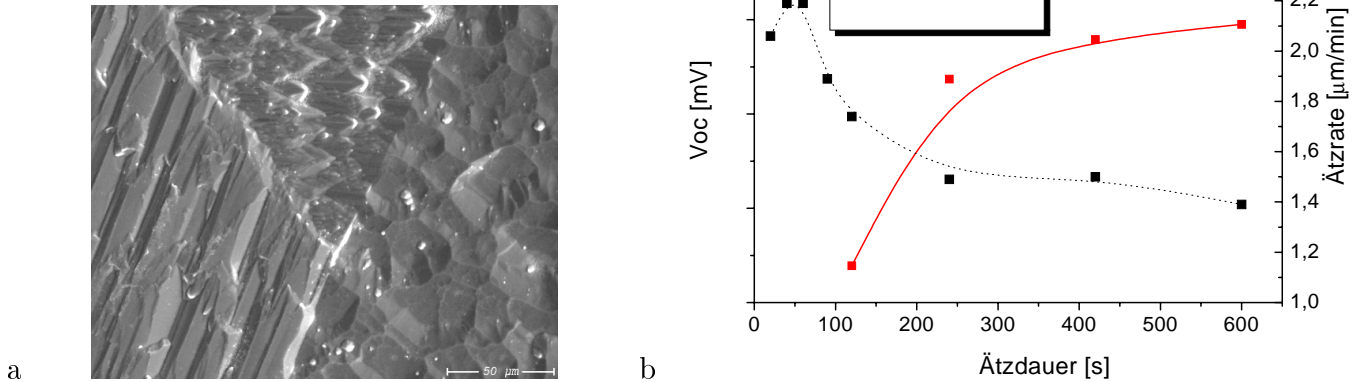


Abbildung 2.2: a) Alkalisch geätzte Oberfläche eines multikristallinen Si Wafers. Deutlich ist das anisotrope Ätzverhalten und die Korngrenzen zu erkennen. b) Leerlaufspannung V_{oc} bei unterschiedlicher Ätzdauer unter konstanter Temperatur, man sieht ab ca. 500s eine Sättigung.

erzeugt werden. Dabei wird die durch Sägen stark geschädigte Schicht ausgenutzt, um unterschiedliche Ätzraten an verschiedenen Stellen zu erreichen. Dieser Effekt ist unabhängig von der Kristallorientierung, wohl aber können es z. B. an Korngrenzen zu schnelleren Ätzraten auftreten [44].

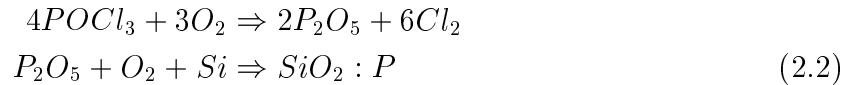
2.2.2 Reinigung

Für Hochleistungssolarzellen wird eine aufwendige Reinigung vor den Hochtemperaturschritten durchgeführt, um insbesondere metallische Verunreinigungen von der Waferoberfläche zu entfernen. Zu Beginn der Arbeit wurde vor der Diffusion eine sog. IMEC Reinigung durchgeführt [45]. Dabei werden die Wafer in einem heißem Gemisch aus Wasserstoffperoxid und Schwefelsäure oxidiert und Metalle gelöst, anschließend in DI-Wasser gespült und dann das Oxid in Flusssäure abgeätzt. Für die hier untersuchten Industriesolarzellen ist dies nicht nötig und auch industriell schwer zu realisieren. Der Defektätzschritt ist hier Bestandteil der Reinigung, da mit dem Entfernen der geschädigten Oberfläche auch Verunreinigungen, wie z. B. vorhandene Rückstände des Drahtsägeprozesses beseitigt werden. Es folgt ein Spülschritt in DI-Wasser und anschließend ein HCl-Reinigungsschritt um metallische Verunreinigungen zu entfernen. Darauf ein weitere Spülschritt und ein HF-Dip, um weitere Metalle und das Oxid von der Waferoberfläche abzuätzen. Ein Oxid auf dem Wafer ist an sich nicht störend bei dem folgenden Prozessschritt. Da es weitere Verunreinigungen enthalten kann, ist ein Abätzen der Oxidschicht jedoch sinnvoll. Es ist eine offene Frage, ob wirklich beide Säureschritte erforderlich sind. Ein Experiment würde Aufschluss geben, jedoch besteht die Gefahr einer Kontamination des Diffusionsrohres, falls die Reinigung notwendig wäre. Eine industriell relevante Aussage ist nur beim Test von sehr vielen Zellen (>100.000) erreichbar. Versuche auf Laborebene bei IMEC¹ ergaben gute Ergebnisse mit einer HF-freien Reinigung [46]. Eine alternative Reinigung kann mittels HF und im Wasser gelösten Ozon vorgenommen werden [47].

¹Interuniversity Microelectronic Centre (Leuven, Belgien), eines der führenden Forschungsinstitute für Industriesolarzellen.

2.2.3 Diffusion

Der Emitter der Solarzelle wird bei Bor-dotiertem Basismaterial durch Phosphordiffusion erzeugt. Bei der in dieser Arbeit verwendeten Diffusion wird Stickstoff als Trägergas durch einen mit flüssigem POCl_3 gefüllten Behälter, welcher "Bubbler" genannt wird, in ein halboffenes, auf 800 °C bis 900 °C heißes, Rohr geleitet [48]. Unter Zugabe von Sauerstoff findet folgende Reaktion statt:



Als Diffusionsquelle dient demnach nicht das POCl_3 , sondern das mit Phosphor angereicherte SiO_2 . In der Industrie sind Emitter mit Schichtwiderständen zwischen 30 Ω/\square und 50 Ω/\square üblich, um gute Kontaktwiderstände mit Siebdruckmetallisierung zu erreichen. Hier wurde zunächst überwiegend ein Emitter mit einem spezifischen Schichtwiderstand von 30-35 Ω/\square später 45 Ω/sq oder 55 Ω/sq verwendet.

Der Diffusionsschritt kann in vier Phasen unterteilt werden:

- Aufheizen
- Belegung (POCl_3 wird über das Trägergas N_2 durch das Rohr geleitet, die Oberfläche des Wafers wird mit Phosphorsilikatglas "belegt")
- Drive in (Phosphor diffundiert von der Oberfläche weiter in den Wafer hinein)
- Abkühlen

Es können jeweils die Temperatur und Dauer der Prozessschritte, die Rampen beim Aufheizen und Abkühlen, sowie die Gasflüsse einzeln variiert werden. Bei der Optimierung müssen zwei Randbedingungen eingehalten werden, damit die Diffusion industriell angewendet werden kann: Die Gesamtzeit (incl. Hochheizen und Abkühlen) sollte nicht länger als eine Stunde dauern und möglichst viele Wafer sollten homogen diffundiert sein (für POCl_3 in Laboröfen etwa 50, in Industrieöfen bis zu 400). Für den Wirkungsgrad der Zelle kann es günstig sein, den Wafer möglichst schnell abzukühlen [49] [50]. Beim Rohrofen ist die maximale Abkühlrate durch die maximal verträgliche Temperaturrampe des Paddles, welches das Boot mit den Wafern transportiert, vorgegeben [51]. Desweiteren ist zu beachten, dass bei zu schnellem Abkühlen die Wafer eher brechen. Bei der hier beschriebenen Diffusion aus der Gasphase werden beide Seiten eines Wafers diffundiert. Da dies nicht erforderlich ist können jeweils zwei Wafer mit der Rückseite aneinander diffundiert werden und dadurch die Ofenkapazität verdoppelt werden.

Um einen Startpunkt für die Optimierung zu bekommen, wurden Computersimulationen mit Tessim aus dem DESSIS-Paket [52] durchgeführt. Als Beispiel sind drei einfache Profile in Abb. 2.3 dargestellt, wobei die Zeiten konstant gehalten werden und lediglich die Belegungstemperatur (Temperatur während variiert wurde. Man sieht, dass die aktive Phosphorkonzentration an der Oberfläche sowie die Plateautiefe direkt nach der Oberfläche mit steigender Temperatur leicht zunimmt.

Zwei verschiedene Emitter mit jeweils 30 Ω/\square wurden verglichen, wobei der Emitter der Gruppe A tiefer eingetrieben wurde als der der Gruppe B. Aus diesen Gruppen benachbarter multikristalliner Wafer wurden Zellen mit und ohne PECVD SiN_x und Al-BSF

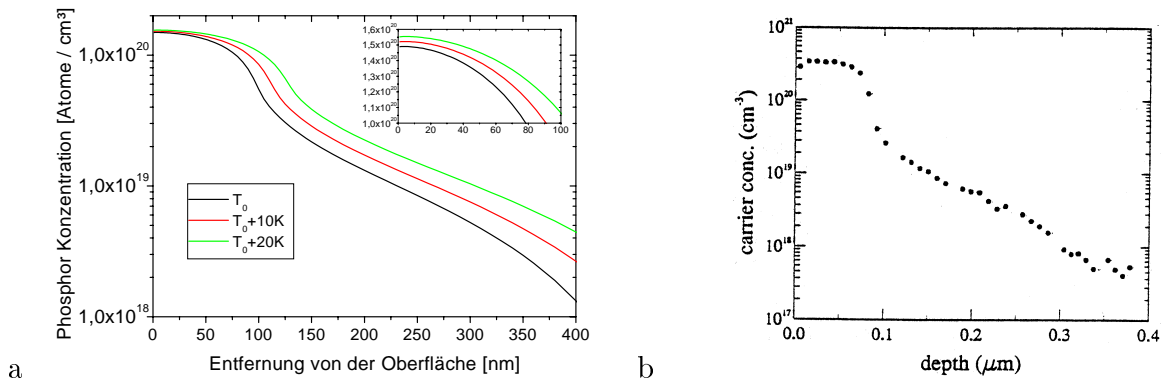


Abbildung 2.3: a) Simulierte Emitterprofile für POCl_3 -Diffusion. Die Zeiten wurden konstant gehalten und die Belegungstemperatur variiert. b) Mittels Stripping Hall gemessenes Emitterprofil. [49]

hergestellt. Für beide Emitter konnten nach Optimierung vergleichbare Füllfaktoren erreicht werden. In Abb. 2.4a ist die Leerlaufspannung über die Kurzschlussstromdichte aufgetragen. Man sieht, dass die Zellen mit dem tiefer eingetriebenen Emitter eine niedrigere Leerlaufspannung, aber zumindest beim Prozess ohne PECVD SiN_x und Al-BSF einen höheren Kurzschlussstrom aufweisen, wodurch für den Prozess ohne PECVD SiN_x und BSF höhere Leistungen erreicht werden können (siehe Abb. 2.4b). Unter Verwendung eines PECVD Durchfeuerprozesses zeigt der tiefere Emitter der Gruppe A immer noch eine schlechtere Leerlaufspannung, aber keinen besseren Strom, was dazu führt, dass höhere Leistungen bei dem flacheren Emitter der Gruppe B erreicht werden können. Die Unterschiede ohne PECVD SiN_x sind auf 5% Niveau signifikant, mit PECVD SiN_x kann man zwar die Unterschiede in der Leerlaufspannung als eindeutig interpretieren, allerdings aufgrund der geringen Anzahl der Proben keine statistisch fundierte Aussage treffen.

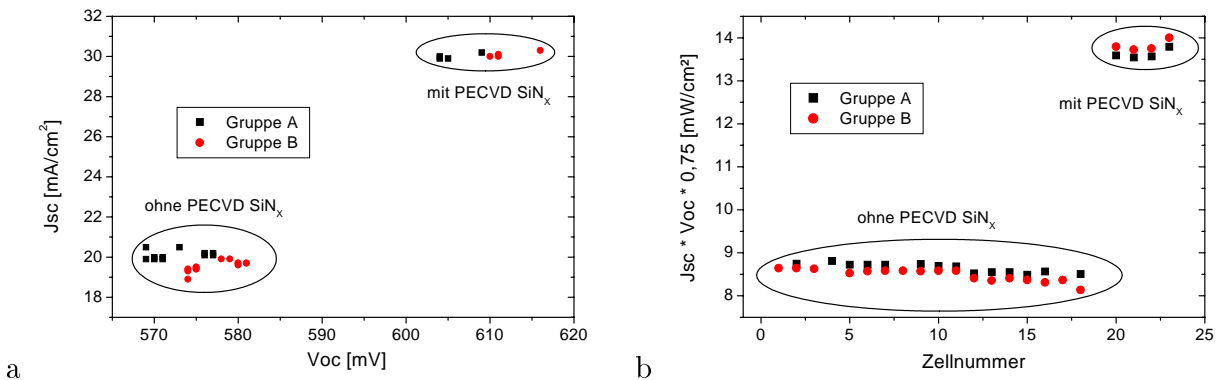


Abbildung 2.4: a) Leerlaufspannung und Kurzschlussstromdichte von Zellen mit verschiedenen Emittoren mit einem Schichtwiderstand von $30 \Omega/\square$. Der Emitter Gruppe A ist tiefer diffundiert, als der der Gruppe B. b) Errechnete Leistung der Zellen mit verschiedenen Emittoren unter Annahme eines Füllfaktors von 75%.

2.2.4 Isolation

Bei der Gasphasendiffusion über POCl_3 wird sowohl auf der Frontseite, als auch auf der Rückseite und dem Randbereich eine dotierte Schicht erzeugt. Im Falle des hier angewandten Prozesses wird die n-Dotierung auf der Rückseite durch den Al-Rückkontakt

überkompensiert. Jedoch wird dabei in der Regel kein sperrender Übergang erzeugt. An der Universität Konstanz wird jedoch an einem Prozess gearbeitet, einen sperrenden Übergang zu erzeugen [53]. Im Standardprozess müssen jedoch Front und Rückseite elektrisch voneinander isoliert werden. Das kann vermieden werden, indem vor der Diffusion eine Diffusionsbarriere mittels Siebdruck aufgebracht wird und somit eine leitende Verbindung zwischen Front- und Rückseite vermieden wird. Dieses Verfahren wird insbesondere bei Rückkontaktsolarzellen angewendet [54]. Alternativ dazu muss diese Verbindung nachträglich unterbrochen werden. Dazu wird industriell oft Plasmaätzen verwendet: Die Wafer werden aufeinander gestapelt und der Emitter an der Kante mittels Plasmaanregung reaktiver Gase abgeätzt. So können hohe Shuntwiderstände erreicht werden, allerdings wird auch ein Teil der Emitteroberfläche am Randbereich der Zelle mit abgeätzt. Eine andere Möglichkeit besteht darin, einen kleinen Randbereich mit einer Wafersäge oder einem Laser vollständig abzutrennen oder durch einen Schnitt in die Rückseite zwischen Rand und Rückseitenkontakt den Emitter zu unterbrechen. Dies wurde näher untersucht:

Nach der Diffusion wurden die Zellen in zwei benachbarte Gruppen sortiert. Gruppe P für Plasmaätzen, Gruppe D (Dicing) für Kantenschneiden. Plasmaätzen wurde vor der SiN Abscheidung, Kantenschneiden nach der SiN Abscheidung vorgenommen. Beide Gruppen wurden in derselben PECVD SiN_x-Abscheidung beschichtet. Zum Drucken, Trocknen und Feuern wurden die Zellen wieder gemischt, so dass eine Drift bei diesen Prozessschritten in beiden Gruppen als Streuung auftritt. Um auszuschließen, dass beim Verschalten im Modul der unterbrochene Emitter auf der Rückseite durch das Tabbings wieder überbrückt wird, wurden aus jeder Gruppe ein Modul gefertigt (siehe Tabelle 2.1).

Die Zellen der Gruppe D (Kantenschneiden) haben einen leicht besseren Füllfaktor, was jedoch nicht signifikant ist und Streuung sein kann. Weiterhin weisen die Zellen der Gruppe D einen signifikant besseren Strom auf. Bei der Leerlaufspannung gibt es keine signifikanten Unterschiede. Die Abbildung 2.5 zeigt die Leerlaufspannung über den Kurzschlussstrom und veranschaulicht somit die Qualität und Streuung der Zellen ohne Berücksichtigung des Füllfaktors. Man sieht deutlich den höheren Kurzschlussstrom als Grund für den höheren Wirkungsgrad der Zellen der Gruppe D (Kantenschneiden) im Vergleich zur Gruppe P (Plasmaätzen). Beim Plasmaätzen ätzt das Plasma nicht nur die Zellkante, sondern auch etwas von der Oberfläche des Zellrandes. Dabei wird der Emitter teilweise

Tabelle 2.1: Daten auf Zell- und Modulebene von Zellen, bei denen die Isolation durch Kantenschneiden (Gr. D) und Plasmaätzen (Gr. P) vorgenommen wurde. Der Füllfaktor ist auf Zellebene mit nur zwei Messspitzen je Busbar gemessen und schliesst somit den Serienwiderstand im Busbar mit ein. Um die Zellen im Wirkungsgrad vergleichen zu können ist deshalb ein errechneter Wirkungsgrad bei einem Füllfaktor von 75 % angegeben. Dass dies realistisch ist, zeigt sich in den Modulen, da hier der Füllfaktor nicht geringer als auf Zellebene ist, was aufgrund des Serienwiderstands des Tabbings zu erwarten wäre.

	FF [%]	Jsc [mA/cm ²]	Voc [mV]	η [%]	η bei FF=75% [%]
Mittelwert D	73,1±0,6	31,5±0,1	611±0,6	14,1±0,2	14,4
Mittelwert Gruppe P	72,8±0,7	31,1±0,2	611±0,7	13,8±0,2	14,2
Differenz Zellen D-P	0,3	0,4	-0,1	0,2	0,2
Modul Dicing	72,9	33,4	612	14,9	
Modul Plasma	72,9	32,8	612	14,7	
Differenz Modul D-P	0,0	0,6	0,0	0,2	

entfernt, teilweise geschädigt, so dass weniger Ladungsträger eingesammelt werden. Dies ist der Grund für den höheren Strom der Zelle aus Gruppe D und gut anhand von LBIC Aufnahmen zu sehen (siehe Abb. 2.6). Während bei der plasmageätzten Zelle der Randbereich deutlich schlechter ist, ist er bei der gesägten Zelle sogar besser. Da der rückseitige Emitter am Rand mit dem an der Vorderseite elektrisch verbunden ist können Ladungsträger, die in der Nähe der Rückseite erzeugt werden, auch vom rückseitigen Emitter eingesammelt werden.

Nach vollständigem Absägen des Randes hatten Zellen aus der Gruppe P vergleichbare Werte mit denen aus der Gruppe D. Angenommen, das Plasma ätzt 0,3 mm in die Zelloberfläche, so ergibt sich bei 40 cm Kantenlänge eine Fläche von 1,2 cm² was 1,2 % der Zellfläche entspricht. Dies ist die Größenordnung des höheren Stromes der Zellen aus Gruppe D. Bei 12,5 x 12,5 cm² großen Zellen ist der Effekt mit 1 % der Zellfläche etwas kleiner. (50 cm Kantenlänge, abgeätzte Fläche von 1,5 cm².) Ein ausführlicherer Vergleich verschiedener Methoden der Isolation findet sich in [55].

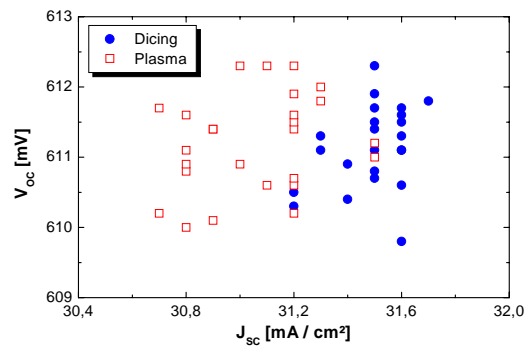


Abbildung 2.5: Kurzschlussstrom über Leerlaufspannung von Solarzellen, bei denen der parasitäre pn-Übergang durch Hereinsägen in die Rückseite (Gr. D) bzw. Plasmaätzen (Gr. P) getrennt wurde.

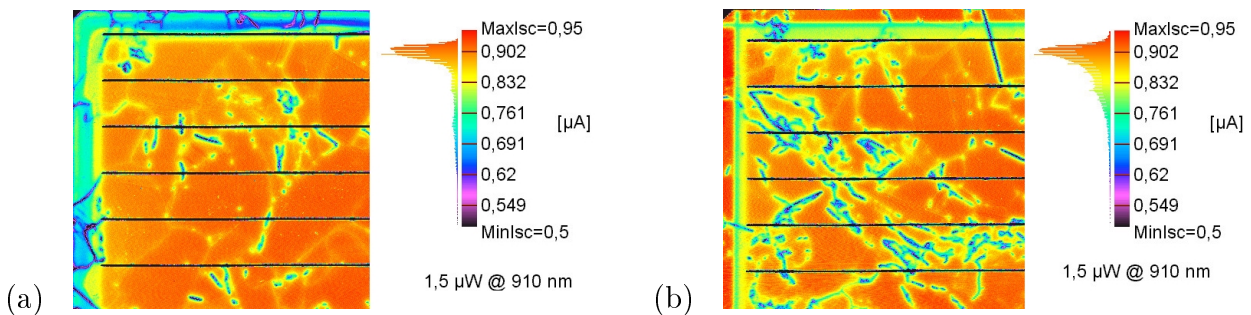


Abbildung 2.6: LBIC Aufnahme vom Rand jeweils einer Solarzelle mit a) Isolation durch Plasmaätzen. b) Isolation durch Kantenschneiden. Man sieht deutlich den schlechteren Bereich am Rand der plasmageätzten Zelle, wo ein Teil des Emitters mit abgeätzt wurde.

2.2.5 Antireflexionsbeschichtung (ARC)

In der Industrie wird bei einigen Unternehmen noch TiO₂ als ARC eingesetzt, jedoch setzt sich für multikristallines Silizium mehr und mehr PECVD SiN_x durch. Eine PECVD SiN_x Schicht enthält Wasserstoff aufgrund der Herstellung:



Die verwendete Schicht muss nicht notwendiger Weise das stöchiometrische Verhältnis 3:4 haben, deshalb wird sie meist mit SiN_x bezeichnet. Die Abscheidetemperatur ist in einem Bereich, in dem der Wasserstoff nicht aus der Schicht diffundiert. Bei einem nachfolgenden Hochtemperaturschritt, wie dem Feuern der Kontakte (siehe Kap. 2.2.6), diffundiert der Wasserstoff jedoch in den Wafer und dient somit zur Volumen- und Oberflächenpassivierung [56] [57] [58]. Kriterium zur Optimierung sind somit nicht nur die optischen Eigenschaften, wie Brechungsindex, Dicke und Absorption, sondern auch die Passivierungseigenschaften der Schicht. Dies hat zur Folge, dass die optimale SiN_x -Schicht einen Brechungsindex von $n=2-2,1$ und nicht $n=2,3$ aufweist, wie es rein für die Reduktion der Reflexion optimal wäre [59] [7] [60].

Weiterhin hat die Beschaffenheit der Waferoberfläche und die Feuertemperatur einen Einfluss auf die Adhäsion der Schicht auf dem Wafer. Bei ungünstigen Abscheideparametern oder Verunreinigung auf der Zellfläche können beim Feuern kleine ($\varnothing < 10\mu\text{m}$) Bereiche der Schicht abplatzen, was auch als "Peeling" oder "Blistering" bezeichnet wird [61] [62]. Die Schicht erscheint dann nicht blau, sondern silbrig schimmernd.

Um den Einfluss der SiN_x -Schichtdicke auf den Kurzschlussstrom quantifizieren zu können, wurden anhand von Reflexionsmessungen und einer typischen IQE die entsprechenden Kurzschlussstromdichten errechnet. Der erste Wafer ist deutlich zu dünn beschichtet (Farbeindruck: Lila), ein weiterer deutlich zu dick (Farbeindruck: Hellblau) und ein Dritter weist die Solldicke auf (Farbeindruck: Dunkelblau). Abb. 2.7 zeigt Reflexionskurven der Wafer und die damit errechnete Kurzschlussstromdichten auf Zellebene, im Modul verringert sich der Unterschied deutlich.

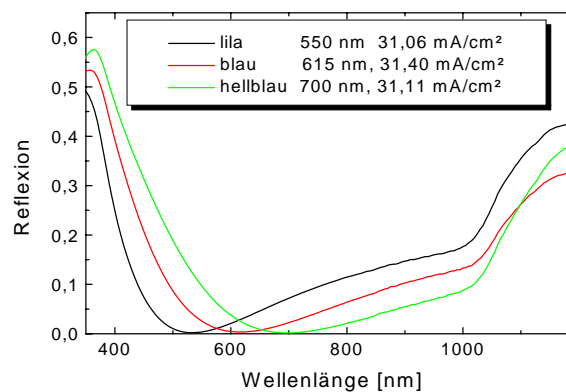


Abbildung 2.7: Reflexionskurven von Wafern mit unterschiedlich dicker SiN_x Schicht. Angegeben ist jeweils das Reflexionsminimum und die errechnete Kurzschlussstromdichte.

2.2.6 Metallisierung durch Siebdruck

Ein Großteil der industriell gefertigten Solarzellen werden mittels Siebdruck metallisiert. Das Prinzip ist in Abb. 2.8 dargestellt. Das Drahtgeflecht des Siebes, auch Gewebe genannt (siehe Abb. B.1), wird mit einer Emulsion beschichtet, in die Öffnungen in der Form des gewünschten Druckmusters eingebracht werden. Ein Raket presst die Siebdruckpaste durch diese Öffnungen und somit erhält man das Abbild der Öffnungen auf dem Substrat. Die Paste wird nach dem Drucken getrocknet und schließlich bei hohen Temperaturen eingebrannt. Dieser Einbrennschritt wird "Feuern" genannt und dient der Erzeugung des mechanischen und elektrischen Kontaktes zwischen Kontaktfinger und Wafer. Hierbei

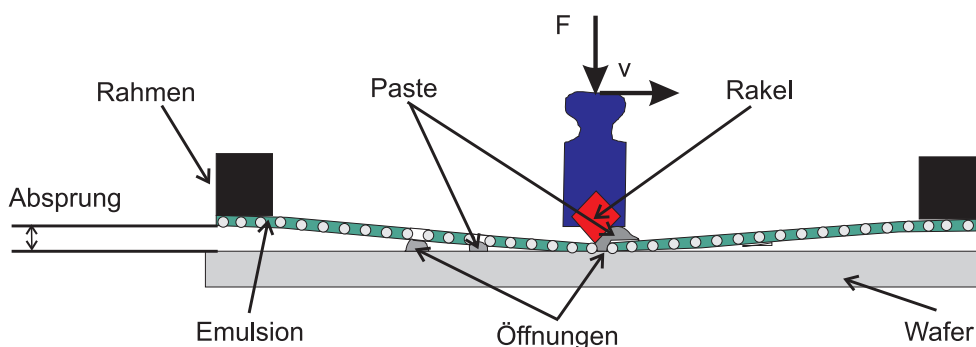


Abbildung 2.8: Schematische Darstellung des Siebdrucks [63].

kann auch eine dielektrische Antireflexschicht, wie z.B. SiN_x oder TiO_2 durchdrungen werden, man spricht dann von einem “Durchfeuerprozess“. Während für die Frontseite auf Silber basierende Pasten üblich sind, verwendet man für die Rückseite Pasten auf Aluminiumbasis, weil Aluminium mit Silizium ein Eutektikum bildet und somit an der Rückseite eine stark Al-dotierte Schicht, das BSF, entsteht. Für die Herstellung eines Modules ist es nötig, die Zellen untereinander zu verschalten, was durch Verlöten mit einem verzinneten Kupferband (Tabbing oder Verbinder genannt) geschieht. Da auf Aluminium nicht gelötet werden kann, werden auf der Rückseite Streifen oder Pads mit Silber-Aluminium Paste gedruckt, auf denen der Verbinder aufgelötet wird.

Fingergrid

Für die Optimierung des Fingergrids sind die Abschattung sowie der Lateralwiderstand der Finger und des Busbars, der Widerstand im Emitter und der Kontaktwiderstand zu betrachten. Werden aus den Zellen Module gefertigt, ist es zudem noch nötig, die Anforderungen für das Auflöten des Tabblings zu berücksichtigen. In den folgenden Berechnungen ist die Breite und der spezifische Widerstand des Busbars dem des verwendeten Tabblings angepasst. Wird die Zelle ohne Tabbing gemessen treten somit erhöhte Widerstandsverluste auf, die aber im Modul durch das Tabbing wieder ausgeglichen werden. Für verschiedene Fingerabstände wurde unter Berücksichtigung der Abschattung und der Widerstandsbeiträge der Finger, des Kontaktes und des Emitters auf Basis des Zwei-Dioden-Modells der Wirkungsgrad berechnet [65].

In Tabelle 2.2 sind die hier gemachten Annahmen, welche für eine gute Industriesolarzelle mit PECVD SiN_x und BSF typisch sind, aufgelistet. Der Kurzschlussstrom ist ohne Berücksichtigung der Abschattung angegeben, da die Abschattung variiert wird. Die Ergebnisse der Simulation sind in Abb. 2.9 dargestellt.

Der Fingerabstand hat im Bereich 2-3 mm wenig Einfluss auf den Wirkungsgrad. Voraussetzung hierfür ist allerdings ein guter Siebdruck, d.h. schmale (z.B. $120 \mu\text{m}$) und hohe Finger. Je breiter die Finger, desto stärker fällt der Wirkungsgrad bei geringem Fingerabstand ab. (Für weitere Aspekte bei der Optimierung des Fingerabstandes siehe Kapitel 6.2.1)

Tabelle 2.2: Parameter einer guten Industriesolarzelle, die für die in dieser Arbeit durchgeführten Simulationsrechnungen angenommen werden.

Fläche [cm ²]	156 cm ²
Jsc [mA/cm ²]	34,0
Rsh [Ohmcm ²]	5000
J ₀₁ [10 ⁻⁸ A/cm ²]	1
n ₁	1
J ₀₂ [10 ⁻⁸ A/cm ²]	2
n ₂	2
Busbarbreite [mm]	1,5
Spez. Widerstand Busbar [$\mu\Omega\text{cm}$]	0,15
Fingerbreite [μm]	120
Spez. Widerstand Finger [$\mu\Omega\text{cm}$]	3,5
Höhe von Finger und Busbar ² [μm]	5
Spez. Kontaktwiderstand [$\mu\Omega\text{cm}^2$]	5

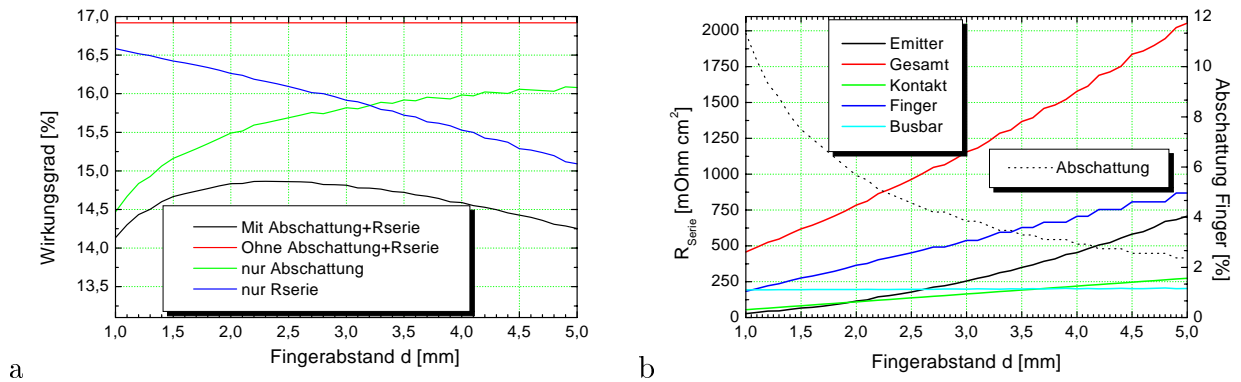


Abbildung 2.9: a) Einfluss des Serienwiderstandes und Abschattung auf den Wirkungsgrad. b) Beiträge von Finger-, Busbar-, Emitter- und Kontaktwiderstand zum Serienwiderstand einer Industriesolarzelle. Der Busbar bewirkt in diesem Falle eine konstante Abschattung von etwa 2,5%.

Optimierung des Frontseitendrucks

Die Qualität des Drucks wird zum einen durch das Gewebe und die Beschichtung des verwendeten Siebes³ und die Druckparameter Rakeldruck, Rakelgeschwindigkeit sowie Absprung, zum anderen durch die Paste bestimmt. Da die Viskosität der Paste sich stark mit der Temperatur ändert, ist es wichtig, beim Drucken immer dieselbe Temperatur zu haben. Desweiteren wird die Pastenviskosität durch Scherkräfte beeinflusst, was bewirkt, dass der erste Druck sich meist von den folgenden unterscheidet. Dies ist insbesondere in der Produktion der Fall, wo das Rakel ständig in Bewegung ist. Um einen Durchsatz von ca. 1200 Zellen/h zu erreichen, muss die Rakelgeschwindigkeit in der Größenordnung 100 mm/s liegen. Für das Ausschmieren der Finger nach dem Druck ist die Oberfläche des Wafers von besonderer Bedeutung. Zum einen beeinflusst die Materialoberfläche die Benetzung, zum anderen kann die Oberflächenstruktur das Verlaufen der

³Als Alternative zum Sieb kann auch eine Schablone verwendet werden [64].

³Die maximale Fingerhöhe ist größer, als hier angenommen, allerdings wird im Programm auch von einem rechteckigem Profil ausgegangen, welches real nicht erreicht wird.

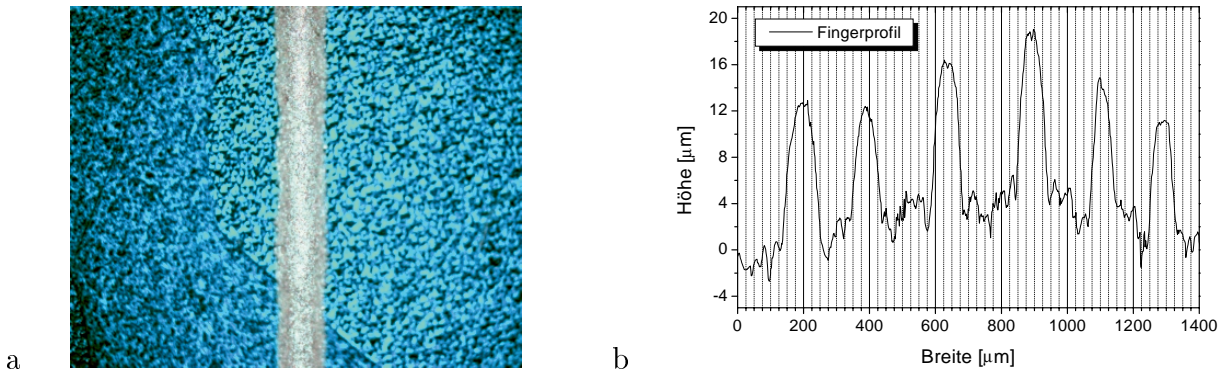


Abbildung 2.10: a) Mikroskopaufnahme und b) Höhenprofile von Siebdruckfingern auf einer Teststruktur. Die maximale Höhe ist $12\ \mu\text{m}$ bei einer Fingerbreite von etwa $110\ \mu\text{m}$.

Finger nach dem Druck fördern oder hemmen. In Abb. 2.10 ist eine Mikroskop- sowie Profilaufnahme eines Fingers zu sehen, wie er nach Anpassung der Parameter erreicht werden konnte.

Trocken- und Feuerparameter

Nach dem Druck muss die Paste zunächst getrocknet werden, so dass die Lösungsmittel verdampfen. Für den Frontkontakt kann leicht überprüft werden, ob ausreichend getrocknet wurde, indem ein Klebestreifen auf den Kontakt geklebt und wieder abgelöst wird. Die Paste ist dann ausreichend getrocknet, wenn sie am Wafer und nicht am Klebestreifen haften. Alternativ kann auch mit einem spitzen Gegenstand in die Paste gedrückt und geprüft werden, ob noch Feuchtigkeit enthalten ist.

Das Feuern kann in zwei Phasen unterteilt werden: In der ersten Phase (Burn Out Phase) werden die organischen Bestandteile der Paste verbrannt, in der zweiten Phase wird der Kontakt gebildet (Feuern) (siehe Abb. 2.11). Üblich ist das Feuern in einem Durchlaufofen, wobei Bandgeschwindigkeit und Temperatur in verschiedenen Zonen variiert werden kann [66]. Über die Bandgeschwindigkeit kann die Aufheizrampe des Wafers eingestellt und die Länge der Phasen beeinflusst werden. Über die Temperatur der Zonen kann das Profil genauer geregelt werden, also Plateau und Spitzentemperatur, sowie auch Plateaulänge. Nicht etabliert, aber auch möglich ist das Feuern der Kontakte in einem Rapid Thermal Processing- (RTP) Ofen [67].

Die Feuerparameter können am leichtesten anhand des Füllfaktors optimiert werden, da hier sowohl die Widerstandsbeiträge als auch Rekombinationen eingehen. Je höher die Spitzentemperatur ist, desto tiefer ist in der Regel das BSF, was eine hohe Leerlaufspannung erzeugt. Die optimalen Feuerparameter werden in erster Linie durch den Frontseitenkontakt bestimmt, sind aber nicht von der Rückseitenpaste unabhängig. Durch die Reaktion des Aluminiums und der Fritte der Rückseitenpaste wird die Temperatur des Wafers beeinflusst und somit kann man nicht unmittelbar davon ausgehen, dass zwei Wafer, die mit unterschiedlichen Pasten bedruckt sind, das selbe Temperaturprofil erfahren, wenn sie bei den selben Bedingungen in einem einen Durchlaufofen prozessiert werden. Natürlich hat auch die Waferdicke einen Einfluss auf die Temperatur des Wafers, je dünner der Wafer, desto schneller heizt er sich im Ofen auf. Weiterhin beeinflusst der Gürtel des Ofens und der Frontseitenkontakt lokal die Temperatur des Wafers. Ebenfalls kann die Farbe des Rückkontaktes Aufschluss über die richtigen Feuerbedingungen geben. Ist sie

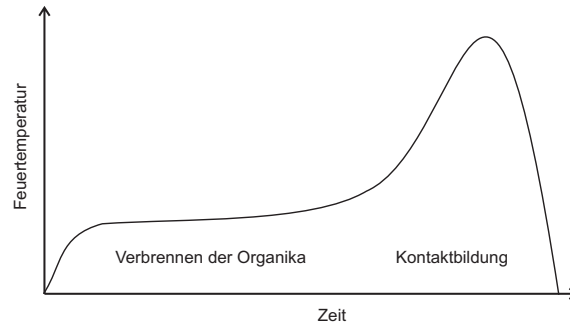


Abbildung 2.11: Typisches Feuerprofil; Während der ersten Phase werden die organischen Bestandteile der Paste verbrannt, während der Peak-Phase der Kontakt gebildet

sehr hellgrau, ist der Wafer zu wenig gefeuert, und die Spitzentemperatur muss erhöht oder die Zeit verringert werden. Ist die Farbe eher bräunlich, ist die Zelle überfeuert (siehe Abb. 2.12).

Voc [mV]	597	603	603	605	603	604	602	604	581
FF [%]	45,4	76,7	77,8	78,2	78,0	77,7	77,6	76,0	50,6

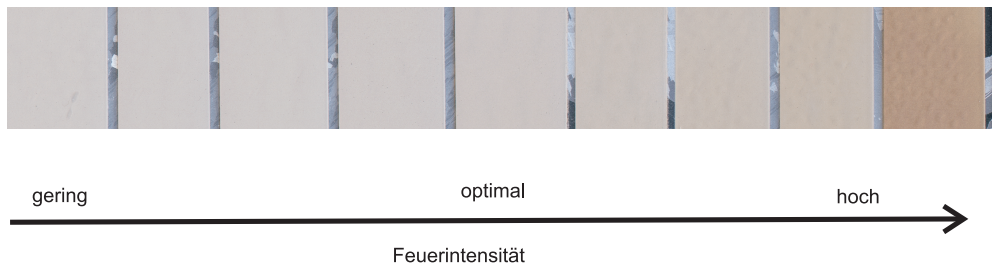


Abbildung 2.12: Rückseite bei Variation der Feuerintensität (=Zeit x Temperatur). Bei optimaler Feuerung ist der Kontakt grau, bei zu geringer hellgrau, bei zu starker bräunlich.

Al-BSF

Für die Solarzelle hat das Aluminium auf der Rückseite mehrere Funktionen: Beim Feuern bildet sich ein Eutektikum aus Silizium und Aluminium und somit beim Erkalten eine hochdotierte (p^+) Schicht, die als BSF wirkt. Aluminium erzeugt Leerstellen im Silizium und begünstigt dadurch die Diffusion einiger Elemente im Silizium (Getterwirkung). Verunreinigungen sammeln sich, wodurch die Anzahl der Rekombinationszentren sinkt [68]. Weiterhin wird die Diffusion des Wasserstoffs aus der PECVD SiN_x -Antireflexschicht in die Solarzelle begünstigt. Durch die Kombination von Al-BSF und PECVD SiN_x wird der Wirkungsgrad mehr gesteigert, als durch eine gute Antireflexschicht und ein BSF (siehe Tabelle 2.3). Dies liegt an der Volumenpassivierung durch den Wasserstoff des PECVD SiN_x . Diese Passivierung ist besonders effektiv, wenn sie mit dem Al-BSF in einem Hochtemperaturschritt gebildet wird [71] [72].

Zur Optimierung des Rückseitendrucks kann die Dicke der aufgetragenen Paste und die Pastenzusammensetzung variiert werden [73]. Als Ergebnisgrößen werden die Kenndaten der Solarzelle und Homogenität des Pastenauftrags betrachtet. Die Gleichmäßigkeit der

Tabelle 2.3: Vergleich von Solarzellen aus benachbarten Wafern mit und ohne Al-BSF, sowie mit PECVD-SiN_x. Aufgrund einer einfachen ARC kann eine Wirkungsgradsteigerung von 35% relativ angenommen werden. Durch die Kombination von Al-BSF und PECVD-SiN wird der Wirkungsgrad mehr gesteigert, als die separaten Prozessschritte.

Prozess	Jsc [A/cm ²]	Voc [mV]	η [%]	η × 1,35 [%] (ARC)
ohne Al BSF	20,8	575	9,0	12,1
mit Al BSF	21,7	582	9,5	12,8
Differenz [%]	4,3	1,2	5,6	5,6
Mit PECVD SiN _x und Al-BSF	30,0	606	13,6	

Dicke ist wichtig für die Homogenität des Kontaktwiderstandes auf der Frontseite der Solarzelle (siehe Kapitel 2.2.7). Auch kann es bei einigen Pasten bzw. Feuerparametern zur Bildung von Kügelchen und Blasen kommen. Generell ist eine scharfe Rampe zur Bildung des BSF günstig [74] [75]. Für zwei Pasten mit guten Druckeigenschaften wurden die elektrischen Eigenschaften anhand eines Experimentes mit je 4 Zellen aus durchschnittlichem Material A und je einer aus sehr gutem Material B verglichen.

In Tabelle 2.4 sind die Ergebnisse aufgelistet. Man sieht bei beiden Materialsorten nur wenig Unterschied, mit Paste 1 konnten leicht bessere Ergebnisse im Strom erreicht werden, die aber nicht signifikant sind. Um entscheiden zu können, welche Paste besser ist, muss ein Experiment mit deutlich mehr Zellen durchgeführt werden. Paste 2 bietet den Vorteil, dass sie den Wafer nur wenig biegt. Untersuchungen bezüglich des Bow bei Verwendung von Al-Paste wurden am LSB verstärkt, da es ein Schlüsselproblem der nächsten Jahre, dem Einsatz dünnerer Wafer (z.B. 200 μm) betrifft [73].

2.2.7 Homogenität und Streuung

Bei großflächigen Industriesolarzellen stellt die Homogenität der Solarzelle ein besonderes Problem dar. Sind Bereiche der Zelle "schlecht" (niedrige Lebensdauer, niedriger Shuntwiderstand, hoher Kontaktwiderstand oder abweichende Dicke der Antireflexbeschichtung), hat das negative Auswirkungen auf die gesamte Zelle. Je größer die Zelle ist, desto eher ist sie inhomogen und desto schwieriger ist es Zellen mit hohem Wirkungsgrad zu fertigen. Zunächst muss das Ausgangsmaterial eine ausreichende homogene Qualität aufweisen. Meist haben Wafer, bei denen eine Kante nahe am Rand des Ingots war, in diesem Bereich eine geringere Ladungsträger-Lebensdauer. Bei den nasschemischen Prozessschritten ist es einfach eine gute Homogenität über den Wafer zu erreichen, indem zum Beispiel der Carrier mit den Wafer stets leicht im Bad bewegt wird. Da der Schichtwiderstand des

Tabelle 2.4: Verschiedene Al Pasten im Vergleich. Es wurden jeweils 4 Zellen eines Standardmaterials A und eine Zelle mit einem besonders gutem Material B prozessiert.

Paste	Material	FF [%]	Voc [mV]	Jsc [A/cm ²]	η [%]
Paste 1	Material A	76,9	622	30,2	14,4
Paste 1	Material B	78,1	622	31,6	15,3
Paste 2	Material A	76,5	622	30,0	14,2
Paste 2	Material B	79,5	622	31,5	15,6

Emitters ein kritischer Parameter ist, ist hier Homogenität von großer Bedeutung. Je höher der Schichtwiderstand ist, desto schwer wiegend können Abweichungen sein. Stehen die Zellen im Rohr zu eng beieinander oder hat das Rohr einen zu kleinen Durchmesser bewirkt dies einen geringeren Schichtwiderstand in der Wafermitte, was teilweise durch Anpassung der Gasflüsse reguliert werden kann.

Große Auswirkungen hat eine Inhomogenität wiederum beim Drucken und Feuern der Kontakte. Offensichtlich ist eine konstante Fingerdicke und Breite von Bedeutung, da bei einer elektrischen Leitung immer die Stelle mit hohem Widerstand limitierend ist. Die Dicke des Rückseitenkontakts erscheint auf den ersten Blick unbedeutend, jedoch beeinflusst sie die Zellqualität auf zweierlei Weise: Die Dicke des BSFs wird durch Dicke der aufgedruckten Paste bestimmt und weiterhin beeinflusst die chemische Aktivität der Paste die Temperatur beim Feuern, da beim Aufschmelzen des Aluminiums und der Reaktion der Fritte dem Wafer Wärme entzogen wird. Ist die Paste in der Mitte des Wafers dicker aufgetragen als am Rand wird dem Wafer in der Mitte Wärme entzogen und somit wird der Frontkontakt lokal nicht ausreichend gefeuert. Die Folge ist dann ein hoher Kontaktwiderstand. Eine Zelle mit ungleichmäßig dickem Rückseitenkontakt wurde kleingeschnitten und die IV-Parameter sowie der Kontaktwiderstand von Zellstücken aus der Mitte der Zelle und dem Randbereich gemessen (siehe Abb. 2.13a). In Abb. 2.13b sieht man die Ergebnisse der Kontaktwiderstandsmessungen. Man sieht deutlich, dass der Kontaktwiderstand im Randbereich klein ist und man eine Gerade durch die Messpunkte legen kann, so dass sich als Wert für den spezifischen Kontaktwiderstand $\rho_C = 2-10 \text{ m}\Omega/\text{cm}^2$ ergibt. Für die Bereiche C und D lässt sich keine Gerade durch die Punkte legen, da die Streuung viel zu gross ist, jedoch kann man von einem Kontaktwiderstand $\rho_C > 100 \text{ m}\Omega/\text{cm}^2$ ausgehen.

Betrachtet man nur die IV-Hellkennlinie der gesamten Solarzelle (siehe Abb. 2.14a) würde man annehmen, die Zelle hätte einen geringen Shuntwiderstand und hohen Serienwiderstand. Aus der IV-Dunkelkennlinie erkennt man, dass der Shuntwiderstand nicht so niedrig ist, dass damit die Hell IV-Parameter erklärt werden könnten. Erst durch die Messungen der einzelnen Teil-Solarzellen wird klar, dass die Gesamthellkennlinie als Superposition von Unterzellen zu verstehen ist (siehe Tabelle 2.5). Die Steigung im Bereich niedriger Spannung ist nicht durch den Shuntwiderstand sondern den Serienwiderstand der schlechten Unterzellen bestimmt. Die Unterschiede in den Sättigungsströmen sind auf Materialinhomogenität und unterschiedliche Feuerung zurückzuführen.

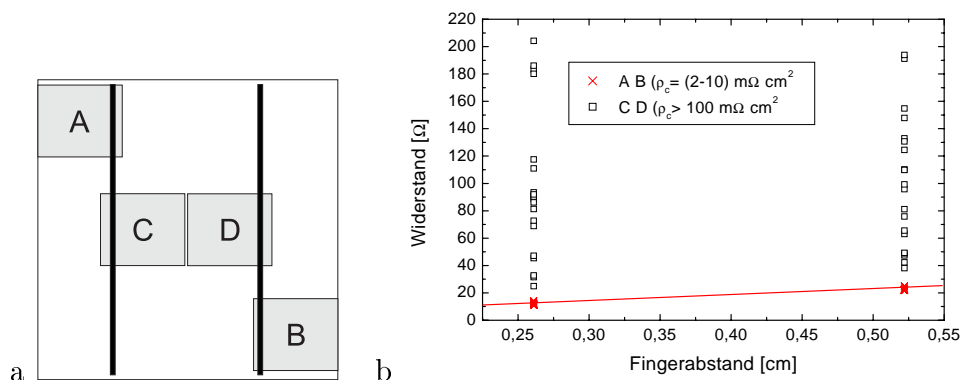


Abbildung 2.13: a) Positionen der Zellstücke A bis D auf der Zelle. b) Kontaktwiderstandsmessung an einer Zelle mit ungleichmäßig dick bedrucktem Rückkontakt. Für die Teilzellen aus der Mitte kann der Kontaktwiderstand bestimmt werden, am Rand ist die Streuung zu groß.

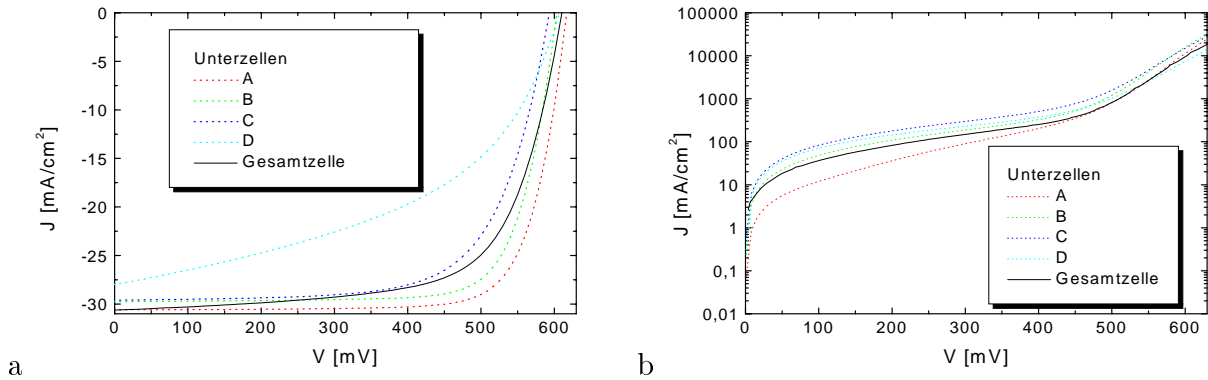


Abbildung 2.14: a) Hell- und b) Dunkel-IV - Kennlinie einer Zelle mit ungleichmäßig dickem Rückkontakt, fett eingezeichnet ist die Kennlinie der gesamten Zelle. Gestrichelt die der daraus ausgesägten Unterzellen, wobei A und B vom Rand der Zelle und C, D aus der Mitte stammen.

Tabelle 2.5: Zellparameter einer Zelle mit ungleichmäßig dickem Rückkontakt, sowie der daraus ausgeschnittenen Unterzellen, wobei A und B vom Rand der Zelle und C, D aus der Mitte stammen. Die gesamte Zelle lässt sich nicht mit dem Zwei-Diodenmodell beschreiben, deshalb sind keine Fitparameter angegeben.

Label	FF [%]	Jsc [mA/cm ²]	Voc [mV]	η [%]	Rsh [Ω cm ²]	Rs [Ω cm ²]	J ₀₁ [A/cm ²]	J ₀₁ [A/cm ²]
A	77,3	30,6	617	14,6	4750	0,6	$1,0 \cdot 10^{-12}$	$3,0 \cdot 10^{-8}$
B	76,5	29,8	603	13,7	2110	0,9	$1,6 \cdot 10^{-12}$	$4,1 \cdot 10^{-8}$
C	68,2	29,6	593	12,0	1240	2,2	$2,2 \cdot 10^{-12}$	$5,3 \cdot 10^{-8}$
D	47,1	28,0	607	8,0	1630	6,0	$1,3 \cdot 10^{-12}$	$4,0 \cdot 10^{-8}$
Zelle	67,2	30,6	610	12,6				

Streuung im Prozess

Neben den Absolutwerten ist es notwendig zu wissen, wie zuverlässig der Prozess ist und wie groß die Streuung von Wafer zu Wafer ist. Es wurden 45 Wafer aus einer Säule prozessiert, wobei die Reihenfolge beibehalten wurde und nur jeder dritte Wafer verwendet wurde, also ein Überblick über die 135 ausgelieferten Wafer einer Säule entsteht. Die Parameter der Zellen sowie Standardabweichungen sind in Tabelle 2.6 aufgelistet, die Abhängigkeit von der Position im Ingot sowie Histogramme in Abb. 2.15 zu sehen. Die Unterschiede im Füllfaktor sind hauptsächlich durch den Frontseitendruck bedingt (Fingerbreite und Höhe), Schwankung in Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom sind durch die Materialqualität bedingt. Beide Parameter nehmen mit der Zellnummer zu, dies ist gut mit steigender Lebensdauer zur Blockmitte hin zu erklären. Insgesamt lässt sich somit schlussfolgern, dass sich die Streuung gering und der Prozess stabil ist.

Tabelle 2.6: Mittelwerte und Streuung über 45 Zellen.

FF [%]	Jsc [mA/cm ²]	Voc [mV]	η [%]
$75,0 \pm 0,74$	$30,4 \pm 0,17$	$615 \pm 1,6$	$14,2 \pm 0,15$

Bedeutender als die Streuung durch den Prozess sind Unterschiede in der Qualität des Wafers. In einem weiteren Experiment wurde Wafer aus drei verschiedenen Ingots und

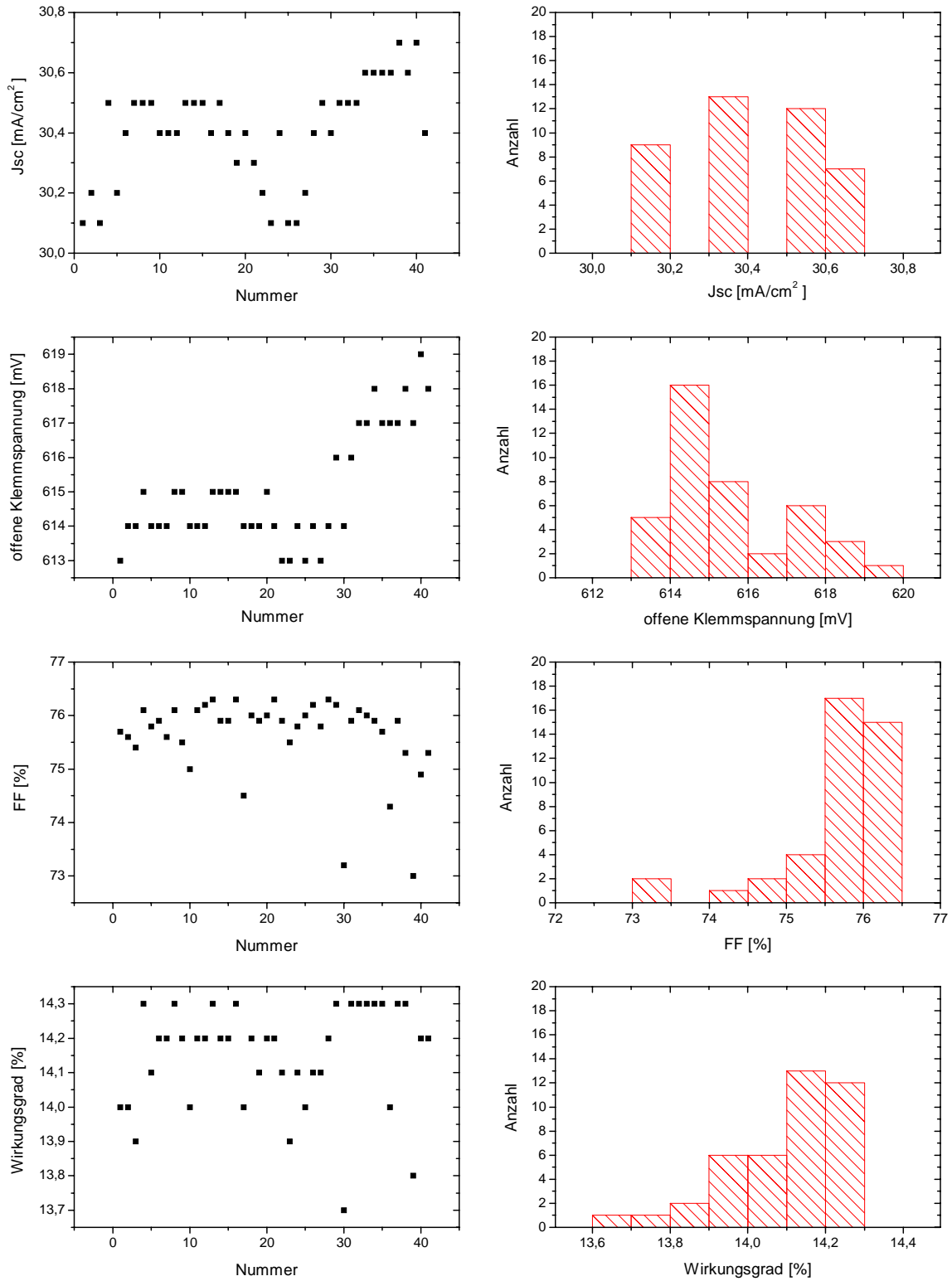


Abbildung 2.15: Streuung über etwa 45 Wafer im Prozess. Die Unterschiede im Füllfaktor sind hauptsächlich durch den Frontseitendruck bedingt, die in Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom durch Schwankungen in der Materialqualität.

verschiedenen Positionen im Ingot untersucht. In Tabelle 2.7 sind die Ergebnisse typischer Zellen aufgelistet. Da alle Zellen gleich prozessiert wurden und die Prozessschwankungen aus dem vorangegangenen Experiment bekannt sind, können die erheblichen Schwankungen von 1,5 % absolut im Wirkungsgrad ausschließlich auf das Material zurückgeführt werden. Der Serienwiderstand liegt im Rahmen der Schwankung und Messgenauigkeit. Aus der Zunahme von J_{sc} sowie V_{oc} kann geschlossen werden, dass die Lebensdauer (nach Prozess) von Material A gering, B mittelmäßig und C hoch ist. Die Diodenströme bestätigen dies. Auch der Shuntwiderstand ist bei den Zellen aus dem Material mit hoher Lebensdauer am höchsten. Dies ist erklärbar, da über Störstellen (Verunreinigungen oder Kristallisationsfehler etc.) die Zelle in sich kurzgeschlossen werden kann.

Tabelle 2.7: Vergleich von Solarzellen aus verschiedenen Ingots.

Material	FF [%]	J_{sc} [mA/cm ²]	V_{oc} [mV]	η [%]	R_{sh} [Ω cm ²]	R_s [Ω cm ²]	J_{01} [A/cm ²]	J_{02} [A/cm ²]
A	75,0	30,1	603	13,6	4200	0,96	$1,5 \cdot 10^{-12}$	$5,6 \cdot 10^{-8}$
B	75,5	30,9	613	14,3	4900	1,12	$1,2 \cdot 10^{-12}$	$2,8 \cdot 10^{-8}$
C	77,1	31,6	622	15,1	5500	1,02	$0,9 \cdot 10^{-12}$	$1,0 \cdot 10^{-8}$

Kapitel 3

Physikalische Betrachtungen zur V-Textur

Unter Verwendung der mechanischen V-Textur wurden auf multikristallinen Solarzellen mit Siebdruckmetallisierung bei einer Zellfläche von 100 cm^2 Wirkungsgrade von bis zu 17,2 % von Sharp [76] und 16,8 % in Kooperation IMEC, Belgien und der Uni Konstanz erreicht [77]. Auch in weiteren Publikationen ist das hohe Potential dieser Texturierungsmethode dargestellt [78] [79]. Es wurde festgestellt, dass der Gewinn im Kurzschlussstrom im Vergleich zu flachen Solarzellen höher ist, als durch die Reduktion der Reflexion erklärt werden kann. Durch Computersimulation konnte gezeigt werden, dass der Grund für die höhere Stromsteigerung eine erhöhte Einsammelwahrscheinlichkeit von Ladungsträgern in den V-Spitzen der Textur ist. Dies wurde später durch hochaufgelöste LBIC-Messungen bestätigt [80].

In diesem Kapitel wird zunächst auf die Effekte eingegangen, die zu einer Erhöhung des Kurzschlussstromes V-texturierter Solarzellen im Vergleich zu flachen Solarzellen führen. Dazu wird die Reflexion und die IQE der Solarzellen betrachtet. Um den möglichen Wirkungsgradgewinn bei Industriesolarzellen im Vergleich zu alkalisch geätzten Solarzellen abzuschätzen, wurden Simulationen anhand des Zwei-Dioden-Modells durchgeführt, die abschließend diskutiert werden. Eine detaillierte Beschreibung der Profilgeometrie findet sich im Anhang A.4.

Sprachgebrauch

In der Literatur ist kein einheitlicher Sprachgebrauch für die mechanische Bearbeitung von Silizium üblich. Im EU Hit Projekt sowie in älteren Publikationen wird häufig der Begriff **“Strukturieren“** von Silizium verwendet, wenn es sich gemessen an der Waferdicke um eine makroskopische Struktur handelt. Dies ist zum Beispiel bei $70 \mu\text{m}$ tiefen V-Gräben der Fall, jedoch nicht bei wenige μm hohen Strukturen, die z. B. bei einer auf Säure oder Lauge basierenden Textur entstehen. Deshalb wird dies dort als **“Texturieren“** bezeichnet. Im Gegensatz dazu sind bei der GP Solar GmbH mit dem Wort **“microtexturing“** generell das Erzeugen aller Strukturen gemeint, die gemessen an Alltagsgegenständen mikroskopisch sind, also sowohl V-Strukturen, als auch das mechanische Planarisieren etc. In dieser Arbeit wird das Wort mechanische Textur zweckorientiert immer dann verwendet, wenn die Oberfläche zur Erhöhung des Wirkungsgrads bearbeitet wird. Es wird jedoch zwischen der makroskopischen V-Textur und der mechanischen Mikrotextrur, bei der die Profilform zufällig erzeugt wird, unterschieden (siehe Kapitel 4.3).

3.1 Effekte zur Stromsteigerung

Folgende drei Faktoren wirken sich bei mechanisch texturierte Solarzellen im Vergleich zu untexturierten Solarzellen gewinnbringend im Kurzschlussstrom aus:

- Reduzierung der Reflexion an der Frontseite
- Höhere Einsammelwahrscheinlichkeit
- Lighttrapping von langwelligem Licht

Um den Kurzschlussstrom Solarzelle zu berechnen, wird die Reflexion und IQE der Solarzelle benötigt. Um verschiedene Konzepte zu vergleichen kann die Absorption in der ARC oder Verkapselung in der Regel vernachlässigt werden, da sie für alle Konzepte gleich gross ist. Während die verminderte Reflexion an der Frontseite und die höhere Einsammelwahrscheinlichkeit jeweils separat betrachtet werden können, hat das Lighttrapping einen Einfluss sowohl auf die Reflexion als auch auf die IQE. Deshalb wird der Effekt des Lighttrapping zunächst diskutiert und dann auf die Reflexion und IQE eingegangen.

Langwelliges Licht dringt, bevor es absorbiert wird, tiefer in Silizium ein als kurzwelliges. Deshalb sollte bei einer Solarzelle das Licht so eingekoppelt werden, dass die Strecke, die es im Material zurücklegen kann, möglichst lang ist. Dies wird mit Lighttrapping bezeichnet.

Industriesolarzellen haben meist keine gut reflektierende Rückseite, was bewirkt, dass ein Großteil des langwelligen Lichts am ganzflächigem Rückkontakt absorbiert wird und keine Ladungsträger erzeugt werden. Für den Fall einer Reflexion an der Rückseite ist zwischen dem spiegelnd reflektiertem Anteil und dem lambertianisch diffus reflektiertem Anteil, also in alle Richtungen gleichmäßig verteiltem, zu unterscheiden. Im Falle einer flachen Frontseite und spiegelnder Reflexion an der Rückseite tritt Licht nach Reflexion an der Rückseite durch die Frontseite wieder aus, kann also bei senkrechtem Einfall und unter Vernachlässigung der internen Reflexion maximal die doppelte Zelldicke durchlaufen. Bei einer mechanisch texturierten Solarzelle tritt das Licht in der Regel in einem flacherem Winkel in die Zelle ein und kann nach spiegelnder Reflexion an der Rückseite wegen Totalreflexion an der Frontseite ein mehrfaches der Zelldicke durchlaufen. So werden signifikant mehr freie Ladungsträger erzeugt, die zum Strom beitragen können. Der Lighttrapping Effekt wirkt sich also sowohl in einer geringeren Reflexion als auch in einer geringeren IQE für langwelliges Licht, im Vergleich zu flachen Solarzellen aus. Damit das Licht ein vielfaches (z.B. 50faches) der Zelldicke durchlaufen kann ist die Reflexion an der Rückseite von hoher Bedeutung. Bei Industriesolarzellen ist der Lighttrappingeffekt vernachlässigbar, da die Rückseite nur unzureichend reflektiert.

Im folgendem werden für zwei Profile, die mit dem an der Universität Konstanz weiterentwickelten Verfahren unter Verwendung eines schnell rotierendem Texturierungswerkzeuges erzeugt werden können, näher betrachtet. Dabei handelt es sich um ein mit einem Sägeblatt erzeugtes Profil mit 40° Grabenwinkel, einem Krümmungsradius im Graben von $10\ \mu\text{m}$ und einem Geometriefaktor (Oberflächenvergrößerung, siehe Gl. A.30) von $Gf = 2$ (Profil A in Abb. 3.1) und ein mit einer Texturierungswalze erzeugtes Profil mit 100° Grabenwinkel, einem Krümmungsradius im Graben von $40\ \mu\text{m}$ und einer Geometriefaktor von $Gf = 1,2$ (Profil C). Als Referenz diente eine flache Oberfläche (d.h. eine glatte Fläche, nicht, wie bei der NaOH - Ätzung eine raue). Ferner wurde angenommen, dass die Rückseite zu $40\ \%$ absorbiert und zu $60\ \%$ spiegelnd reflektiert.

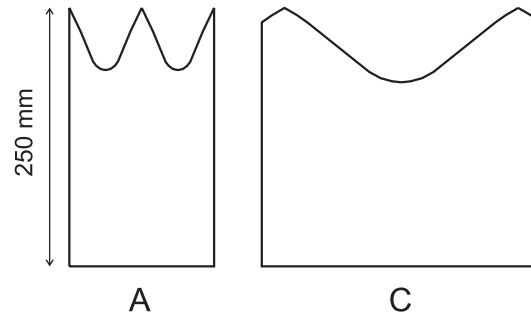


Abbildung 3.1: Die in den Computersimulationen untersuchten Profile. Profil A kann mit einem einzelnen Sägeblatt erzeugt werden, Profil C mit einer Texturierungswalze (siehe auch Abb. 4.12) [82].

3.1.1 Analyse der Reflexion

Fällt ein Lichtstrahl auf eine Oberfläche, wird stets ein Teil reflektiert und ein Teil dringt in das Material ein. Im Falle der untexturierten Oberfläche ist der reflektierte Teil für die Solarzelle verloren, während bei einer mechanisch texturierten Solarzelle je nach Einfallrichtung und Textur eine Mehrfachreflexion stattfindet. Ein Teil des reflektierten Strahls kann somit in die Solarzelle eindringen und zum Strom beitragen (Siehe Abb. 3.2)a. Ein spitzer Grabenwinkel erscheint günstig, da Lichtstrahlen verschiedener Einfallswinkel mehrfach reflektiert werden. Jedoch besteht ein großer Unterschied zwischen der Reflexion einer Zelle mit und ohne Verkapselung. Ein von der Zelle reflektierter Lichtstrahl kann an der Innenseite der Verkapselung totalreflektiert werden. Somit kann auch mit einem relativ großem Grabenwinkel um 100° eine geringe Reflexion erzielt werden. Aus einfachen geometrischen Überlegungen und dem Brechungsindex der Verkapselung kann der maximale Profilwinkel für Totalreflexion bei senkrechtem Einfall nach Gl. 3.1 errechnet werden:

$$\alpha_{max} = 180 - \arcsin(1/n) \quad (3.1)$$

Bei $n=1,46$ ergibt sich damit ein maximaler Grabenwinkel von 137° . Bei diesem Winkel trifft jeder senkrecht einfallende Lichtstrahl mindestens zweimal auf die Zelloberfläche. Bei einer realen V - Textur ist der Grabenboden nicht beliebig spitz sondern weist eine Krümmung auf. Je größer der Krümmungsradius im Grabenboden, desto größer sind auch die Verluste durch Reflexion, denn ein Lichtstrahl, der auf den Grabenboden auftrifft, wird nicht mehr totalreflektiert. Da bei gleicher texturierter Fläche mit kleinem Grabenwinkel mehr Gräben nötig sind als mit einem großem Grabenwinkel, ist die Reflexion somit entscheidend vom Krümmungsradius abhängig. Durch ein asymmetrisches Profil (eine Flanke des Grabens "flach", die andere "steil") kann bei kleinem Krümmungsradius eher erreicht werden, dass jeder Lichtstrahl mindestens dreimal auf die Zelloberfläche trifft. Bei einem solchen Profil ist jedoch der Grabenabstand kleiner als bei einem symmetrischen mit zwei "flachen" Flanken und der Gewinn durch die bessere Reflexion an den Flanken hebt sich mit dem Verlust durch die höhere Anzahl von Gräben bei großem Krümmungsradius, wie er bei einer Texturierungswalze angenommen werden muss, wieder auf.

Im Modul selbst ist der Gewinn durch die Verkapselung nicht nur abhängig von der Zelle, sondern auch vom Modulaufbau. Eine entscheidende Rolle spielt hier die Absorption des Glases im kurzwelligem Wellenlängenbereich und auch der Abstand der Zellen in Kombination mit der Reflektivität des Rückseitenmaterials der Moduls. Licht, das zwischen den Zellen auf ein gut reflektierendes Material trifft kann nach Totalreflexion an der Gla-

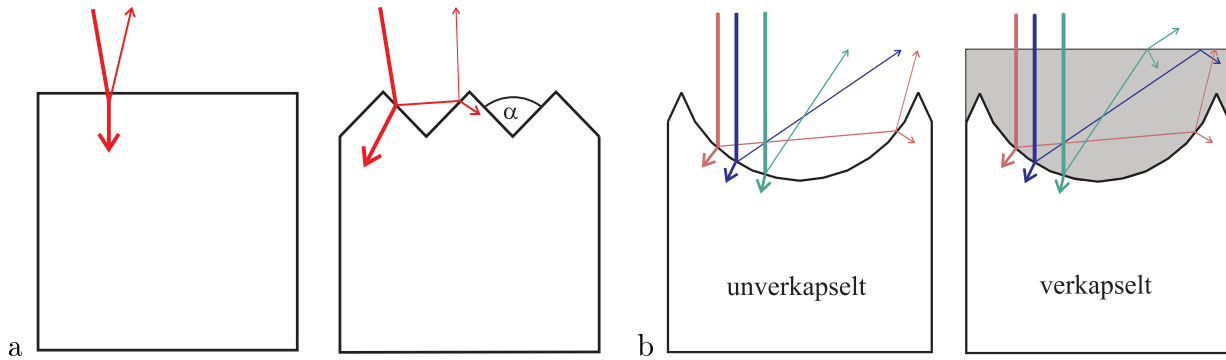


Abbildung 3.2: a) Reflexion an einer untexturierten und V- texturierten Oberfläche. Während der einmal reflektierte Anteil eines Lichtstrahls bei einer untexturierten Solarzelle verloren ist, kann er bei einer V - texturierten Solarzelle auf der gegenüberliegenden Grabenseite absorbiert werden und zum Strom beitragen und b) Reflexion einfallender Lichtstrahlen mit und ohne Verkapselung im Modul. Durch Totalreflexion an der Innenseite der Verkapselung ist die Reflexionsreduktion im Modul auch bei Profilen mit großem Grabenwinkel hoch [82].

sinnenseite auf die Zelle treffen. Eine Optimierung des Abstandes unter Berücksichtigung der Serienwiderstandsverluste und Kosten ist in [81] durchgeführt worden.

Basieren auf Monte Carlo Ray - Tracing, d.h. unter Verfolgung des Strahlengangs einer großen Anzahl von Photonen wurden von C. Zechner Reflexionsspektren berechnet [82] [83]. Dabei wurde eine SiN Antireflexbeschichtung (Brechungsindex 2,3) sowie Verkapselung im Modul unter Verwendung eines 100 % transparenten Material (Brechungsindex 1,46) angenommen. Mit Hilfe der gemessenen IQE einer Industriesolarzelle wurde die gewichtete Reflexion errechnet (siehe Gl- A.26) und daraus unter Annahme einer Kurzschlussstromdichte ohne Reflexionsverluste von 35 mA/cm^2 die Kurzschlussstromdichten von Solarzellen mit den entsprechender Textur bestimmt (Der Einfluss der Textur auf die IQE wird hierbei also vernachlässigt). Die Ergebnisse sind in Tabelle 3.1 dargestellt. Als Referenz, zu der die Gewinne berechnet sind, wurde eine flache Oberfläche angenommen. Alternativ könnten Zufallspyramiden angenommen, wie sie bei einer alkalischen Texturätzung von multikristallinem Material entstehen, also mit unterschiedlichem Neigungswinkel, je nach Kornorientierung. Berechnungen hierzu werden zur Zeit durchgeführt [84].

Die Reduktion der Reflexion ist bei beiden Profilen sehr ähnlich. Dies ist durch die Totalreflexion an der Innenseite des Enkapsulanten erklärbar (siehe Abb. 3.2b). Ohne Einbettung im Modul ist die Reflexion für das Profil A deutlich geringer. Der Enkapsulant ist besonders für kurzwelliges Licht nicht 100 % transparent und reflektiert zu etwa 3-5%. Deshalb wird bei Zellen mit Profil A sogar eine Steigerung der Reflexion durch Verkapselung im Modul erwartet. Betrachtet man als Referenz nicht flache Solarzellen, sondern alkalisch defektgeätzte, so ist der Gewinn niedriger, da durch das alkalische Ätzen

Tabelle 3.1: Änderung in der Reflexion und im Kurzschlussstrom für verkapselte mechanisch texturierte Solarzellen aufgrund der Reflexionsreduktion bei identischer IQE.

Textur	R_{eff} [%]	J_{sc} [mA/cm^2]	Gewinn [%]
ohne	11,9	30,84	
A	7,4	32,41	5,11
C	8	32,20	4,43

Zufallspyramiden und Pyramidenstümpfe an der Oberfläche gebildet werden. Desweiteren sind auch die Flanken der mechanisch texturierten und anschließend NaOH-geätzten V-Gräben nicht ideal grade.

Messungen verkapselter Solarzellen mit TiO_2 Antireflexbeschichtung und sowohl alkalischer Defektätzung als auch mechanischer Textur ergaben eine maximalen Gewinn im Kurzschlussstrom von 3% durch die Reduktion der Reflexion. Dies bedeutet unter Vernachlässigung der Messungengenauigkeit, dass die Oberflächentextur durch die alkalische Defektätzung zu einem Gewinn im Vergleich zu flachen Zelle von etwa 2,1 % führt, da das Profil A als Ideal angenommen werden kann und 5,1% Steigerung bringt.

3.1.2 Analyse der IQE

Wegen der unterschiedlich großen Eindringtiefe von Licht in Silizium hängt der Ort, an dem ein freier Ladungsträger wird, von der Wellenlänge ab. Für eine unendlich dicke Solarzelle wird ein Ladungsträger um so weiter von der Frontseite entfernt generiert, je größer die Wellenlänge des einfallenden Photons ist. Der freie Ladungsträger diffundiert so lange durch die Solarzelle, bis er rekombiniert oder die Emitterfläche erreicht. Mit dem Softwarepaket DESSIS [52] sowie dem Programm "Sonne" wurde von C. Zechner die Generation von Ladungsträgern abhängig vom Ort in der Solarzelle simuliert [82]. Unter Berücksichtigung der Diffusions- und Rekombinationseigenschaften des Siliziums können somit die IQE einer Solarzelle oder auch die IV-Kennlinie berechnet werden. Abb. 3.3 zeigt das Generationsprofil von Ladungsträgern in einer 250 μm dicken teilweise V-texturierten Solarzelle. Lichtstrahlen werden so in die Textur hereingebrochen, dass in einer V-Spitze mehr Ladungsträger generiert werden, als dies bei entsprechender Entfernung von der Oberfläche in einer flachen Solarzelle der Fall ist. Fällt Licht auf den Grabenboden der V-texturierten Solarzelle, so werden jedoch weniger Ladungsträger eingesammelt, als dies bei einer flachen Solarzelle der Fall ist. Durch die makroskopische Textur ist der Abstand des Emitter (im Grabenboden) zur Rückseite geringer, als bei einer gleich dicken nicht makroskopisch texturierten Solarzelle. Dadurch erreichen Ladungsträger, die in der Nähe der Rückseite erzeugt werden mit einer höheren Wahrscheinlichkeit den Emitter. Da die überwiegende Zahl der zum Strom beitragenden Ladungsträger in den ersten 100 μm unter der Oberfläche generiert werden (siehe Abb. 3.3), wirkt sich die makroskopische Textur um so positiver aus, je geringer die Diffusionslänge ist. Dies konnte insbesondere für Folienmaterialien gezeigt werden [80].

Um den Kurzschlussstrom von Solarzellen zu bestimmen wurden mit DESSIS die IQE für mechanisch texturierte und untexturierte Solarzellen berechnet. Dabei wurde angenommen, dass im kurzwelligen Bereich (bis ca 500 nm) wird für mechanisch texturierte und untexturierte Solarzellen die IQE gleich ist. Dieser Bereich wird in erster Linie durch den Emitter und den Emitter-nahen Bereich der Basis bestimmt, daher gibt es keine Hinweise aus der Theorie, dass sich die IQE für mechanisch texturierte und untexturierte Solarzellen unterscheiden sollte. Jedoch wurde in einigen Experimenten beobachtet, dass die IQE von mechanisch texturierten Solarzellen im kurzwelligen Bereich etwas niedriger ist. Für den Fall einer alkalischen Defektätzung von multikristallinem Material ist die niedrigere IQE im kurzwelligen Bereich erklärbar: Die Ätzdauer wird anhand des Wirkungsgrads der Solarzellen optimiert. Je länger die Ätzdauer ist, desto mehr verrundet das Profil und die Reflexion steigt an. Da die alkalische Lösung anisotrop ätzt kann es günstiger sein, wenn auf langsam ätzenden Körnern der Sägeschaden nicht vollständig entfernt wird, dafür aber die Reflexion niedriger ist. Der Gewinn in der Reflexion ist höher als der Verlust

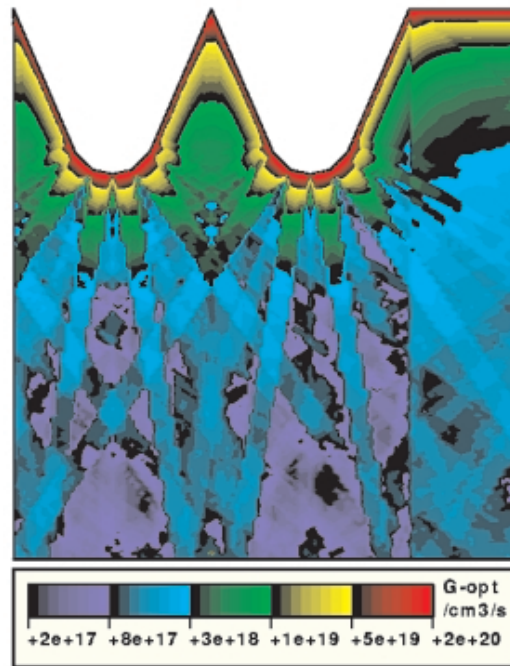


Abbildung 3.3: Mit DESSIS simuliertes Generationsprofil von Ladungsträgern in einer teilweise V-texturierten 250 μm dicken Solarzelle. Mehr Ladungsträger werden in der Nähe des Emitters generiert und tragen zum Strom bei.

durch Rekombination im kurzwelligen Bereich, der in der IQE sichtbar ist. Desweiteren kann ein Abbrechen der V-Spitzen im Laufe des Prozesses eine geringere kurzwellige IQE bewirken. Für den Vergleich der IQEs verschiedener texturierter Solarzellen wurde nur die langwellige IQE mit DESSIS jeweils neu berechnet (für Details zur Berechnung siehe [82]). Unter Verwendung dieser IQEs wurde dann mit derselben Reflexionskurve die Kurzschlussstromdichte einer Solarzelle berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3.2 zu sehen.

Deutlich ist der Einfluss der Diffusionslänge: Bei geringer Diffusionslänge ist der Gewinn bei jedem Profil höher, aber auch die Unterschiede zwischen den Profilen größer. Dies ist auf die erhöhten Einsammelwahrscheinlichkeiten zurückzuführen, die mit zunehmender Diffusionslänge weniger ins Gewicht fällt.

Tabelle 3.2: Änderung in der Kurzschlussstromdichte für mechanisch texturierte Solarzellen ohne Berücksichtigung unterschiedlicher Reflexionseigenschaften für 100 μm und 200 μm Diffusionslänge und $S_B = 1000 \frac{\text{cm}}{\text{s}} \approx S_\infty$

	Jsc 100 μm [mA/cm^2]	Gewinn [%]	Jsc 200 μm [mA/cm^2]	Gewinn [%]
ohne	29,69	0,00	31,33	0,00
A	30,78	3,67	32,05	2,30
C	30,12	1,45	31,62	0,93

3.2 Einfluss der V-Textur auf die Zellparameter

Die vorangegangenen Simulationen berücksichtigen sehr genau die Steigerung im Kurzschlussstrom von mechanisch texturierten Solarzellen im Vergleich zu flachen Solarzellen. Effekte aufgrund des Serienwiderstands sowie der Rekombination in der Raumladungszone müssen nachträglich mit eingerechnet. Dazu wird das Zwei-Dioden-Modells verwendet. Die Ergebnisse können leicht mit experimentellen Daten verglichen werden, da die IV-Kennlinie gemessen und die Parameter anhand des Zwei-Dioden-Modells angefitet werden können. Die einzelnen Faktoren werden im folgenden diskutiert um dann den Gewinn im Wirkungsgrad zu betrachten.

3.2.1 Diodensättigungsstrom I_{01}

Der Diodensättigungsstrom I_{01} beschreibt die Rekombination im Emitter und in der Basis sowie an den Oberflächen. Zunächst sei der Anteil der Basis und der Rückseite betrachtet: Da eine makroskopisch texturierte Zelle bei gleicher Ausgangsmaterialdicke ein geringeres Basisvolumen hat, als eine nicht makroskopisch texturierte Zelle, sinkt der Anteil der Rekombination in der Basis. Ist die Rückseitenrekombinationsgeschwindigkeit S_{eff} kleiner als die des "unendlichen Kristalls" (= Verhältnis von Diffusionskoeffizient zu Diffusionslänge $S_{\infty} = D/L$) sinkt der Sättigungsstromanteil der Basis inkl. Rückseite, ist sie höher, steigt er. Wie stark der Einfluss der Rückseite ist, hängt, wie auch bei untexturierten Zellen, wesentlich von der Diffusionslänge ab: Je höher die Diffusionslänge, desto stärker Einfluss der Rückseitenrekombination. Für Standard Siliziumsolarzellen gilt mit der folgende Abschätzung für die Rekombinationsgeschwindigkeit des unendlichen Kristalls:

$$S_{\infty} = \frac{D}{L} = \frac{kT}{Lq}\mu \quad (3.2)$$

Mit $k = 1,38110^{-23} J/K$, $T = 298 K$, $q = 1,60210^{-23} C$, $\mu = 1110 \text{ cm}^2/Vs$ und $L = 250 \mu m$ ergibt sich für $S_{\infty} \approx 1100 \frac{cm}{s}$. Mit einem Siebdruck - BSF erreicht man eine Rückseitenrekombinationsgeschwindigkeit $S_{eff} \approx 1000 - 1500 \frac{cm}{s}$ [85]. Das bedeutet, dass Anteil der Basis inkl. Rückseite an I_{01} in etwa gleich bleiben wird.

Der Emitteranteil inkl. Frontseite an I_{01} steigt proportional mit der Emitterfläche unabhängig von der Oberflächenpassivierung. Wegen der größeren Emitterfläche steigt auch die absolute Anzahl von Elektronen, die in die Basis injiziert werden. Bei geringer Diffusionslänge führt dieser Effekt zu einem Anstieg des Basisanteils an I_{01} .

Aufgrund dieser Betrachtungen wird der Diodensättigungsstrom I_{01} für Industriesolarzellen mit makroskopischer mechanischer Textur im Vergleich zu untexturierten Zellen ansteigen. Der Emitteranteil inkl. Frontseite steigt proportional mit der Oberfläche und der Basisanteil inkl. Rückseite bleibt für den Fall eines Siebdruck BSFs etwa gleich.

In den Simulationen mit DESSIS wird der Effekt durch erhöhte Rekombination im Emitter wegen größerer Oberfläche und geänderter Rekombination in der Basis und an der Rückseite berücksichtigt. Als Emittersättigungsstromdichte, die mit der Oberfläche skaliert, wurde $5 \cdot 10^{-13} \text{ mA/cm}^2$ angenommen. Auch der positive Einfluss auf die Leerlaufspannung aufgrund des höheren Kurzschlussstromes wird berücksichtigt.

3.2.2 Diodensättigungsstrom I_{02}

Der Diodensättigungsstrom I_{02} beschreibt die Rekombination in der Raumladungszone. Hierbei gibt es einen Beitrag des pn - Übergangs unter dem Frontseitenemitter und evtl. durch die Metallkontakte auf der Frontseite. Bei speziellen Konzepten wie Rückkontakt- oder POWER- Solarzellen gibt es noch weitere Beiträge von pn-Übergängen an Oberflächen [86]. Die Kanten können bei den hier betrachteten großflächigen Industriesolarzellen vernachlässigt werden und somit kann für optimierte Siebdruckkontakte der Einfluss auf I_{02} vernachlässigt werden. Somit steigt der Sättigungsstrom I_{02} bei Siebdruck - Industriesolarzellen proportional mit der Oberfläche.

Für die mit DESSIS durchgeführten Simulationen muss die Rekombination in der Raumladungszone nachträglich eingerechnet werden. Dabei wurde aufgrund experimenteller Erfahrung angenommen, dass sich die Sättigungsstromdichte mit der Diffusionslänge L_D gemäß $J_{02} = (1,5 + 450\mu \text{ m}/L_D) \cdot 10^{-8} \text{ mA/cm}^2$ ändert und ihr Absolutwert mit der Oberfläche skaliert [82].

3.2.3 Serienwiderstand

Weiterhin wird durch die Vergrößerung der Emitterfläche der Serienwiderstand im Emitter beeinflusst. Verlaufen die Kontaktfinger parallel zu den Gräben, steigt der Serienwiderstand, bei senkrechtem Verlauf sinkt er. Da bei Siebdrucksolarzellen nur ein paralleler Verlauf in Frage kommt, steigt der Anteil des Serienwiderstandes im Emitter. Bei Buried Contact Solarzellen lassen sich jedoch auch senkrecht zu den Gräben verlaufende Finger realisieren, wodurch der Anteil des Serienwiderstandes im Emitter sinkt [87].

Für die mit DESSIS durchgeführten Simulationen wurden Serienwiderstandsbeiträge von $0,5 \Omega \text{ cm}^2$ für flache Zellen, $0,51 \Omega \text{ cm}^2$ für Profil C und $0,55 \Omega \text{ cm}^2$ für Profil A nachträglich eingerechnet.

3.2.4 Berechnung der Zellparameter

Berechnungen im Vergleich zu flachen Solarzellen

Mit dem oben beschriebenen Verfahren wurden mit DESSIS und anschließenden Korrekturen Zellparameter für die Profile A und C berechnet. Dies wurde für zwei Rückseitenrekombinationsgeschwindigkeiten und verschiedene Diffusionslängen durchgeführt [82]. Da eine genaue Berücksichtigung des Strahlenverlauf und somit der Reflexion für rauen Oberfläche alkalisch geätzter Solarzellen extrem aufwendig ist, wurden ideale Profilverläufe und eine flache Referenz verwendet. Die so errechneten Ergebnisse sind als Absolutwerte und Differenzen von texturierten zu flachen verkapselten Solarzellen in Abb. 3.4 dargestellt.

Deutlich ist zu sehen, dass das Profil C mit großem Grabenwinkel im Modul überwiegend zu besseren Ergebnissen führt. Gerade bei dem Profil mit großem Grabenwinkel ist der Einfluss der Rückseitenrekombinationsgeschwindigkeit hoch, denn es werden mehr Ladungsträger in tieferen Regionen der Zelle generiert, als bei dem Profil A und somit gewinnt die Rekombination an der Rückseite an Bedeutung. Auf den ersten Blick ist überraschend, dass der Gewinn durch die Textur nicht bei kleinen Diffusionslängen am größten ist. Dies liegt an den sehr großen Verlusten durch Rekombination in der Raumladungszone bei kleiner Diffusionslänge. Für diese sehr kleinen Diffusionslängen ist

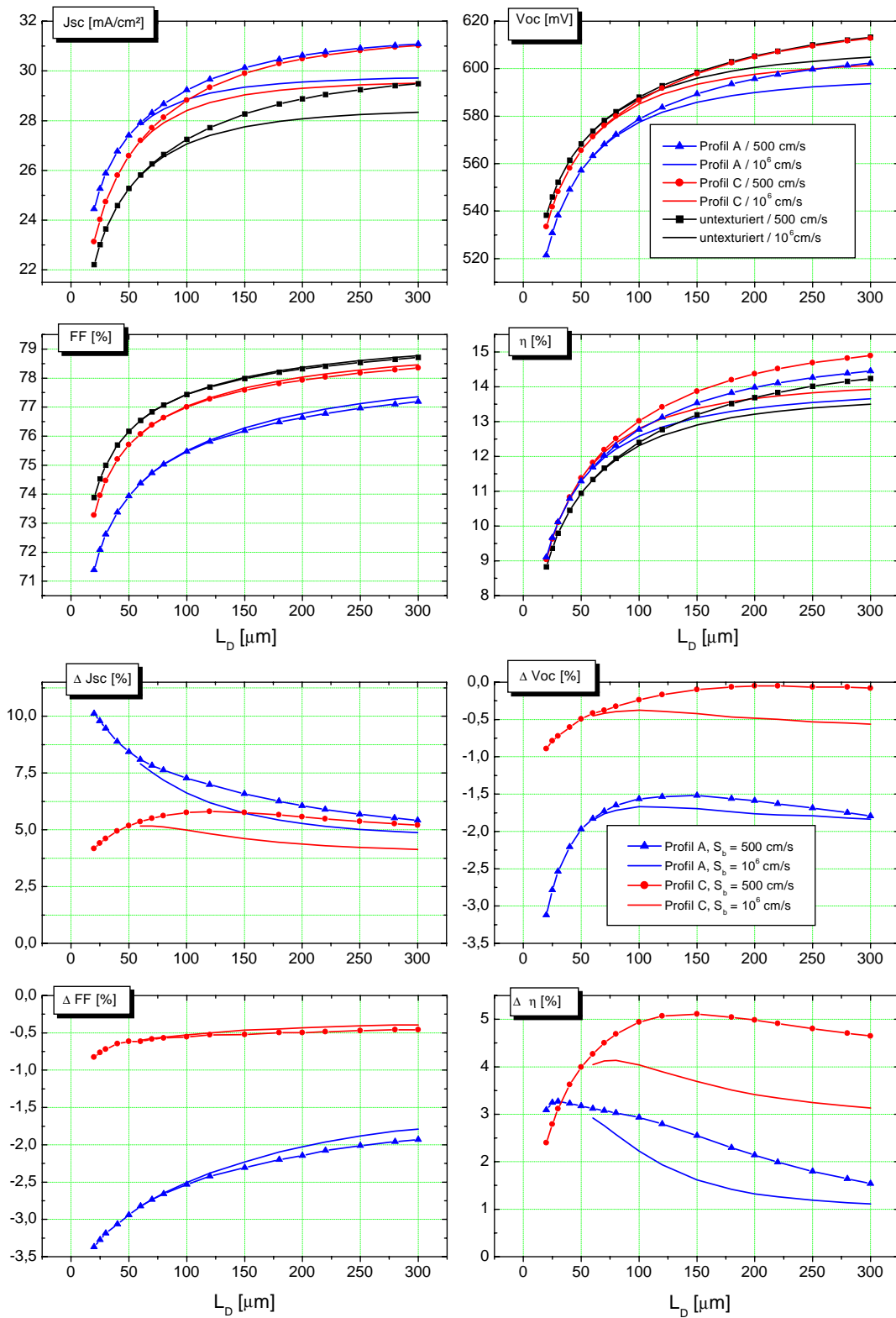


Abbildung 3.4: Ergebnisse der Simulationen mit DESSIS jeweils mit Antireflexschicht und Verkapselung. Oben: Absolutwerte. Unten: Differenzen zu flachen Solarzellen [82].

fraglich, ob I_{02} nur durch die Fläche der Raumladungszone bestimmt wird und die Skalierung mit der Oberfläche deshalb das reale Verhalten entsprechend korrekt beschreibt. Experimente mit dem Folienmaterial RGS ergeben deutlich bessere Wirkungsgrade für

Zellen mit mechanischer V-Textur [80]. Zwar sind diese nicht verkapselt, haben jedoch eine Doppel-Antireflexschicht (DARC) ¹.

Berechnungen im Vergleich zu alkalisch geätzten Solarzellen

Für den industriellen Einsatz der mechanischen Texturierung ist der Vergleich von alkalisch defektgeätzten und mechanisch texturierten Industriesolarzellen von besonderem Interesse. Diese Solarzellen haben gewöhnlich ein Siebdruck Al-BSF und somit eine Rückseitenrekombinationsgeschwindigkeit von etwa 1000-1500 cm/s und effektive Diffusionslängen von 100-500 μm . Bei dem Al-BSF kann nicht ausschließlich spiegelnde Reflexion angenommen werden, sondern muss überwiegend diffuse Reflexion angenommen werden.

Da alkalisch defektgeätzte Solarzellen eine geringere Reflexion als flache aufweisen wird hier als Obergrenze für den Gewinn durch Reflexionsreduktion 3 % angenommen. Der Wirkungsgradgewinn im Vergleich zu flachen Solarzellen liegt zwischen 4,6 % und 5,1 % (siehe Abb. 3.4), bei einem Anteil von 4,43 % aufgrund der Reflexion (siehe Tabelle 3.1). Berücksichtigt man die weniger spiegelnd reflektierende Rückseite mit 0,2 % und einen maximalen Gewinn durch Reflexion von 3 % ergibt sich als maximal zu erwartender Gewinn im Wirkungsgrad 3 % - 3,5 % relativ je nach Diffusionslänge des Materials.

Der Vorteil der Simulationen mit DESSIS ist, dass Effekte aufgrund erhöhter Einsammelnwahrscheinlichkeit gut simuliert werden können. Dies führt zu einem besseren Verständnis des Effektes und gibt Aufschluss über die das Verhalten z.B. bei verschiedenen Diffusionslängen. Bei großflächigen Solarzellen variiert jedoch sowohl die Beschaffenheit der Oberfläche als auch die Diffusionslänge des Siliziums auf dem Wafer. Damit sind die zwei entscheidenden Faktoren für die Erhöhung des Kurzschlussstroms extrem von den Eigenschaften des Wafers abhängig. Zusätzlich müssen weitere wichtige Effekte wie die höhere Rekombination in der Raumladungszone und der Serienwiderstand anschließend eingerechnet werden.

Um abzuschätzen, wie groß der Gewinn im Wirkungsgrad für Industriesolarzellen ist, können deshalb auch Simulationen im Zwei-Dioden-Modell durchgeführt werden und eine realistische Steigerung im Kurzschlussstrom angenommen werden. Die Veränderung der Eingangsparameter des Zwei-Dioden-Modells wurde oben diskutiert, nun soll der Einfluss auf den Wirkungsgrad einer V-texturierten Solarzelle bestimmt werden.

Von besonderem Interesse ist für Siebdruck - Industriesolarzellen der Einfluss der Diodensättigungsstromdichten auf die Leerlaufspannung und den Füllfaktor im typischen Bereich um $J_{01} = 1,2 \cdot 10^{-12} \text{ A/cm}^2$ und $J_{02} = 2 \cdot 10^{-8} \text{ A/cm}^2$. In Abb. 3.5 sind die Diodensättigungsströme über die Leerlaufspannung bzw. den Füllfaktor aufgetragen. Man sieht, dass eine Erhöhung von I_{01} in erster Linie eine Absenkung der Leerlaufspannung zur Folge hat, bei den für Siebdruck - Industriesolarzellen typischen Werten bleibt der Füllfaktor nahezu konstant. Eine Erhöhung von J_{02} bewirkt in erster Linie eine Absenkung des Füllfaktors aber auch eine leichte Absenkung der Leerlaufspannung. Das bedeutet, dass in den für Siebdruck - Industriesolarzellen typischen Bereich sowohl der Füllfaktor als auch die Leerlaufspannung leicht mit Vergrößerung der Oberfläche sinken.

Eine Erhöhung des Serienwiderstandes bewirkt eine Absenkung des Füllfaktors, deshalb

¹Zellen mit DARC haben eine ähnlich geringe Reflexion, wie verkapselte Zellen, nur fällt die Reflexion an der Grenzfläche Luft-Glas weg und die Reflexion ist nicht wegen Totalreflexion an der Glasinnenseite geringer, sondern aufgrund Superposition in der Schicht. Somit wird das Licht anders eingekoppelt als mit Verkapselung.

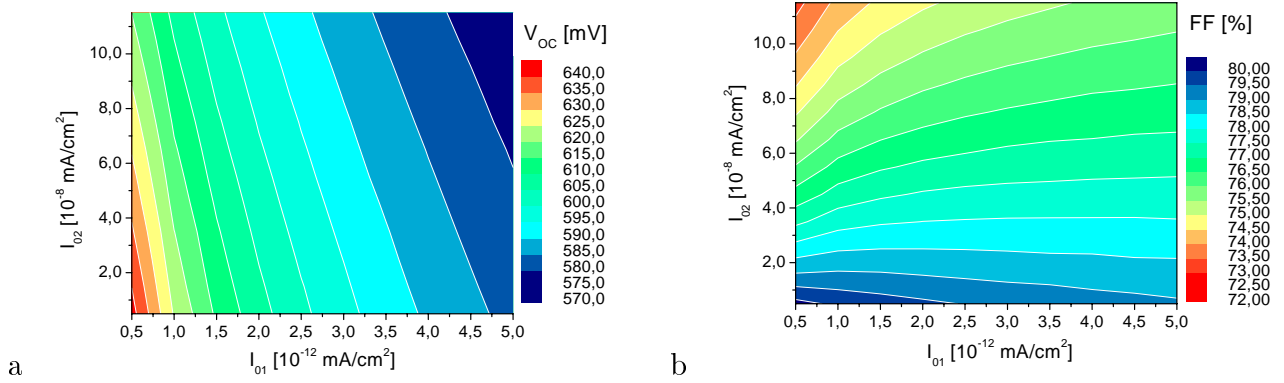


Abbildung 3.5: a) Leerlaufspannung und b) Füllfaktor über die Diodensättigungsstromdichten. Man sieht, dass in dem für Industriesolarzellen typischen Bereich ($J_{01} = 1,4 \cdot 10^{-12} \text{ A/cm}^2$, $J_{02} = 2 \cdot 10^{-8} \text{ A/cm}^2$) die Leerlaufspannung in erster Linie vom Sättigungsstrom der ersten Diode J_{01} beeinflusst wird, während der Sättigungsstrom der zweiten Diode J_{02} hauptsächlich den Füllfaktor beeinflusst.

kann insbesondere bei höherem Schichtwiderstand ein kleinerer Fingerabstand günstiger sein. Dann hat der höhere Serienwiderstand im Emitter durch Vergrößerung der optimalen Fingeranzahl eine Verringerung des Kurzschlussstromes zur Folge. Um die Auswirkungen der einzelnen Faktoren auf die Zellparameter abzuschätzen sind die Zellparameter für texturierte und flache Solarzellen mit $45 \Omega/\square$ Emitter auf Basis des Zwei-Dioden-Modells errechnet (siehe Tabelle 3.3). Es ist eine V-Textur mit einer um den Faktor $Gf=1,34$ größeren Oberfläche berücksichtigt, was in etwa einem Grabenwinkel von 75° entspricht. Die Sättigungsstromdichte des Emitters wurde mit $5 \cdot 10^{-13} \text{ A/cm}^2$ angenommen und dieser Anteil von J_{01} mit dem Geometriefaktor, multipliziert. Entsprechend wurde die Sättigungsstromdichte J_{02} vollständig mit dem Geometriefaktor skaliert. Als Steigerung im Kurzschlussstrom wurde auf Grundlage der Simulationen in Kap. 3 auf 4,4 % relativ angenommen. Sonstige Annahmen über die Zelle sind in Tabelle 2.2 aufgeführt.

Wie erwartet sinkt der Füllfaktor mit zunehmendem Serienwiderstand und auch die Sätti-

Tabelle 3.3: Simulationen auf Basis des Zwei-Dioden-Modells für Solarzellen mit homogenem $45 \Omega/\square$ Emitter und einer V-Textur mit 75° Winkel mit $Gf=1,34$. Es ist zunächst nur der zusätzliche Serienwiderstand im Emitter mit eingerechnet. Dann auch die Diodenströme und schließlich eine Steigerung im Kurzschlussstrom von 4,4% relativ bei verschiedenen Fingerabständen.

$45\Omega/\square$	d mm	J_{01} [A/cm ²]	J_{02} [A/cm ²]	$R_{Em.}$ [Ωcm^2]	η [%]	FF [%]	Jsc [mA/cm ²]	Voc [mV]
untext.	2,4	$1,00 \cdot 10^{-12}$	$2,00 \cdot 10^{-8}$	0,21	15,04	77	31,6	618,1
Text Rs	2,4	$1,00 \cdot 10^{-12}$	$2,00 \cdot 10^{-8}$	0,29	14,97	76,67	31,6	618,1
Text Rs	2,1	$1,00 \cdot 10^{-12}$	$2,00 \cdot 10^{-8}$	0,21	14,98	77,35	31,34	617,9
Text J_{01}	2,1	$1,19 \cdot 10^{-12}$	$2,00 \cdot 10^{-8}$	0,21	14,88	77,35	31,34	613,8
Text J_{02}	2,1	$1,00 \cdot 10^{-12}$	$2,74 \cdot 10^{-8}$	0,21	14,86	76,87	31,34	616,80
Text 0%	2,1	$1,19 \cdot 10^{-12}$	$2,74 \cdot 10^{-8}$	0,21	14,77	76,89	31,34	612,7
Text 4,4%	2,1	$1,19 \cdot 10^{-12}$	$2,74 \cdot 10^{-8}$	0,21	15,42	76,78	32,72	614,0
Text 4,4%	2,25	$1,19 \cdot 10^{-12}$	$2,74 \cdot 10^{-8}$	0,25	15,42	76,45	32,85	614,1
Text 4,4%	2,4	$1,19 \cdot 10^{-12}$	$2,74 \cdot 10^{-8}$	0,29	15,42	76,07	32,99	614,2
$\Delta 4,4\%$ [%]	2,4	19	35	35	2,53	-1,21	4,4	-0,63

gungsstromdichten bewirken eine Absenkung von Leerlaufspannung und Füllfaktor. Zwar sind alle Effekte klein, aber keiner ist zu vernachlässigen.

In einem nächsten Schritt wurden zwei verschiedene V-Profile unmittelbar miteinander verglichen. Zum einen, das oben schon erwähnte 75 °-Profil, für das eine Steigerung im Kurzschlussstrom von 4,4% angenommen wird und dann 100 ° Profil mit einem Geometriefaktor von $G_f=1,15$ für das eine Steigerung im Kurzschlussstrom von 3,7 %relativ angenommen wird. Zunächst wird für die gleichen Daten wie oben die Rechnung für das 100 ° Profil wiederholt, dann für ein 55 Ω/\square -Emitter betrachtet, wobei angenommen wird, dass 0,5 mA/cm² mehr Strom generiert werden und der mit der Emitterfläche skalierte Emittersättigungsstromdichte aufgrund geringerer Rekombination im Emitter nicht $5 \cdot 10^{-13}$ mA/cm², sondern $4 \cdot 10^{-13}$ mA/cm² ist. Es wird jeweils der optimale Fingerabstand verwendet. Wenn es in der zweiten Nachkommastelle beim Wirkungsgrad keinen Unterschied gibt, wird derselbe Fingerabstand verwendet wie für untexturierte Zellen. Da der Fingerabstand nicht frei skaliert werden kann, sondern ein vielfaches des Grabeabstandes + Plateauband sein muss, sind auch die Werte für die flachen Zellen jeweils leicht unterschiedlich, dies hat jedoch keine signifikante Auswirkung auf den Wirkungsgrad. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3.4 aufgelistet.

Für beide Emitter ist die Steigerung im Wirkungsgrad bei Verwendung des 100 °-Profils höher als beim 75 °-Profil. Jedoch ist beim 55 Ω/\square -Emitter der Unterschied kleiner. Dies liegt am niedrigerem Emittersättigungsstrom und damit geringeren Verlusten in der Leerlaufspannung aufgrund der Oberflächenvergrößerung.

Die Werte für das 100 ° Profil sind denen des Profil C aus der DESSIS Simulation sehr ähnlich. Dies bestätigt, dass die Betrachtungen sinnvoll sind. Der Abfall im Füllfaktor und Leerlaufspannung ist von den Absolutwerten der Diodensättigungsströme abhängig. Diese variieren natürlich auch mit der Materialqualität. Je höher die Lebensdauer, desto geringer die Diodensättigungsströme. Bei Material mit hoher Lebensdauer ist der Gewinn in durch die erhöhte Einsammelwahrscheinlichkeit geringer. Deshalb ist eher davon auszugehen, dass der Gewinn im Wirkungsgrad durch die V-Textur höher ist, je geringer die Lebensdauer ist.

Tabelle 3.4: Nach dem Zwei-Dioden-Modell errechnete Werte für mechanisch texturierte und flache Solarzellen mit 45 Ω/\square und 55 Ω/\square Emitter. Variiert wird der Schichtwiderstand und die Texturgeometrie, also die Oberflächenvergrößerung (Geometriefaktor G_f). Die Steigerung im Kurzschlussstrom wurde auf Basis der Simulationen in Kap. 3 zu 3,7 % bzw. 4,4 % abgeschätzt.

45 Ω/\square	d mm	J_{01} [A/cm ²]	J_{02} [A/cm ²]	$R_{Emitter}$ [Ωcm^2]	η [%]	FF [%]	Jsc [mA/cm ²]	Voc [mV]
untext	2,2125	$1,00 \cdot 10^{-12}$	$2,00 \cdot 10^{-8}$	0,18	15,04	77,32	31,48	618
Text 100	2,2125	$1,08 \cdot 10^{-12}$	$2,30 \cdot 10^{-8}$	0,21	15,49	76,92	32,64	616,8
Δ [%]	0,00	8,00	15,00	16,67	2,99	-0,52	3,70	-0,19
55 Ω/\square								
untext	2,2125	$9,00 \cdot 10^{-13}$	$2,00 \cdot 10^{-8}$	0,14	15,38	77,51	31,94	621
Text 100	2,2125	$9,61 \cdot 10^{-13}$	$2,30 \cdot 10^{-8}$	0,16	15,84	77,11	33,12	620
Δ [%]	0,00	6,78	15,00	14,29	2,99	-0,52	4,20	-0,16
untext	2,4	$9,00 \cdot 10^{-13}$	$2,00 \cdot 10^{-8}$	0,21	15,33	76,97	32,07	621,1
Text 75	2,25	$1,04 \cdot 10^{-12}$	$2,69 \cdot 10^{-8}$	0,25	15,74	76,43	33,33	617,7
Δ [%]	-6,25	15,56	34,50	19,05	2,67	-0,70	3,93	-0,55

3.2.5 Schlussfolgerungen für maximale Wirkungsgradsteigerung

Die theoretischen Betrachtungen ergeben, dass der mögliche Wirkungsgradgewinn entscheidend von der Oberfläche des Vergleichsmaterials abhängt. Hier ist zu unterscheiden zwischen einer flachen Oberfläche und einer untexturierten jedoch bei Verwendung einer alkalischen Defektätzung. Desweiteren ist der mögliche Wirkungsgradgewinn abhängig von der Lebensdauer des Materials, der Rückseitenrekombinationsgeschwindigkeit sowie dem Grabenwinkel. Sofern die Rekombination in der Raumladungszone mit der Oberfläche skaliert, wie dies bei Industriesolarzellen der Fall ist, und nicht durch Metallisierung oder Randeffekte dominiert wird, ist ein kleiner Grabenwinkel von etwa 40° von Nachteil. Der zusätzliche Gewinn im Kurzschlussstrom durch verbesserte Einsammelnwahrscheinlichkeit überwiegt nicht die Verluste in der Leerlaufspannung und im Füllfaktor. Um einen hohen Wirkungsgradgewinn zu erreichen, muss also die Rekombination in der Raumladungszone und im Emitter möglichst niedrig gehalten werden. Da für die Reflexionsreduktion der Krümmungsradius im Grabenboden eine entscheidene Rolle spielt, muss dieser möglichst gering gehalten werden. Der optimaler Grabenwinkel für verkapselte Solarzellen liegt somit bei ca. 100° . Es kann im Vergleich zu alkalisch geätzten Zellen mit TiO_2 -ARC maximal 2,5-3% Gewinn im Kurzschlussstrom durch Reflexionsreduktion erzielt werden, zusätzlich etwa die 1% relativ durch verbesserte IQE. Durch die größere Emitterfläche und den höheren Serienwiderstand wird der Wirkungsgrad um etwa 0,7% relativ reduziert. Unter der Voraussetzung, dass es keine Verluste im kurzwelligen Bereich der IQE gibt, liegt damit der maximal erzielbare Gewinn im Modul bei etwa 3 -3,5% relativ im Vergleich zu alkalisch defektgeätzten Solarzellen.

Der Gewinn kann natürlich größer sein, falls die Rekombination in der Raumladungszone nicht mit der Oberfläche skaliert, wie dies z.B. bei Rückkontaktsolarzellen der Fall ist. Er wird jedoch kleiner sein, wenn aus technologischen Gründen kein Profil erzeugt werden kann, mit dem 3% Reflexionsreduktion bei einem Grabenwinkel von etwa 100° erzeugt werden kann. Spätere Messungen an verkapselten Zellen mit PECVD SiN_x Antireflexbeschichtungen ergaben eine maximale Steigerung im Kurzschlussstrom aufgrund Reflexionsreduktion von 1-2%. Damit wäre auch der maximale Gewinn im Wirkungsgrad im Vergleich zu alkalisch texturierten Solarzellen nur 1-2% relativ.

Kapitel 4

Mechanisches Texturieren von Silizium

Die V-Textur der in dieser Arbeit vorgestellten Solarzellen wird mechanisch mit einem schnell rotierendem Werkzeug erzeugt. Zu Beginn der Arbeit waren keine geeignete Produktionsanlage und Werkzeuge erhältlich, mit denen Wafer entsprechend bearbeitet werden konnten. Deshalb wurden die Strukturen mit einem profiliertem Sägeblatt auf einer Wafersäge eingebracht. Da ein Teil der Arbeit auch die Spezifizierung einer Anlage zur mechanischen Textur und die Untersuchung des Schleifprozesses war wird in diesem Kapitel auf die Grundlagen des Schleifens eingegangen und Anforderungen an Werkzeug und Maschine beschrieben. Dann werden die wichtigsten Faktoren zur Optimierung der Ausbeute diskutiert und abschließend das Verfahren der mechanischen Mikrotexturierung vorgestellt.

4.1 Grundlagen des Schleifens

Aufgrund der Verwendung eines schnell rotierenden (Schleif-) Werkzeugs ist das Verfahren der mechanischen V-Texturierung dem Schleifen zuzuordnen. Eine Übersicht über Eingangs-, Prozess- und Ausgangsgrößen des Schleifens ist in Abb. 4.1 gegeben.

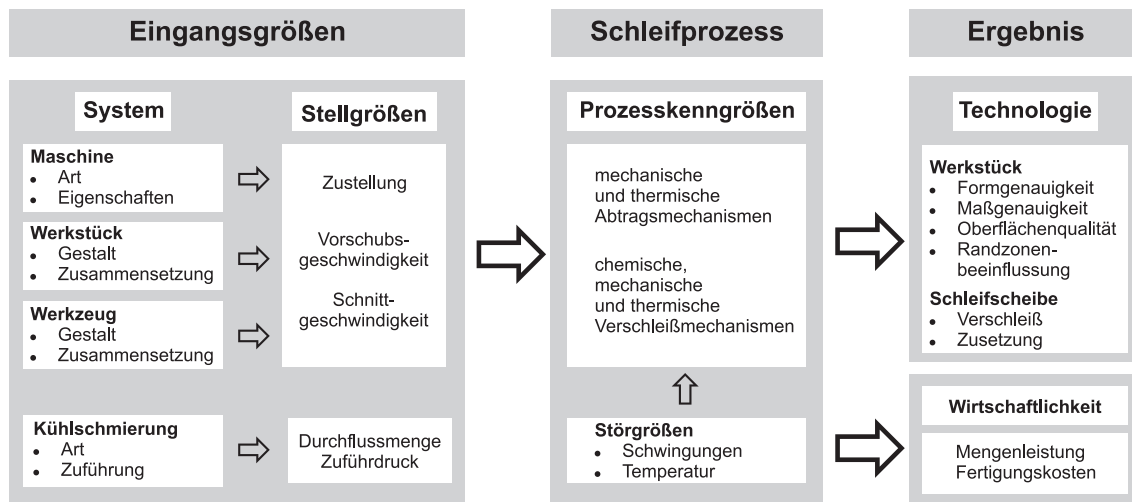


Abbildung 4.1: Übersicht über Eingangs-, Prozess- und Ausgangsgrößen des Schleifens [88].

4.1.1 Schleifparameter

Schleifwerkzeuge

Ein Schleifwerkzeug besteht in der Regel aus einem Grundkörper, der mit einer Schicht belegt ist, die die Schleifkörner enthält. Die Schleifkörner sind statistisch in der Schicht verteilt und weisen jeweils eine oder mehrere Schneiden auf. Der Abstand zweier Schneiden am Werkzeug wird als statischer Schneidenabstand L_{st} bezeichnet (siehe Abb. 4.2 a). Da nicht alle Körner bzw. Schneiden zum Eingriff kommen ist der kinematische Schneidenabstand L_{kin} kleiner als der statische Schneidenabstand (siehe Abb. 4.2 b).

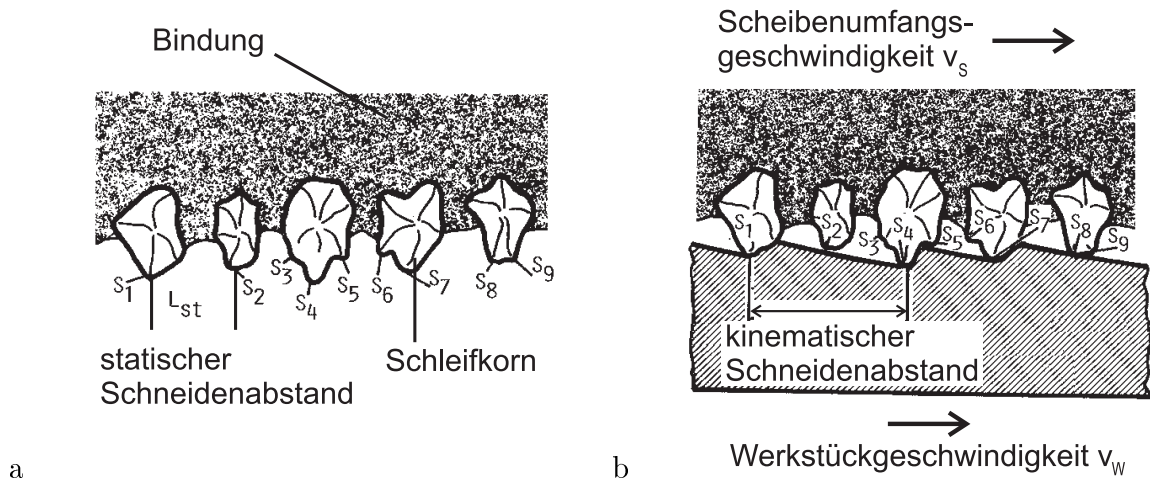


Abbildung 4.2: a) Statischer und b) kinematischer Schneidenabstand eines Schleifwerkzeuges [88].

Schleifvorgang

Das in dieser Arbeit angewandte Schleifverfahren ist dem Planschleifen zuzuordnen, weil das Werkstück eine plane Oberfläche aufweist und z. B. nicht rund ist. Einige grundlegende Schleifparameter sind in Abb. 4.3 dargestellt:

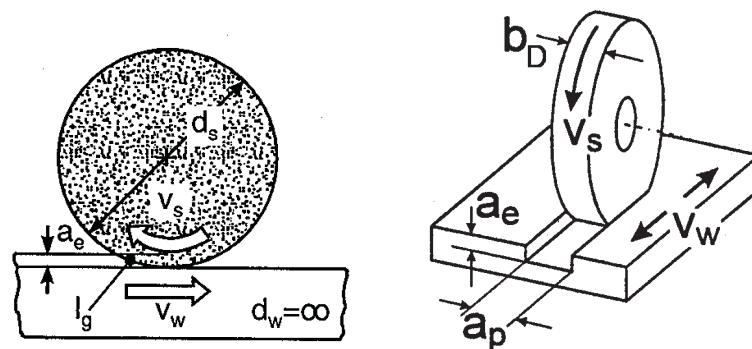


Abbildung 4.3: Schleifparameter beim Planschleifen. In dieser Arbeit wird das Planschleifen mit einem profilierten Schleifwerkzeug angewendet [88].

Dabei ist:

Scheibenumfangsgeschwindigkeit	v_s
Werkstückgeschwindigkeit	v_w
Werkzeughdurchmesser	d_s
Spindelfrequenz	$f = \frac{v_s}{\pi \cdot d_s}$
Zustellung	a_e
geometrische Kontaktlänge	$l_g = \sqrt{a_e + d_s}$
effektive Schleifbreite	b_D

Zur Charakterisierung des Schleifprozesses sind Informationen über das Werkstück vor und nach der Bearbeitung, den Prozess selbst, sowie das Werkzeug nötig. Das während der Bearbeitung abgetragene Volumen des Werkstückes bezeichnet man als Zerspanungsvolumen V_w . Das Zeitspanvolumen $Q_w = \frac{dV_w}{dt}$ enthält zusätzlich Informationen über den Prozess. Hier geht die effektive Schleifbreite, bzw die Breite des aktiven Schleifscheibenprofils b_D entscheidend mit ein. Sollen zwei Schleifprozesse miteinander verglichen werden, wird deshalb oft das bezogene Zeitspanvolumen $Q'_w = \frac{Q_w}{b_D}$ verwendet. In dem Fall des mechanischen Texturierens ist das bezogene Zeitspanvolumen:

$$Q'_w = a_e v_w G_{(a_e)} \quad (4.1)$$

Der Geometriefaktor $G_{(a_e)}$ enthält Informationen über das spezifische eingreifende Volumen. Im Falle der Planarisierung ist $G_{(a_e)} = 1$, während er für die V- Textur von der Zustellung abhängig ist. Bei voller Zustellung und für den Fall, dass der Krümmungsradius des Profilbodens gleich dem an der Profilspitze ist, wäre $G_{(a_e)} = 0,5$. Bei den verwendeten Werkzeugen ist jedoch aufgrund des Herstellungsverfahrens der Krümmungsradius im Profilboden größer, so dass der Geometriefaktor etwa 0,6 ist.¹ Bei einer Zustellung von 0,07 mm und einer Werkstückgeschwindigkeit von 50 mm/s liegt das bezogene Zeitspanvolumen damit bei $Q'_w = 0,07 \text{ mm} \cdot 50 \text{ mm/s} \cdot 0,6 = 2,1 \text{ mm}^2/\text{s}$.

Ein weiterer Parameter zur Charakterisierung des Prozesses ist die äquivalente Spannungsdicke :

$$h_{c\text{ueq}} = \frac{Q'_w}{v_c} \quad (4.2)$$

Dabei ist v_c die Schnittgeschwindigkeit, die hier mit der Scheibenumfangsgeschwindigkeit v_s gleichgesetzt werden kann. Die äquivalente Spannungsdicke ist die Dicke eines theoretischen Spanungskörpers, der vom Eintritt bis zum Austritt eines Schneidflächenelementes abgetragen würde. Ist der statische Schneidenabstand bei zu vergleichenden Schleifwerkzeugen gleich, so ist bei dem Schleifwerkzeug, das die kleinste Spannungsdicke erzeugt, die geringste Schnittkraft zu erwarten. Die Schnittkraft setzt sich aus der Axialkraft F_a parallel zur Werkzeugachse, der Tangentialkraft F_t in Umfangsrichtung und der Normalkraft F_n in Richtung der Zustellung zusammen. Zur Charakterisierung der Reibungsverhältnisse zwischen Schneiden und Werkstück kann das Schnittkraftverhältnis verwendet werden:

$$\mu = \frac{F_t}{F_n} \quad (4.3)$$

¹Die Werkzeuge werden zunächst profiliert und dann mit einer Abriebschicht belegt. Bei dieser Belegung vergrößert sich der Krümmungsradius an der Werkzeugspitze und damit im Profilgraben des Wafers.

4.1.2 Schleifen von Silizium

Beim Schleifen von sprödharten Werkstoffen, zu denen Silizium gehört, erfolgt sowohl der Ausbruch von Materialpartikeln als auch Deformation. Welche der beiden Erscheinungsformen dominiert, richtet sich nach dem Material und den Schleifparametern. Abb. 4.4 a-f zeigt das Materialverhalten bei Einwirken einer Normalkraft mit den verschiedenen Erscheinungsformen. Bei geringer Normalkraft wird nur das Material verformt, steigt die Kraft bildet sich unterhalb der Kontaktstelle ein Riss (Abb. 4.4 a-c). Nimmt die Normalkraft wieder ab, schliesst sich der axiale Riss teilweise und es bilden sich radiale Risse (siehe Abb. 4.4 d-e). Bei vollständiger Entlastung erweitern sich die radialen Risse und können zum muschelförmigen Abplatzen von Material führen. Wird nun das Schleifkorn entlang der Oberfläche bewegt, entsteht bei geringer Normalkraft eine Spanspur mit maximaler Tiefe h_{cu} , was als duktiler Schleifverhaltens ² bezeichnet wird. Sprödes Schleifverhalten liegt bei höherer Normalkraft vor, wobei die Tiefe h_{cu} zunimmt und laterale sowie axiale Risse auftreten, die zum Abplatzen von Material führen (Abb. 4.4 g-h).

Das duktile und spröde Spanverhalten kann auch anhand von Ritzversuchen in Silizium beobachtet werden (siehe Abb. 4.5). Bei geringem Anpressdruck wird eine Spanspur ohne Ausbrüche erzeugt, während bei hohem Anpressdruck deutlich zu sehen ist, wie Siliziumstücke ausbrechen.

Den Eingriff eines Schleifkorns in das Material kann man in drei Phasen unterteilen (siehe Abb. 4.6) [88]:

- 1.) Das Korn reibt am Werkstoff, es kommt zur elastischen Verformung
- 2.) Es tritt zusätzlich plastische Verformung und innerer Reibung im Werkstoff auf.
- 3.) Zusätzlich kommt es zur Spanabnahme.

Der Oberflächenschaden bei der mechanischen Bearbeitung lässt sich mit folgenden Modellen beschreiben (siehe Abb. 4.7). Nach Hadamovsky folgt auf eine dünne polykristalline

²Unter "duktil" versteht man in der Kristallphysik das Verformen eines Kristalls, dies ist bei der mechanischen Bearbeitung von Silizium nicht der Fall, trotzdem ist von "duktiler Zerspanung" die Rede, wenn die abgetragene Spandicke so gering ist, dass kein Material aus einer tiefer liegenden Schicht aus dem Kristall herausgerissen wird.

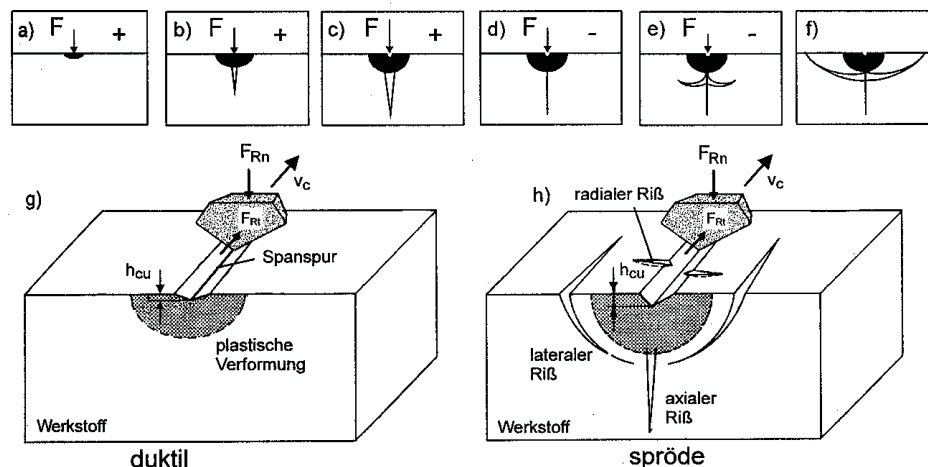


Abbildung 4.4: Modelle zum duktilen und spröden Materialverhalten bei sprödharten Werkstoffen [89], [90], [91].

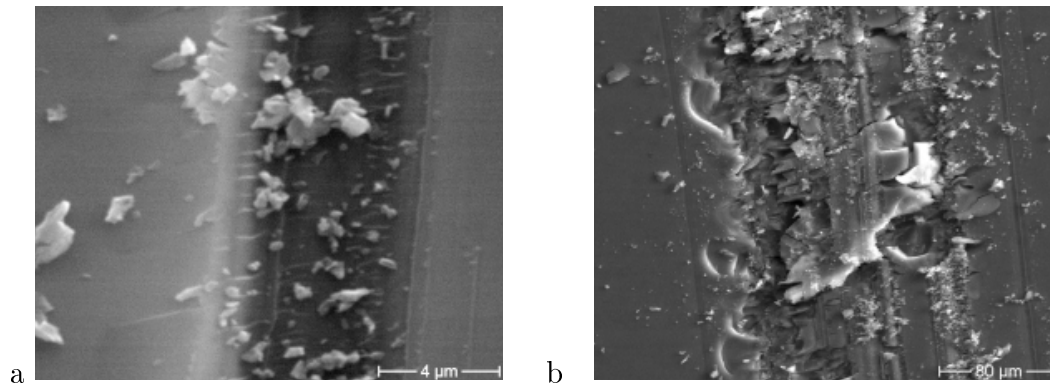


Abbildung 4.5: Spanspur bei a.) geringem und b.) starkem Anpressdruck mit einem Diamantritzer. Das duktile bzw. spröde Schleifverhalten ist deutlich erkennbar. Die Bilder haben nicht denselben Massstab.

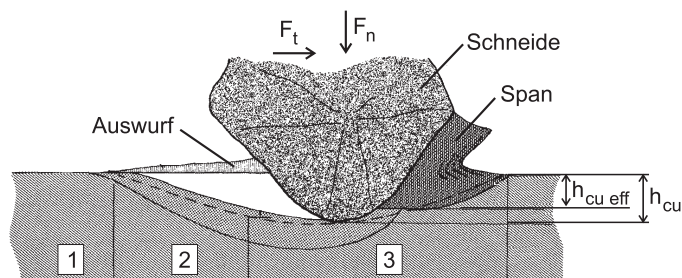


Abbildung 4.6: Zonen elastischer und plastischer Verformung bei der Spanabnahme [88].

Zone³, eine, die von Rissen durchzogen ist. Als nächstes folgt eine Übergangzone, in die noch Risse hineinreichen und in der das Material verspannt ist. Diese Zone geht in den unverspannten Kristall über [93]. Alternativ folgt bei dem Modell von Gert [92] auf

³Bei diesen Modellen ist mit "polykristalline Zone" ein Bereich gemeint, der viele kleine Kristallite und eine hohe Versetzungsdichte aufweist und aus dem vorher einkristallinen Material durch die mechanische Belastung erzeugt wurde. Dies ist nicht zu verwechseln mit dem Begriff "polykristalline Wafern", der oft gleichwertig zu "multikristallinen Wafern" gebraucht wird.

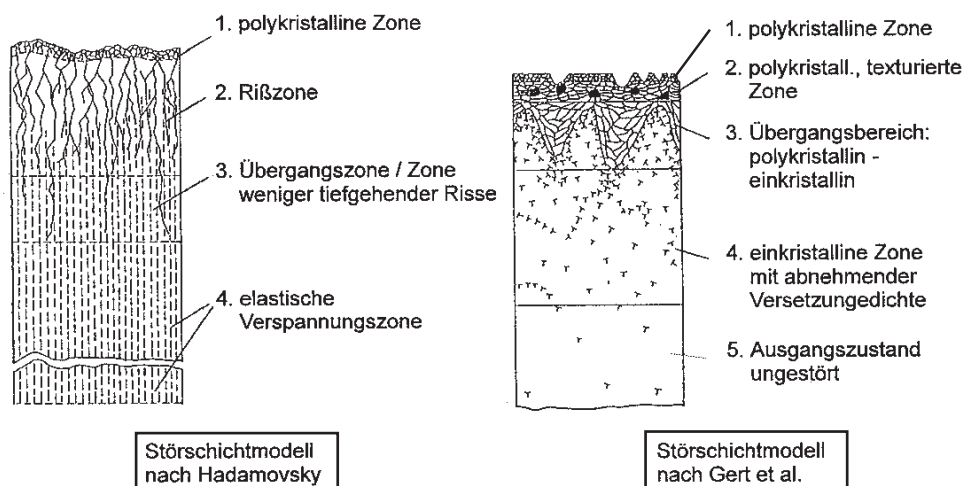


Abbildung 4.7: Störschichtmodelle für mechanisch bearbeitete Werkstoffe [92] [93]

die polykristalline Zone eine Zone mit hoher Versetzungsdichte, in der unterschiedliche Kristallorientierungen vorliegen. Die Versetzungsdichte nimmt mit der Tiefe ab bis der Ausgangszustand des ungestörten Materials erreicht ist.

Die Schädigung des Materials tritt bei jeder spröden Bearbeitung auf, also sowohl beim mechanischen Texturieren, als auch beim Sägen der Wafer vom Block mit einer Draht- oder Innlochsäge. Da die Kristalldefekte als Rekombinationszentren wirken, muss die geschädigte Schicht, bei Solarzellen oft als "Sägeschaden" bezeichnet, entfernt werden. Dies geschieht in der Regel nasschemisch.

4.1.3 Verschleiß von Werkzeugen

Neben den Deformationen des Werkstückes kommt es durch die mechanische Belastung auch zum Verschleiß des Werkzeuges. Die auf die Schleifkörner wirkenden Kräfte bewirken entweder einen Bruch des Kornes oder ein Abstumpfen der Schneiden (siehe Abb. 4.8).

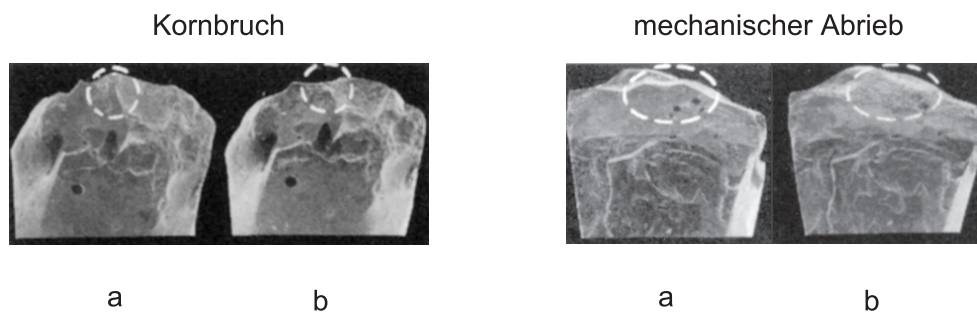


Abbildung 4.8: Der Verschleiß eines Schleifkorns führt zu Kornbruch (links) oder Abstumpfen der Schneiden (rechts) [88].

Die Verschleißmechanismen hängen entscheidend von den Schleifparametern ab. So beobachtet man bei geringem bezogenem Zeitspannvolumen hauptsächlich einen Mikroverschleiß, also Abrieb von Schleifkörnern und Kornbruch, während bei großem bezogenen Zeitspannvolumen der teilweise und vollständige Kornausbruch dominiert (siehe Abb. 4.9). In das bezogene Zeitspannvolumen geht die Werkstückgeschwindigkeit, jedoch nicht die Scheibenumfangsgeschwindigkeit ein. Auf mikroskopischer Ebene hat eine Erhöhung der Scheibenumfangsgeschwindigkeit ähnliche Auswirkung wie eine Absenkung der Werkstückgeschwindigkeit. Deshalb kann man davon ausgehen, dass die Verschleißmechanismen ähnlich von der Abnahme der Scheibenumfangsgeschwindigkeit wie von der Zunahme des bezogenen Zeitspannvolumens abhängen.

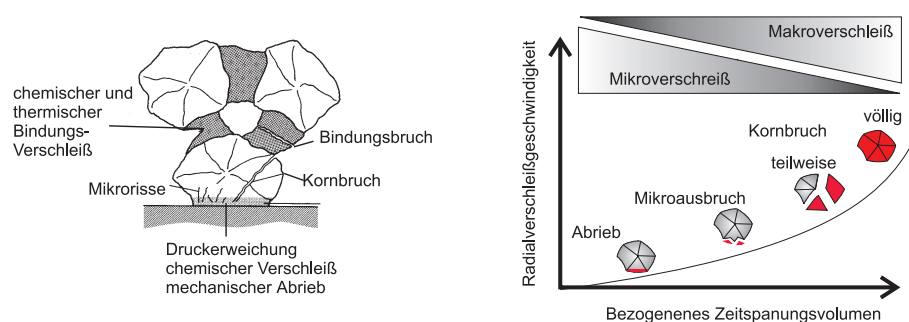


Abbildung 4.9: Verschleiß eines Werkzeuges auf Korn- und Werkzeugebene [88].

Die Verschleissmechanismen hängen offensichtlich auch von der Bindung, in der die Schleifkörner gehalten werden, ab. Sie ist optimaler Weise so stark, dass die Körner zunächst abgenutzt werden, also ein Mikroverschleiss auftritt. An einem stumpfen Korn wirken höhere Kräfte, so dass es letztendlich aus der Bindung gerissen wird (siehe Abb. 4.10). Bei einem einschichtig belegten Werkzeug muss dann der Belag erneuert werden, während bei einem mehrschichtigen Schleifbelag entweder beim Schleifprozess selbst neue Schleifkörner freigelegt werden oder durch Dressen Bindungsmaterial zwischen den Schleifkörnern entfernt wird, damit neue Schneiden eingreifen können. Bei Kornausbruch steigen die Schleifkräfte und im Falle von Si - Wafern kommt es zu verstärktem Waferbruch.

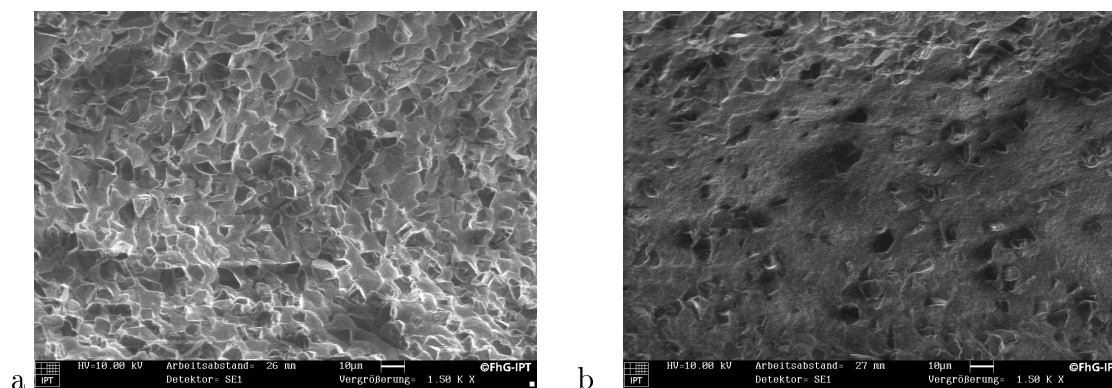


Abbildung 4.10: a) Neue Abriebschicht eines einschichtig belegten Werkzeuges. b) Abgenutzte Abriebschicht eines einschichtig belegten Werkzeuges. Die Schleifkörner sind aus der Bindung gebrochen.

Neben den bisher behandelten Schleifparametern haben Art, Menge und Zuführung des Kühlmittels deutlichen Einfluss sowohl auf das Schleifergebnis als auch auf die Standzeit des Werkzeuges. Das Kühlmittel muss zum einen die beim Schleifen entstehende Wärme abführen und auch die entstandenen Schleifspäne abtransportieren.

4.2 Mechanisches V-Texturieren für Solarzellen

Das Verfahren der mechanischen Textur von Siliziumwafern zur Herstellung von Solarzellen wurde erstmals 1990 mit einem U - förmigen Sägeblatt von Nuno angewandt [94] und dann von Willeke et al. an der Universität Konstanz aufgegriffen und weiterentwickelt [95]. Die Strukturtiefe ist in der Größenordnung von ca. $50 \mu\text{m}$ und ist somit relativ zur Waferdicke von ca. $330 \mu\text{m}$ als makroskopisch anzusehen.

Im Rahmen der Entwicklung an der Universität Konstanz wurde zunächst mit einem V-förmigen Sägeblatt Schnitte in Wafer eingebracht (siehe Abb. 4.11 und 4.12a). Diese Methode hat den Vorteil, dass sie sehr flexibel ist, der Abstand zwischen zwei Gräben kann leicht verändert werden. Allerdings dauert das Texturieren sehr lange, da ca. 1000 Schnitte für die vollständige Texturierung eines $12,5 \times 12,5 \text{ cm}^2$ großem Wafer nötig sind. Der nächste Schritt war das Multiblattverfahren: Es werden mehrere Sägeblätter auf einen Flansch gespannt und somit kann die zur Texturierung nötige Zeit um ein vielfaches vermindert werden (siehe Abb. 4.11). Doch auch diese Methode ist industriell nicht anwendbar, da ein Werkzeug z. B. aus 500 Sägeblättern aufgebaut zu teuer wäre und es schwierig ist, die nötigen Toleranzen für Distanzscheiben im Bereich von wenigen Mikrometern einzuhalten. Deshalb wurde ein Texturierungswerkzeug entwickelt, mit dem bei geeigneter Länge ein Siliziumwafer mit einem Schnitt texturiert werden kann.

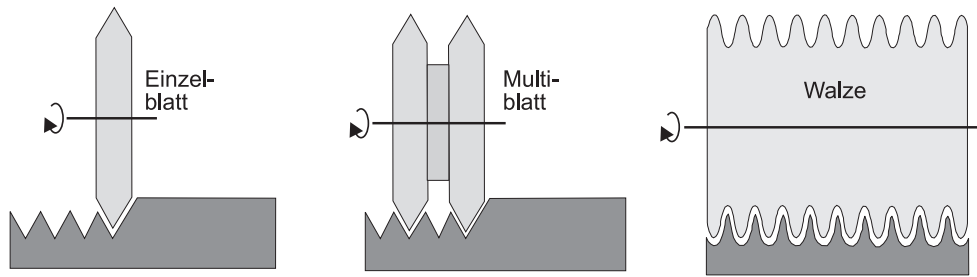


Abbildung 4.11: Texturierung eines Siliziumwafers unter Verwendung eines Einzelblattes, Multiblattes und Texturierungswerkzeuges [96].

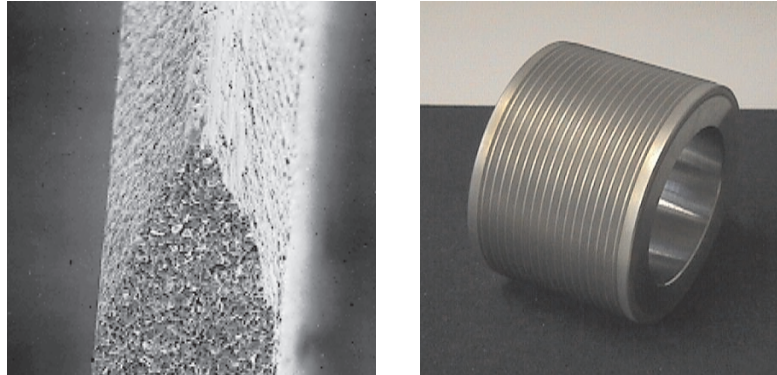


Abbildung 4.12: a) Elektronenmikroskopaufnahme eines V - förmigen Sägeblattes. b) Photo eines Texturierungswerkzeuges

4.2.1 Optimierung der Schleifparameter

Anforderungen

Ob die Anwendung der mechanischen Textur in einer Produktionslinie kosteneffektiv ist hängt vom mittleren erzielten Wirkungsgradgewinn und den aufgewendeten Kosten ab. Da der Wafer einen großen Anteil an den Produktionskosten hat, ist es wichtig, dass durch den zusätzlichen Prozessschritt weniger als 0,5 % der Wafer zerbrechen. Desweiteren darf die Standardabweichung der Wirkungsgradverteilung nicht vergrößert werden, also neben der mechanischen Ausbeute auch die elektrische Ausbeute in der Produktion nicht erniedrigt werden. Viele Hersteller von Solarzellen verlangen, dass mit einer Anlage bis zu 1200 Wafer/h bearbeitet werden können, da dies dem Durchsatz einer modernen Produktionslinie entspricht.

Damit die von der Stückzahl abhängigen Kosten nicht zu hoch werden ist es erforderlich, dass die Werkzeuge eine Standzeit von mehr als 50000 Wafern aufweisen. Um einen hohen Wirkungsgradgewinn zu erreichen muss der Krümmungsradius im Wafergraben bzw. Werkzeugspitze möglichst gering sein. Da der Krümmungsradius beim Ätzen mit einer alkalischen Lösung vergrößert wird, sollte die geschädigte Schicht an der Oberfläche (Sägeschaden) gering gehalten werden.

Anpassung der Maschine

Die ersten Experimente wurden mit einer Wafersäge vom Typ DISCO DAD 320 durchgeführt, die dafür ausgelegt ist, mit einem etwa $100\ \mu\text{m}$ breiten Sägeblatt Wafer zu trennen. Für diesen Maschinentyp wurden die ersten Werkzeuge mit einer Länge von 25 mm

und einem Durchmesser von 52 mm angefertigt. Da die Maschine keine ausreichende Steifheit aufweist, gerät die Spindel beim Einsatz der Werkzeuge in zu starke Schwingungen, die zum Waferbruch führen. Weiterhin kann mit der vorhandenen Vakuumhalterung der Wafer nicht ausreichend schwingungsfrei fixiert werden. Auf Basis dieser Erfahrungen wurden weitere Tests mit Werkzeugen von 75 mm Durchmesser und einer Länge von 65 mm auf der Wafersäge Disco DAD 341 durchgeführt. Daraufhin wurde von der Firma DISCO eine angepasste Version DAD 341 solar (siehe Abb. 4.13a) auf den Markt gebracht, die mit einer schwingungsarmen Spindel, verbesserter Vakuumhalterung und automatischem Handling ausgestattet ist. Mit dieser Maschine können bis zu 150 Wafer/h bearbeitet werden und sie ist somit für eine Pilotproduktion geeignet. Parallel dazu wurde in Kooperation mit dem FhG IPT Aachen (Fraunhofer Institut für Produktionstechnologie) eine Maschine für hohen Durchsatz (siehe Abb. 4.13b) konstruiert und gebaut. Für diese Maschine können Werkzeuge bis zu 260 mm Länge und 200 mm Durchmesser verwendet werden, so dass gleichzeitig mehrere Wafer bearbeitet werden können. Unter der realistischen Annahme, dass ein automatisches Handling entsprechend schnell die Wafer zu- und abführt, lässt sich mit der vom FhG-IPT Aachen entwickelten Anlage ein Durchsatz von 1200 Wafern/h erreichen [97] [98].

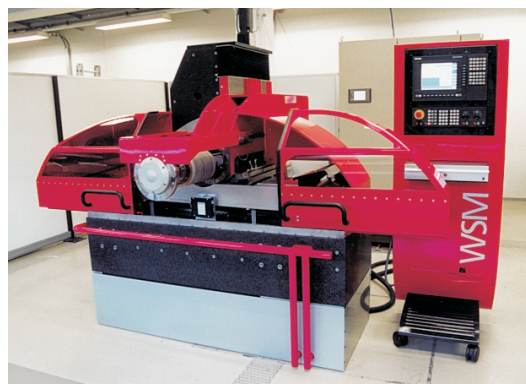
Zur Dimensionierung dieser Maschine wurde an der DAD 320 mit einem 25 mm langem Werkzeug die Schnittkräfte beim mechanischen Texturieren gemessen. Wie zu erwarten nehmen die Schnittkräfte mit steigender Werkstückgeschwindigkeit zu. Auch das Schnittkraftverhältnis steigt mit steigender Werkstückgeschwindigkeit, das heißt, die Tangentialkraft steigt stärker als die Normalkraft (siehe Abb. 4.14a). Bei steigender Zustellung nehmen die Schnittkräfte ebenfalls erwartungsgemäß zu, jedoch sinkt das Schnittkraftverhältnis. Dies zeigt, dass die Normalkraft in erster Linie durch die Zustellung dominiert wird.

Anpassung des Werkzeugs

Grundsätzlich muss die Geometrie und der Schleifbelag auf die Erfordernisse angepasst werden. Aus den Anforderungen für den Durchsatz ergibt sich, dass ein Werkzeug in etwa die Länge der Waferbreite haben sollte, damit die gesamte Waferbreite mit einem Schnitt bearbeitet werden kann. Da die Standardgröße der Wafer zur Zeit $125 \times 125 \text{ mm}^2$ ist, ergibt sich eine Werkzeuglänge von etwa 130 mm. Damit genügend Kühlwasser zugeführt werden kann, hat sich das Indexschnittverfahren bewährt. Dabei wird eine vollständige



a



b

Abbildung 4.13: a) DISCO DAD 341solar, die erste vollautomatische Texturierungsanlage. b) Texturierungsanlage für hohen Durchsatz, die vom FhG IPT entwickelt wurde.

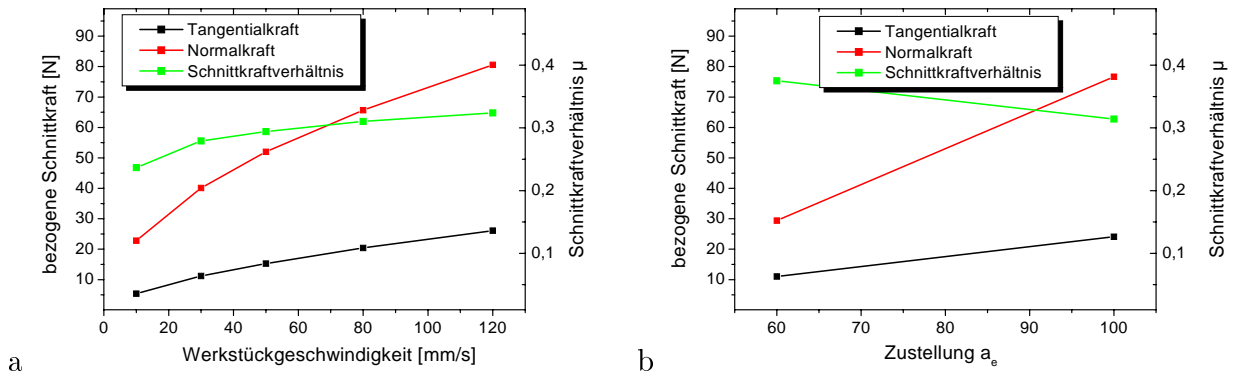


Abbildung 4.14: Schnittkräfte in Abhängigkeit von a) der Werkstückgeschwindigkeit und b) der Zustellung [99].

Texturierung der Oberfläche mit zwei Schnitten erreicht, wobei bei jedem Schnitt jeweils jeder zweite Graben geschnitten wird. (siehe Abb. 4.15). Der zweite Schnitt kann im Gegenlauf durchgeführt werden, also während der Wafer zurückfährt.

Für den Aussendurchmesser sind folgende Gesichtspunkte zu beachten: Je größer der Aussendurchmesser, desto höher die Schnittgeschwindigkeit bei gleichbleibender Umdrehungsfrequenz der Spindel. Je niedriger die Umdrehungsfrequenz, desto ruhiger läuft die Anlage. Auch spricht für einen großen Aussendurchmesser, dass die Belaglänge entsprechend lang ist und dadurch die Standzeit groß und weniger Werkzeugwechsel erforderlich sind. Bei einem ausreichend großen Innendurchmesser kann ein automatisches Wuchtsystem eingebaut werden, was ebenfalls einen ruhigen Lauf bewirkt und somit wichtig für eine hohe Standzeit ist. Fertigungstechnische Grenzen limitieren jedoch den realisierbaren Aussendurchmesser. Schwierig ist hierbei das Einbringen des sehr feinen Profils bei Einhaltung der Rundlaufgenauigkeit und einem akzeptablen Gewicht von unter 20 kg. Damit stellt sich auch die Frage des Materials. Die ersten Generationen der Werkzeuge bestanden aus einem profilierten Messinggrundkörper, der mit einer Abriebschicht belegt war. Als Grundkörpermaterial wurden weiterhin CuBe, Stahl und Keramik sowie Verbundwerkzeuge aus mehreren Materialien zur Gewichtseinsparung getestet. Da die Verbundwerkzeuge in der Herstellung aufwendiger und teurer sind, wird zur Zeit ein Stahlgrundkörper favorisiert.

In Tab. 4.1 sind die Kenngrößen einiger typischer Schleifparameter, wie sie zum Texturieren von Siliziumwafern verwendet werden, aufgelistet. Dabei zeigt sich, dass durch einen größeren Werkzeugdurchmesser auch bei reduzierter Spindelfrequenz höhere Schnitt-

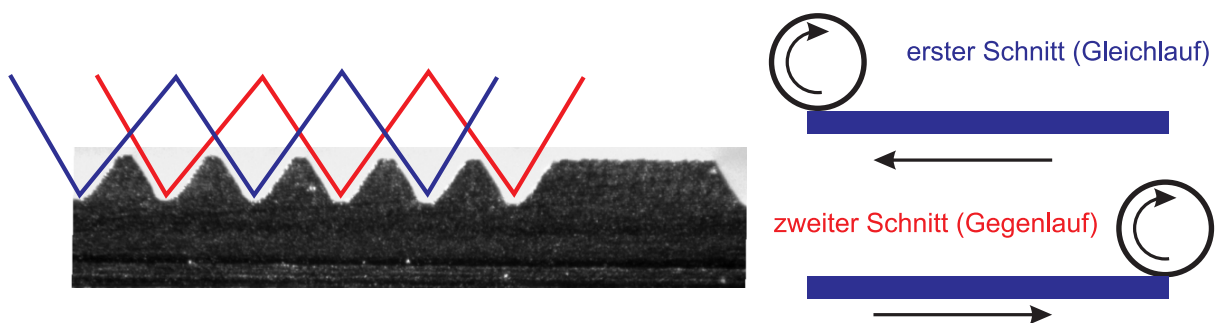


Abbildung 4.15: Beim Indexschnittverfahren wird beim ersten Schnitt im Gleichlauf nur die Hälfte der Gräben erzeugt, die andere Hälfte wird beim Zurückfahren des Werkzeuges im Gegenlauf geschnitten.

Tabelle 4.1: Kenngrößen einiger typischer Schleifparameter, wie sie zum Texturieren von Siliziumwafern verwendet werden könnten.

v_w [mm/s]	f [1000/s]	d_s [mm]	v_s [m/s]	a_e [m]	Q'_w [mm/s]	h_{cuelq} [μ m]	l_g [mm]
25	15	75	59	70	1,75	0,030	2,29
50	15	75	59	70	3,5	0,059	2,29
75	15	75	59	70	5,25	0,089	2,29
25	15	75	59	50	1,25	0,021	1,94
50	15	75	59	50	2,5	0,042	1,94
75	15	75	59	50	3,75	0,064	1,94
25	10	200	105	50	1,25	0,012	3,16
50	10	200	105	50	2,5	0,024	3,16
75	10	200	105	50	3,75	0,036	3,16

geschwindigkeiten und kleinere äquivalente Spannungsdicken erreicht werden können. Bei einer kleineren Spannungsdicke wird ein geringerer Sägeschaden erzeugt und es wirken geringere Kräfte auf den Wafer.

Die zur Zeit eingesetzten Werkzeuge haben einen profilierten Grundkörper, der mit einer Abriebschicht belegt ist. Dafür wurde die Dicke der Abriebschicht und die Diamantkorngröße in der Abriebschicht untersucht. Um einen kleinen Krümmungsradius im Profilboden zu erreichen, muss der Krümmungsradius der Werkzeugspitze entsprechend klein sein. Das hat zur Folge, dass die Abriebschicht möglichst dünn sein soll. Limitierend für die Dicke der Abriebschicht ist die Größe der Diamantkörner, die darin gehalten werden müssen. Ein kleines Korn ist also vorteilhaft. Ebenfalls erzeugt ein kleines Korn kleine Späne, was ebenfalls erwünscht ist. Auf der anderen Seite wird das maximal erreichbare Zeitspanvolumen durch die Geometrie des Kornes bestimmt. Ist das Korn zu klein, kann das erforderliche Volumen wegen der kleinen Späne bzw. der unzureichenden Schnittgeschwindigkeit nicht abgetragen werden und die Schnittkräfte sind sehr hoch. Dies hat viele Ausbrüche auf der Werkstückoberfläche und eine niedrige Werkzeugstandzeit zur Folge. Für den Einsatz auf der Disco DAD 341solar hat sich eine Korngröße von etwa 10 μ m bewährt. Bei der FhG IPT - Anlage könnte evtl. auch ein kleineres Korn bei höherer Schnittgeschwindigkeit eingesetzt werden. Das Konzept des Belegens eines Grundkörpers mit einer Abriebschicht hat den Vorteil, dass das Werkzeug nach Abnutzung des Belages wiederbeschichtet werden kann. Andererseits hat es jedoch den Nachteil, dass die Standzeit des Werkzeuges nicht so hoch ist wie die eines Sägeblattes, welches quasi nur aus einer Abriebschicht besteht. Wird die Abriebschicht mehrschichtig und somit dicker ausgelegt, hat dies den Nachteil, dass der Krümmungsradius der Werkzeugspitzen größer wird und somit auch der Krümmungsradius der Gräben im Siliziumwafer. Dies hat eine geringere Reflexionsreduktion zur Folge. Ziel der Entwicklung ist ein Werkzeug, welches äquivalent zum Sägeblatt aus einem unprofilieren Grundkörper und einer profilierten Abriebschicht besteht (siehe Abb. 4.16b). Welches Werkzeugkonzept das beste ist, kann aufgrund der für Tests nötigen Stückzahl von mehreren hunderttausend Wafern nur bei industriellen Einsatz ermittelt werden. Voruntersuchungen werden zur Zeit in Kooperation mit dem FhG IPT durchgeführt, wobei anstelle von vielen Wafern ein mehrere Zentimeter dickes Siliziumstück heruntergeschliffen wird.

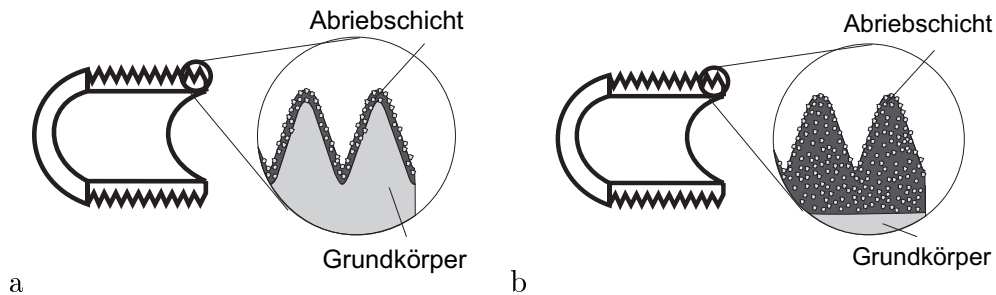


Abbildung 4.16: Texturierungswerkzeug aus a) einem profiliertem Grundkörper, der mit einer Abriebschicht belegt ist und b) aus einem Werkzeug mit einer texturierten Abriebschicht.

4.2.2 Optimierung der Ausbeute

Eine Kernfrage bei der Anwendung der mechanischen Bearbeitung von Wafern für die Solarindustrie ist die Ausbeute. Da der Wafer der Hauptkostenfaktor bei der Herstellung von Siliziumsolarzellen ist, muss der prozessbedingte Bruch von Wafern so gering wie möglich gehalten werden. Insbesondere ist ein Verfahren zu Erhöhung des Wirkungsgrads nicht kosteneffektiv, wenn zu viele Wafer dabei brechen.

Es konnten im Laufe dieser Arbeit zwei Hauptursachen für den Waferbruch gefunden werden. Zum einen Schwingungen bei der Bearbeitung: Dies betrifft die Steifheit der Maschine und insbesondere die Aufhängung der Spindel, aber auch die Halterung des Wafers. Der Wafer wird auf der Spannfläche durch Vakuum gehalten. Kritische Punkte sind der Eintritt des Werkzeuges und das Ende des Wafers, deshalb sind dort zusätzliche Vakuurrillen in der Halterung. Nach der Bearbeitung klebt der Wafer an der Spannfläche, muss aber schnell gelöst werden, um einen hohen Durchsatz zu erreichen. Zum Lösen des Wafers haben sich deshalb eine gleichmäßig auf der Fläche angeordnete Wasser- und Luftzufuhr bewährt (siehe Abb. 4.17a).

Ein weiterer kritischer Punkt ist die Form des Wafers ansich. Nach dem Sägen der Wafer vom Block ist er keinesfalls planparallel, sondern weist neben Dickenvariationen auch Krümmung auf. Während eine einfache Biegung (bow) des Wafers bei der Vakuumspannung ausgeglichen wird, gibt es bei Welligkeit Bereiche des Wafers, die nicht auf der Spannfläche aufliegen (siehe Abb. 4.17b). Durch die bei der Bearbeitung an diesen Stellen wirkende Normalkraft bricht der Wafer.

Tabelle 4.2 zeigt die gebrochenen Wafer in Abhängigkeit vom Warp. Bei einer Stichprobengröße von 50 Wafern zeigen sich erst bei Warpwerten größer $100 \mu\text{m}$ Probleme. Die Experimente wurden auf der DISCO Anlage bei einem Vorschub von 50 mm/s und einer Zustellung von $70 \mu\text{m}$ durchgeführt.

Da nicht auszuschließen ist, dass die mechanische Bearbeitung bei einigen Wafern Haarrisse hervorruft, die erst später im Prozess zum Waferbruch führen, sollte der Warp so gering wie möglich gehalten werden. Um sichere Aussagen machen zu können, welcher

Tabelle 4.2: Abhängigkeit der Ausbeute beim mechanischen Texturieren vom Warp.

warp [μm]	Bruch während der Texturierung
0 - 40	0/50
40 - 100	0/50
100 - 140	12/50

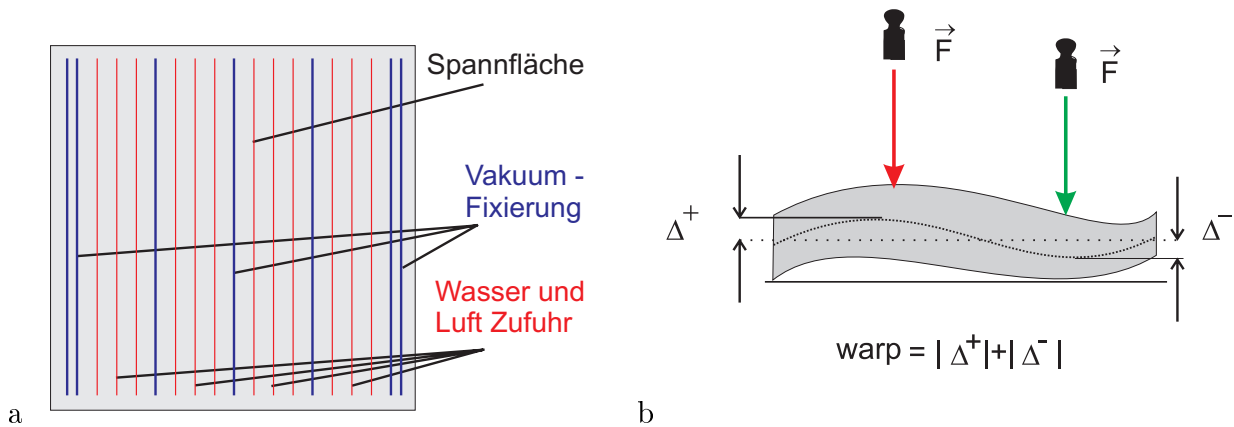


Abbildung 4.17: a) schematische Zeichnung der Vakuumspannvorrichtung für Wafer bei der mechanischen Bearbeitung. b) Definition der Waferwelligkeit (warp). Durch die Normalkraft bricht ein Wafer mit großem warp.

Warp noch toleriert werden kann, muss die Stichprobe deutlich größer sein und sowohl die Schleifparameter als auch die Endprozessierung der Wafer mit eingeschlossen werden. Die besten Ausbeuteergebnisse konnten erreicht werden, wenn der Wafer mit Wachs fixiert wurde (Wachs wird auf der Spannplatte geschmolzen, der Wafer aufgelegt und das Wachs abgekühlt). Dadurch werden zum einen Schwingungen vermieden und der Wafer an jeder Stelle unterstützt. Diese Art der Fixierung ist jedoch industriell nicht für jeden Wafer anwendbar. Eine leicht nachgebende Spanntischoberfläche, die sich an den Wafer anpasst, ist jedoch sicherlich sinnvoll. Erste Versuche, eine Folie auf den Spanntisch zu kleben, die einige Mikrometer nachgeben kann, zeigten positive Ergebnisse.

4.3 Mechanische Mikrotexturierung von Silizium

Die makroskopische V-Textur mit einer Tiefe von ca. $50 \mu\text{m}$ ist zum Bearbeiten "dünner" Wafer der Dicke kleiner als $200 \mu\text{m}$ nicht geeignet. Hierfür wird an der Universität Konstanz am Verfahren der mechanischen Mikrotexturierung gearbeitet. Das Mikrorillenprofil an der Oberfläche wird durch die Projektion aller Schneiden eines zylindrischen Werkzeuges erreicht. Da die Schneiden zufällig entstehen, ist auch das erzeugte Profil zufallsverteilt. Dieses Konzept ist desweiteren insbesondere für Anwendungen geeignet, bei denen es mit einem Materialabtrag, z.B. bei der Planarisierung oder dem Waferrecycling, kombiniert werden kann.

Um ein Rillenprofil zu erhalten, muss idealerweise duktiler Schleifverhaltens vorliegen. Dies ist der Fall, wenn die Spannungsdicke kleiner als $0,064 \mu\text{m}$ [101], die Normalkraft möglichst gering und die Laufruhe der Anlage hoch sein. Betrachtet man die äquivalente Spannungsdicke, so liegt man damit durchaus in dem Bereich, der für duktiler Schleifen erforderlich ist. Duktiler Schleifen wird in der Halbleiterindustrie zum Planarisieren / Polieren der Wafer eingesetzt. Auf den Elektronenmikroskopaufnahmen von Abb. 4.19 sind die Schleifrippen zu erkennen, jedoch ist die Reflexion nicht gering, sondern hoch. Die erzeugten Strukturen liegen in Größenordnung der Wellenlänge und damit ist die Strahlenoptik zur Beschreibung der Reflexion nicht mehr gültig. Dies bedeutet jedoch nicht, dass damit bei der mechanischen Mikrotexturierung zwangsläufig eine spiegelnde Oberfläche entsteht. Wie man an Texturen sehen kann, die z. B. durch reaktive Gase

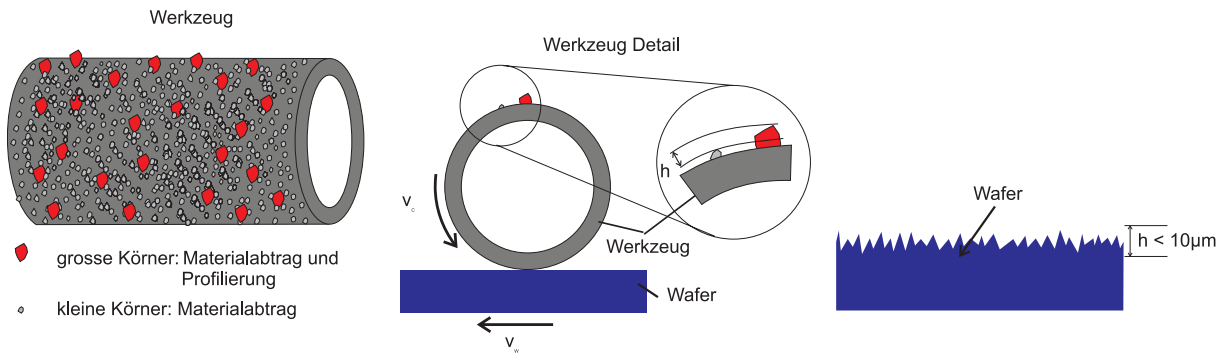


Abbildung 4.18: Idee der Mikrotexturierung: Die Projektion aller Schneiden erzeugt im Wafer ein Mikroprofil. Dafür müssen große Schleifkörner gezielt in eine Matrix kleiner Schleifkörner eingebracht werden [100].

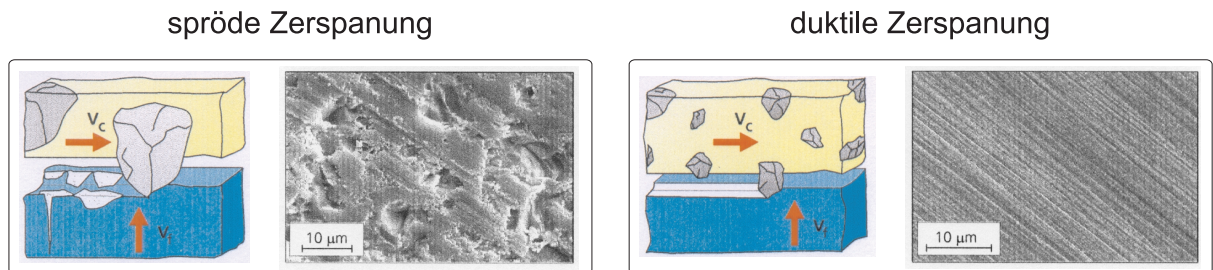


Abbildung 4.19: Duktile und spröde Zerspanung von Silizium. Der Unterschied in den Schleifparametern liegt in der Zustellung und dem verwendeten Schleifkorn. Bei der spröden Zerspanung kann ein deutlich höheres Zeitspanvolumen erzielt werden. [104]

erzeugt wurden, kann durchaus auch bei sehr geringer Profiltiefe eine geringe Reflexion erreicht werden [102] [103].

Um zu testen, ob auch mit der vorhandenen DAD-341 Solar duktiles Schleifen möglich ist, wurde ein Wafer mit verschiedenen Werkstückgeschwindigkeiten und Zustellungen bearbeitet. In Abb. 4.20 sind Elektronenmikroskopaufnahmen dieser Wafer zu sehen. Nur bei geringer Zustellung und geringer Werkstückgeschwindigkeit konnte ein teilweise duktiler Schleifverhaltens erreicht werden. Bei diesen Parametern ist die äquivalente Spannungsdicke so klein, dass duktiler Zerspanen möglich wäre. Um ein flächiges duktiler Schleifverhalten zu sehen, ist die Laufruhe der Anlage jedoch nicht hoch genug. Bei höherer Werkstückgeschwindigkeit und größerer Zustellung ist nur spröder Schleifverhalten zu beobachten.

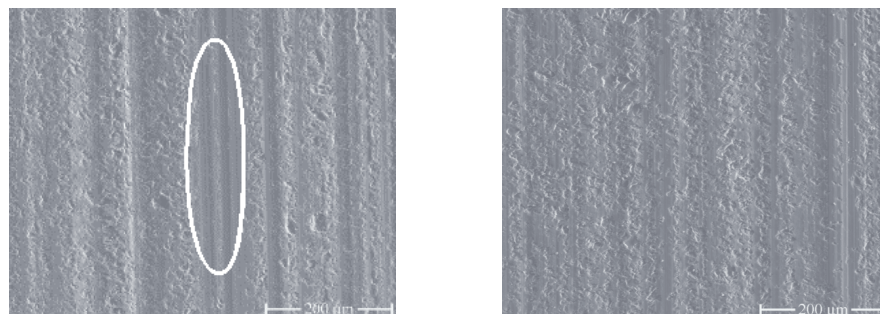


Abbildung 4.20: Mit einem Mikrotexturwerkzeug bearbeitete Wafer: a) Zustellung $a_e = 5 \mu\text{m}$, Werkstückgeschwindigkeit $v_w = 1 \text{mm/s}$, teilweise ist duktiler Schleifverhalten zu sehen (Bildmitte). b) Zustellung $a_e = 50 \mu\text{m}$, Werkstückgeschwindigkeit $v_w = 20 \text{mm/s}$, rein spröder Schleifverhalten.

Kapitel 5

Mechanisch texturierte Solarzellen

Der Prozess von untexturierten Solarzellen kann in Grundzügen für die Fertigung mechanisch V-texturierter Solarzellen übernommen werden, jedoch sind einige Prozessschritte anzupassen. Diese Punkte werden im folgenden beschrieben, um dann auf die Ergebnisse mechanisch texturierter Solarzellen einzugehen. Zunächst beziehen sich die Experimente auf V-texturierte Solarzellen mit homogenem Emitter, wie sie in der Industrie derzeit ohne aufwendige Anpassung der Produktionslinie gefertigt werden können. Abschließend wird kurz auf Solarzellen mit selektivem Emitter für hohe Wirkungsgrade und erste Solarzellen unter der Verwendung der mechanischen Mikrotextrurierung eingegangen. Alle hier beschriebenen Solarzellen habe die Größe $12,5 \times 12,5 \text{ cm}^2$ und entsprechen damit dem heutigen industriellen Standard.

5.1 Anpassung des Prozesses an V-texturierte Solarzellen

5.1.1 Defektätzen

Die erforderliche Ätzdauer ¹ hängt von der Schädigung der Oberfläche ab. Je größer der Diamantkorndurchmesser in der Abriebschicht des Werkzeuges, desto tiefer reichen die Schädigungen in den Wafer und desto länger höher ist die erforderliche Ätzdauer. Beim hier angewendeten mechanischen Texturieren wird die Oberfläche weniger geschädigt als beim Sägen der Wafer aus dem Block mit einer Drahtsäge, deshalb ist eine geringere Ätzdauer ausreichend. Um die ausreichende Ätzdauer zu bestimmen wurden analog zu Kap. 2.2.1 V-texturierte Wafer unterschiedlich lange geätzt und die Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom der Solarzelle betrachtet. In Abb. 5.1 ist die Leerlaufspannung und Kurzschlussstromdichte von mechanisch texturierten und untexturierten Solarzellen über die Ätzdauer aufgetragen. Deutlich ist zu sehen, dass für mechanisch texturierte Zellen eine geringere Ätzdauer ausreichend ist. Durch die Verwendung einer mechanischen Textur wird also nicht nur der Wirkungsgrad gesteigert, sondern auch der Einsatz von Chemikalien reduziert.

¹Die Ätzdauer bezieht sich hier auf eine etwa 80° warme 25%ige NaOH - Lösung

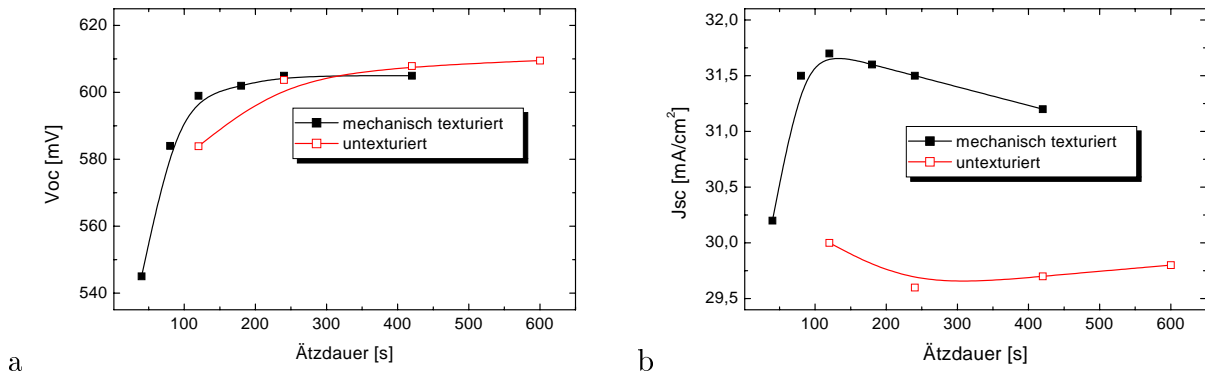


Abbildung 5.1: a) Leerlaufspannung über Ätzdauer von mechanisch texturierten und untexturierten Solarzellen. Für die mechanisch texturierten Solarzellen ist eine geringere Ätzdauer ausreichend. b) Kurzschlussstromdichte von mechanisch texturierten und untexturierten Solarzellen. Bei den mechanisch texturierten Zellen sinkt der Kurzschlussstrom mit der Ätzdauer, wenn der Sägeschaden ausreichend entfernt ist. Das Profil wird zunehmend flacher und Reflexion steigt. Bei den untexturierten Zellen bleibt der Kurzschlussstrom nahezu konstant. Er sinkt zunächst, da durch das Drahtsägen auch eine Textur erreicht wird und zunächst die Reflexion geringer ist. Dann dominiert jedoch die abnehmende Rekombination im Emittor und der Raumladungszone und der Kurzschlussstrom steigt.

5.1.2 Emittordiffusion

Für die in diesem Kapitel betrachteten mechanisch V-texturierten Solarzellen wurden zwei verschiedene Diffusionsmethoden angewendet: Zum einen POCl_3 -Diffusion im Rahmen des Standardprozesses der Universität Konstanz und bei einem Industriepartner, zum anderen Spray-On-Diffusion bei einem weiteren Industriepartner². Bei keiner der beiden Diffusionsmethoden ist eine spezielle Anpassung des Prozesses nötig, es kann der für untexturierte Solarzellen übernommen werden.

5.1.3 Isolation

Eine wichtige Fragestellung ist, ob das in der Industrie häufig verwendete Verfahren des Plasmaätzens zur Isolation auch für mechanisch V-texturierte Solarzellen angewendet werden kann. Beim Plasmaätzen werden die Zellen nach der Diffusion aufeinander gestapelt und der Rand durch reaktive Gase abgeätzt. Wegen der Gräben schließt der Rand nicht als ebene Fläche ab, sondern das Gas kann in die V-Gräben gelangen. Um diesen Effekt sichtbar zu machen, wurde ein V-texturierter mit TiO_2 beschichteter Wafer plasmageätzt. Ein Foto des Eckbereiches ist in Abb. 5.2a zu sehen. Die hellblauen Bereiche sind dickes TiO_2 , der Grenzbereich dunkelblau und der abgeätzte Bereich hellgrau. Um die Grenze hervorzuheben, ist zusätzlich eine Linie eingezeichnet. Das Plasma ätzt deutlich mehr in den texturierten Bereich (oben) herein, als senkrecht dazu (links). Um festzustellen, ob das Plasmaätzen auch für mechanisch V-texturierte Solarzellen verwendet werden kann, wurde ein Experiment mit 100 V-texturierten Zellen in der Pilotlinie von Eurosolare durchgeführt. Nach der Diffusion wurden die Zellen in zwei benachbarte Gruppen aufgeteilt. Die Zellen der einen Gruppe ("Plasma") wurden zur Isolation plasmageätzt, wobei die gleichen Parameter verwendet wurden, die für Standardsolarzellen optimiert worden sind. Bei der anderen Gruppe wurde 2 mm vom Rand der Zelle abgesägt. In Abb. 5.2b ist

²Phosphorsäure wird gleichmäßig auf den Wafer gesprüht und dient in einem Durchlaufofen als Diffusionsquelle. Dieses Verfahren ist in der Industrie weit verbreitet.

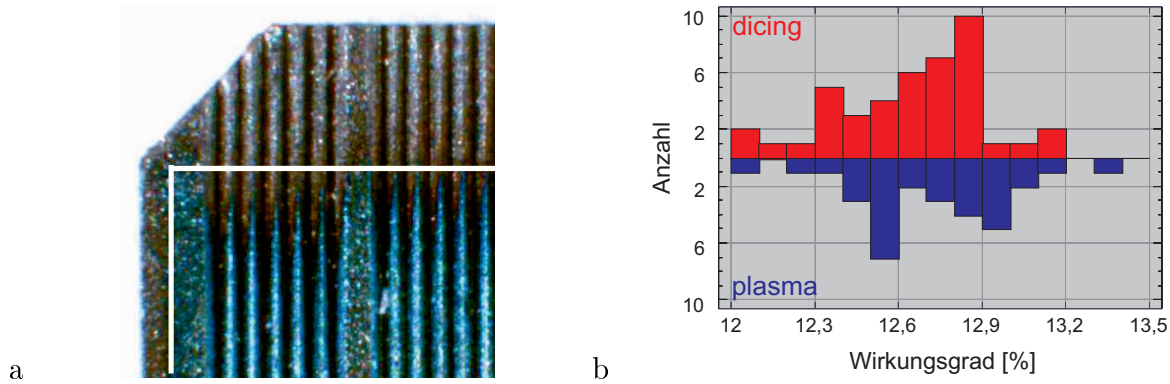


Abbildung 5.2: a) Photo eines texturierten Wafers, der vor dem Plasmaätzen mit TiO_2 beschichtet wurde. Die hellblauen Bereiche sind dickes TiO_2 , dunkelblau ist die Grenze zu sehen und hellgrau ist der abgeätzte Bereich. Um die Grenze hervorzuheben ist zusätzlich eine Linie eingezeichnet. b) Häufigkeitsverteilung der plasmageätzten Solarzellen im Vergleich zu denen, bei denen der Rand abgesägt wurde.

die Häufigkeitsverteilung des Wirkungsgrads der plasmageätzten und randgesägten Zellen gegenübergestellt. Die Gruppe der plasmageätzten Zellen weist eine höhere Streuung auf. Im Mittelwert sind jedoch beide nahezu gleich, die Unterschiede sind so klein, dass nicht auf einen signifikanten Effekt geschlossen werden kann. Es ist also davon auszugehen, dass Plasmaätzen auch für V-texturierte Solarzellen verwendet werden kann.

Ein ähnlicher Versuch für untexturierte Solarzellen ergab einen höheren Wirkungsgrad für die randgesägten Zellen. Bei den plasmageätzten Zellen wird auch ein Teil des Emitters am Randbereich abgeätzt, somit ist die aktive Zellfläche und dadurch auch der Kurzschlussstrom geringer (siehe Kap. 2.2.4). Die wesentlichen Gesichtspunkte der beiden Experimente sind in Tab. 5.1 gegenübergestellt.

Tabelle 5.1: Gegenüberstellung der Experimente zum Plasmaätzen untexturierte und V-texturierter Solarzellen.

	untexturiert	V-texturiert
Zellgröße	10 x 10 cm^2	12,5 x 12,5 cm^2
Antireflexbeschichtung	PECVD SiN_x	TiO_2
BSF	Al-BSF	Al-BSF
höherer Wirkungsgrad	randgesägte Zellen	beide gleich
typ. Shuntwiderstand [Ωcm^2]	5000	2000

Da die Prozesse unterschiedlich waren kann nicht geschlossen werden, dass das Kantenschneiden nur bei den untexturierten Solarzellen vorteilhaft ist. Der Shuntwiderstand der V-texturierten Zellen in diesem Experiment ist unabhängig von der Art der Isolation kleiner, als der der untexturierten Zellen bei der Untersuchung in Kap. 2.2.4. Dies hängt nicht mit der Texturierung zusammen, sondern mit dem unterschiedlichen Prozess, der angewendet wurde. Bei dem Prozess hier wird der Shuntwiderstand also durch andere Faktoren als die Isolation limitiert und somit können Plasmaätzparameter vorteilhaft sein, mit denen weniger vom Rand abgeätzt und dafür ein höherer Strom erreicht wird. Simulationen aufgrund des Zwei-Dioden-Modells zeigen, dass sich bei einem Shuntwiderstand von 2000 Ωcm^2 und einer Kurzschlussstromdichte von 30 mA/cm^2 der gleiche

Wirkungsgrad erreichen lässt³, wie mit einem Shuntwiderstand von $10000 \Omega\text{cm}^2$ und einem Kurzschlussstromdichte von $29,7 \text{ mA/cm}^2$.

Ein weiterer Grund, warum in diesem Experiment die plasmageätzte Zellen nicht signifikant schlechter sind ist die Zellgröße. Bei dem Experiment mit texturierten Zellen liegt ein höheres Fläche/Rand Verhältnis vor (156 cm^2 auf 50 cm Randlänge im Vergleich zu 100 cm^2 Zellfläche zu 40 cm Randlänge). Dadurch wird der Einfluss des Randes geringer. Durch die Unterschiede im Prozess ist es also erklärbar, dass in diesem Experiment das Kantenschneiden keinen signifikanten Vorteil bringt. Generell bietet das mechanische Kantenschneiden sowohl für untexturierte als auch für texturierte Solarzellen zwar den Vorteil, dass der Emitter am Rand nicht angegriffen wird, jedoch kann auch das weitverbreitete Plasmaätzen für V-texturierte Solarzellen verwendet werden.

5.1.4 Antireflexbeschichtung

Grundsätzlich muss nur die Abscheidedauer angepasst werden, so dass das Minimum der Reflexion bei einer Wellenlänge von ca. 600 nm liegt. Bei Verwendung einer Antireflexschicht, die zumindest teilweise gerichtet abgeschieden wird, wie z.B. APCVD⁴- TiO_2 oder PECVD⁵- SiN_x muss die Abscheidedauer entsprechend verlängert werden. Dies ist jedoch vom Profil abhängig. Der Brechungsindex des PECVD SiN_x muss unter Berücksichtigung der Absorption und Reflexion auf Modulebene sowie der Passivierungseigenschaften optimiert werden [105]. Die zu erwartenden Unterschiede für V-texturierte und untexturierte Solarzellen sind so klein, dass sie hier vernachlässigt werden können.

5.1.5 Siebdruck

Der Siebdruck muss in zwei Punkten an die mechanisch V-texturierten Solarzellen angepasst werden. Zum einen werden die Finger auf Plateaus gedruckt, die parallel zu den Gräben verlaufen (siehe 5.3). Dies ist notwendig, da bei Profilen mit verhältnismäßig großem Grabenwinkel die Kontaktfinger im Graben leicht ausschmieren, was zu erhöhten Reflexionsverlusten führt.

Desweiteren müssen Unterbrechungen im Busbardruck an den Profilsitzen vermieden werden. Diese können entstehen, da der Busbar senkrecht über das V-Profil verläuft.

³Diese Rechnung ist bezogen auf eine Einstrahlung von einer Sonne, bei geringerer Einstrahlung hat der Shuntwiderstand einen größeren Effekt. Besteht die Wahl, sollte dem Prozess, der im Normalfall einen hohen Shuntwiderstand liefert, der Vorzug gegeben werden. Dies nicht nur wegen des besseren Wirkungsgrads bei geringer Beleuchtung, sondern vor allem wegen der höheren Prozesssicherheit.

⁴APCVD=Atmospheric Pressure Chemical Vapor Deposition

⁵Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition

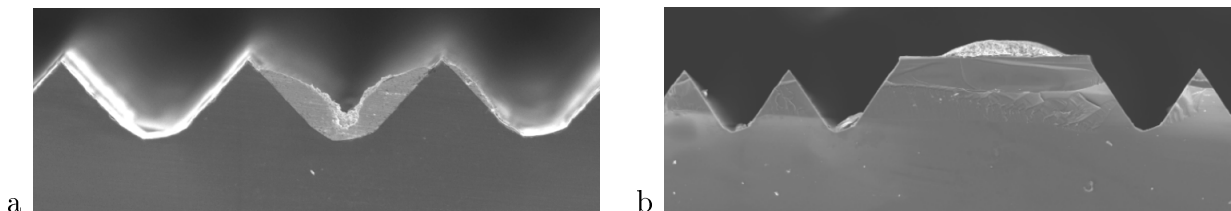


Abbildung 5.3: a) Elektronenmikroskopaufnahme eines Siebdruckkontaktes im Graben. b) Elektronenmikroskopaufnahme eines Siebdruckkontaktes auf einem Plateau. Der Kontakt im Graben schmiert aus und führt zu zusätzlichen Reflexionsverlusten.

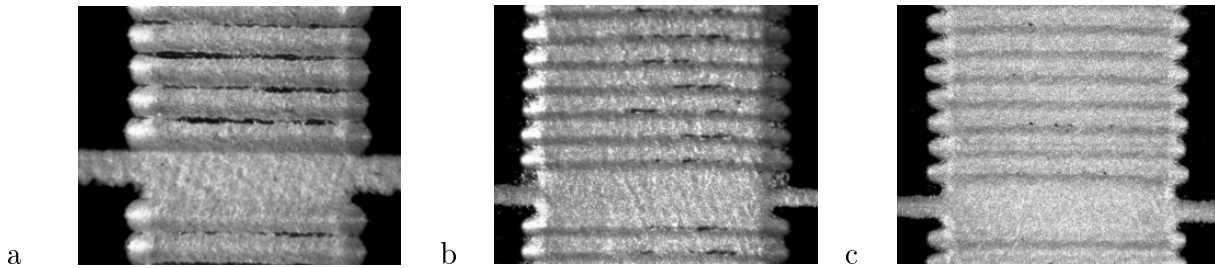


Abbildung 5.4: a) Busbar Druck auf ein 75° Profil aus den ersten Versuchsreihen. An den Spitzen der V-Gräben sind Unterbrechungen sichtbar, die zu einem sehr hohen Serienwiderstand und dadurch Füllfaktoren unter 65% führen. b) Busbar Druck nach Optimierung auf ein 75° Profil, nur noch wenige Unterbrechungen sind zu sehen, der Füllfaktor ist bei guten Feuerbedingungen über 74%. c) Busbar Druck nach Optimierung auf ein 100° Profil, nur sehr wenige Unterbrechungen sind zu sehen, der Füllfaktor ist bei guten Feuerbedingungen über 75%.

Bei Unterbrechungen im Busbar kann die Zelle nicht zuverlässig mit vier Kontaktspitzen jeweils an den Busbarenden gemessen werden. Durch Auflöten eines verzinnenden Kupferbandes, wie es zur Modulherstellung nötig ist werden die Unterbrechungen überbrückt und die Zelle kann normal gemessen werden. Sind die Unterbrechungen nicht vollständig, sondern nur über einen Teil der Busbarbreite kann die Zelle mit mehreren über die Busbarlänge verteilten Spitzen kontaktiert werden, so ist das Messen direkt nach dem Feuern möglich⁶. Für die industrielle Anwendung ist ein durchgehend leitendes Busbar jedoch sinnvoll, um die Zellen wie untexturierte messen zu können. Damit es keine Unterbrechungen an den V-Spitzen des Busbars gibt, muss ausreichend Paste aufgetragen werden, und die Paste muss so beschaffen sein, dass sie nicht in die Gräben läuft, sondern auch auf den Spitzen hält und beim Feuern nicht zu sehr schrumpft. Dies sind allerdings Eigenschaften, die auch für untexturierte Solarzellen vorteilhaft sind, schrumpft die Paste weniger, so sind auch Fingerunterbrechungen seltener. In Abb. 5.4 sind Mikroskopaufnahmen von Busbars auf verschiedenen Profilen zu sehen. Nach der Optimierung des Drucks hinsichtlich der verwendeten Druckparameter sowie der Pasten konnten ausreichend hohe Füllfaktoren erreicht werden (siehe Tabelle 5.2).

V-texturierte Solarzellen haben in der Regel eine geringere Masse, deshalb wärmt sich die Zelle beim Feuern schneller auf. Um die gleiche Temperaturrampe wie bei Standard-solarzellen zu erreichen, muss das Temperaturprofil im Feuerofen entsprechend geändert werden.

5.2 Vergleich verschiedener V-Profile

Die Simulationen in Kap. 3.1 zeigen, dass V-texturierte Zellen mit verhältnismäßig großer Grabenwinkel von etwa 100° einen höheren Wirkungsgrad im Modul aufweisen als mit einem 40° Winkel V-texturierte Zellen. In den folgenden Experimenten werden Zellen mit zwei verschiedenen V-Profilen miteinander verglichen. Dabei handelt es sich um ein 75° -Profil mit einer Profiltiefe von $70\mu\text{m}$ und ein 100° -Profil mit einer Profiltiefe von $50\mu\text{m}$. Die Profiltiefe wurde reduziert, um bei $270\mu\text{m}$ dicken Wafern eine höhere Ausbeute und

⁶Hier ist zu beachten, dass bei einer Vierpunktmessung die Strom und Spannungsspitzen auf geeignetem Potential liegen. Durch das Potentialgefälle auf der Zelle wird sonst die IV-Kurve verfälscht und es kann ein zu hoher Füllfaktor gemessen werden. Der Widerstand im Busbar wird nicht berücksichtigt, wenn für die Messung eine Spannungsspitze verwendet wird, die auf einem mittlerem Potential liegt [106].

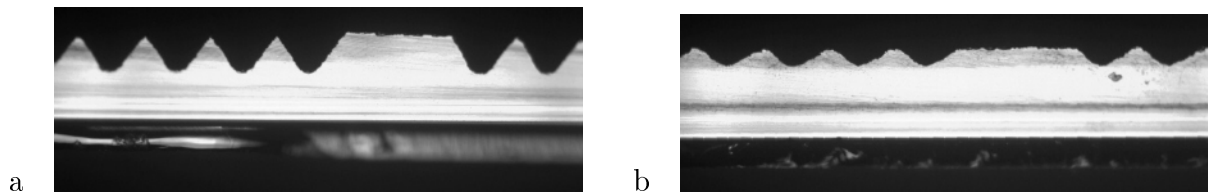


Abbildung 5.5: a) Profil mit 75° Grabenwinkel bei einer Tiefe von $70\mu\text{m}$. b) Profil mit 100° Grabenwinkel bei einer Tiefe von $50\mu\text{m}$.

zu erzielen. In Abb. 5.5 sind die von beiden Profilen Elektronenmikroskopaufnahmen zu sehen.

Beim Experiment 1 wurde der gesamte Prozess im Labor durchgeführt, zur Isolation wurde mechanisches Kantenschneiden verwendet. Experimente 2 und 3 wurden in der Produktionslinie eines Industriepartners durchgeführt, die Isolation erfolgte durch Plasmaätzen. Als Referenz dienten jeweils NaOH geätzte Zellen, die als “untexturiert“ bezeichnet werden, auch wenn sie keine ideal flache Oberfläche aufweisen (siehe dazu auch Abb. 2.2a).

5.2.1 Zellen aus Laborfertigung (Experiment 1)

Um die Auswirkungen der verschiedenen Profile auf die Solarzellen unmittelbar vergleichen zu können, wurden auf benachbarten Wafern je 8 Zellen mit dem 100° -Profil, 75° -Profil sowie ohne Textur. mit dem angepassten Standardprozess unter Verwendung von PECVD SiN_x und Al-BSF hergestellt. In Tabelle 5.2 sind die Zellparameter und die Differenzen der texturierten zu den untexturierten dargestellt.

Wie zu erwartet ist die Kurzschlussstromdichte bei den Zellen mit 75° -Profil am höchsten und die Leerlaufspannung am geringsten. Die Zellen wurden mit leicht unterschiedlichen Parametern gefeuert, die in einem vorangegangenen Experiment optimiert wurden. Der Busbar ist nicht mit einem Tabbing versehen, da die Zellen später zumindest teilweise verkapselt werden sollten. Da die Messung mit zwei Messspitzen je Busbar durchgeführt wurde, ist der Füllfaktor und dadurch auch der Wirkungsgrad nicht sehr aussagekräftig. Durch das Verzinnen des Busbars sinkt der Serienwiderstand im Busbar und der Füllfaktor steigt um etwa 2,5%. Aufgrund der Verluste durch den Serienwiderstand des Emitters und der Diodenströme ist zu erwarten, dass der Füllfaktor der texturierten Zellen bei optimaler Feuerung geringer ist als bei untexturierten Zellen (für eine detaillierte Bewertung der Effekte siehe Tabelle 3.3). Bei den in dieser Arbeit verglichenen Zellen fällt das nicht immer auf, da die Streuung im Füllfaktor in der Größenordnung der zu erwartenden Unterschiede liegt.

Anhand von IV-Messungen (Hell, Dunkel sowie J_{sc} -Voc) können die Zellparameter der

Tabelle 5.2: Mittelwerte und Differenzen zu den untexturierten Zellen von je 8 benachbarten Zellen ohne Verkapselung. Die Messungen wurden mit zwei Messspitzen je Busbar durchgeführt, der Serienwiderstand des Busbars geht also in den Füllfaktor ein.

Parameter	untexturiert	100° Profil	Δ [%]	75° Profil	Δ [%]
J_{sc} [mA/cm^2]	31,5	31,7	0,9	32,5	3,4
Voc [mV]	608,1	604,4	-0,6	601,9	-1,0
FF [%]	75,3	75,3	0,0	74,7	-0,7
η [%]	14,38	14,44	0,4	14,60	1,7

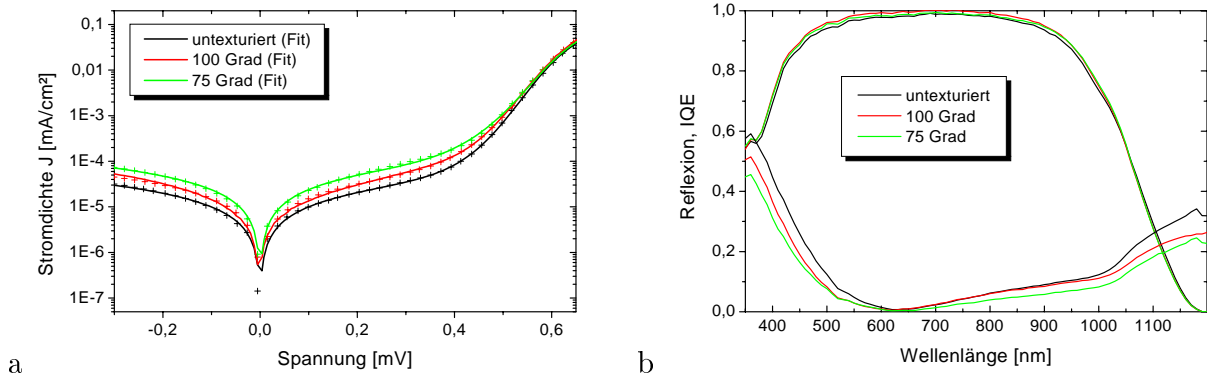


Abbildung 5.6: a) Dunkelkennlinien und Fit nach dem Zwei-Dioden-Modell und b) IQE und Reflexion von Zellen mit verschiedener Oberflächentextur.

Solarzellen auf die verschiedenen Effekte zurückgeführt werden. Die Parameter des Zwei-Dioden-Modells werden an die Kennlinien angefitet, wobei zum Fit des Shuntwiderstands die Dunkelkennlinie, für die Diodenströme die J_{sc} - V_{oc} -Kennlinie und den Serienwiderstand die Hellkennlinie verwendet wird [20]. Die Dunkelkennlinien und die entsprechenden Fits typischer Zellen sind in Abb. 5.6a dargestellt und die Fitparameter repräsentativer Zellen je Gruppe in Tab. 5.3 aufgelistet.

Es ist sehr gut zu sehen, dass sowohl der Sperrstrom der ersten als auch der zweiten Diode bei den texturierten Zellen höher ist. Der Effekt entspricht dem der Oberflächenvergrößerung, er ist für Zellen mit dem 100° -Profil ($G_f \approx 1,2$) geringer als bei den Zellen mit 75° -Profil ($G_f \approx 1,4$). Somit stehen diese Ergebnisse im Rahmen der Mess- und Fitgenauigkeit, die für die Diodenströme mit 20% relativ anzusetzen ist, in guter Übereinstimmung mit den Simulationen in Kapitel 3.2.

Weiterhin wurden Reflexion und IQE bestimmt. Die entsprechenden Kurven sind in Abb. 5.6 dargestellt. Die Messgenauigkeit ist nicht groß genug, um bei der IQE den Effekt der erhöhten Einsammelwahrscheinlichkeit aufzulösen.

Der Gewinn im Strom durch Reflexionsreduktion kann aufgrund der Reflexionsmessungen abgeschätzt werden. Dazu wurde die Reflexion der unmetallisierten Zellen gemessen, und mit derselben IQE einer untexturierten Solarzelle die sich daraus ergebenden Kurzschlussstromdichten und Verluste berechnet. Um zu veranschaulichen, welche Kurz-

Tabelle 5.3: Fitparameter repräsentativer Zellen je Gruppe nach einem Fit an das Zwei-Dioden-Modell.

Parameter	untexturiert	100° Profil	Δ [%]	75° Profil	Δ [%]
V_{oc} [mV]	609,2	604,6	-0,8	600,7	-1,4
J_{sc} [mA/cm^2]	31,4	31,8	1,2	32,4	3,0
FF [%]	75,0	75,3	0,4	74,5	-0,6
η [%]	14,3	14,5	0,8	14,5	1,0
R_{sh} [Ohm^2]	12525	8010	-36,0	8835	-29,5
R_s [Ohm^2]	1,3	1,2	-5,8	1,3	-0,8
J_{01} [$\text{A}/^2$]	$1,45 \cdot 10^{-12}$	$1,75 \cdot 10^{-12}$	21,1	$2,04 \cdot 10^{-12}$	40,8
n_1	1	1		1	
J_{02} [A/cm^2]	$1,94 \cdot 10^{-8}$	$2,16 \cdot 10^{-8}$	11,3	$2,91 \cdot 10^{-8}$	49,7
n_2	2	2		2	

schlussstromdichte maximal erreichbar wäre, wurden die Kurzschlussstromdichten bei optimaler Textur (als solche wird die gemessene Reflexion einer mit einem einzelnen Sägeblatt texturierten Zelle angesehen. Grabenwinkel: 35° , Krümmungsradius im Profilgraben: $10\mu\text{m}$) sowie unter Vernachlässigung der Reflexion zusätzlich berechnet. Bei allen Profiltypen wurde eine Abschattung durch das Grid von 7% angenommen, was einem Verlust in der Kurzschlussstromdichte von ca. $3,1\text{ mA/cm}^2$ entspricht. Der Busbar ist bei den texturierten Zellen an einigen Stellen etwa $0,1 - 0,2\text{ mm}$ breiter, da er wegen des Kapillareffektes etwas ausschmiert. Dementsprechend ist die Abschattung bei den texturierten Zellen im Vergleich zu den untexturierten etwas größer, was mit max. $0,3\text{ mA/cm}^2$ veranschlagt werden kann. Dieser Effekt betrifft nur die gemessenen Kurzschlussstromdichten, nicht jedoch die simulierten. Die verwendeten Reflexionskurven sind in Abb. 5.6 dargestellt, die gemäß den Gleichungen in Kap. A.3 berechneten und gemessenen Kurzschlussstromdichten sowie Verluste sind in Tab. 5.4 aufgelistet.

Die gemessenen Kurzschlussstromdichten liegen etwas höher, als aufgrund der Reflexionsreduktion zu erklären ist, wenn man die $0,3\text{ mA/cm}^2$ durch die erhöhte Abschattung wegen der etwas breiteren Busbars bei den texturierten Zellen mit berücksichtigt. Die Berechnungen der untexturierten Solarzelle stimmen mit dem gemessenen Wert überein, da die IQE auf diesen Wert skaliert wurde. Wird ein die Steigerung im Kurzschlussstrom aufgrund besserer Einsammelwahrscheinlichkeit und Reflexion betrachtet, so liegt sie etwas niedriger als nach der Simulation in Tabelle 3.2 zu erwarten ist. Allerdings kann man auch davon ausgehen, dass die Diffusionslänge bei diesen Zellen größer als $200\mu\text{m}$ ist. Damit liegen die Unterschiede im Rahmen der Messgenauigkeit.

Da die Ergebnisse so eng bei den aufgrund der Simulation zu erwartenden liegen, ist eine weitere Optimierung auf Laborebene nicht sinnvoll. Aufgrund der geringen Stückzahl liegen die Effekte immer in der Größenordnung der Streuung und sind somit nicht signifikant.

Tabelle 5.4: Gemessene Werte für die Kurzschlussstromdichte einer typischen Solarzelle der jeweiligen Textur sowie berechnete Werte aufgrund jeweils derselben IQE. Zum Vergleich sind Daten einer Zelle mit "optimaler Textur", als welche ein mit eine 35° Grad Einzelblatt erzeugtes Profil angesehen werden kann, sowie ohne Reflexion (0 Refl.) berechnet worden.

Textur	keine	100° Profil	75° Profil	optimale	0 Refl.
IV Messung					
Jsc [mA/cm^2]	31,45	31,74	32,51		
Gewinn [%]		0,92	3,34		
Berechnung aus Reflexion und IQE					
Jsc [mA/cm^2]	31,45	31,98	32,59	33,44	34,38
Gewinn [mA/cm^2]		0,53	1,14	1,99	2,93
Gewinn [%]		1,59	3,62	6,31	9,32
gewichtete Reflexion [%]	15,13	13,82	12,20	9,92	7,36
Rekombinationsverluste [mA/cm^2]	5,31	5,55	5,75	6,06	6,78
Reflexion der ARC [mA/cm^2]	4,35	3,63	2,82	1,67	0,00

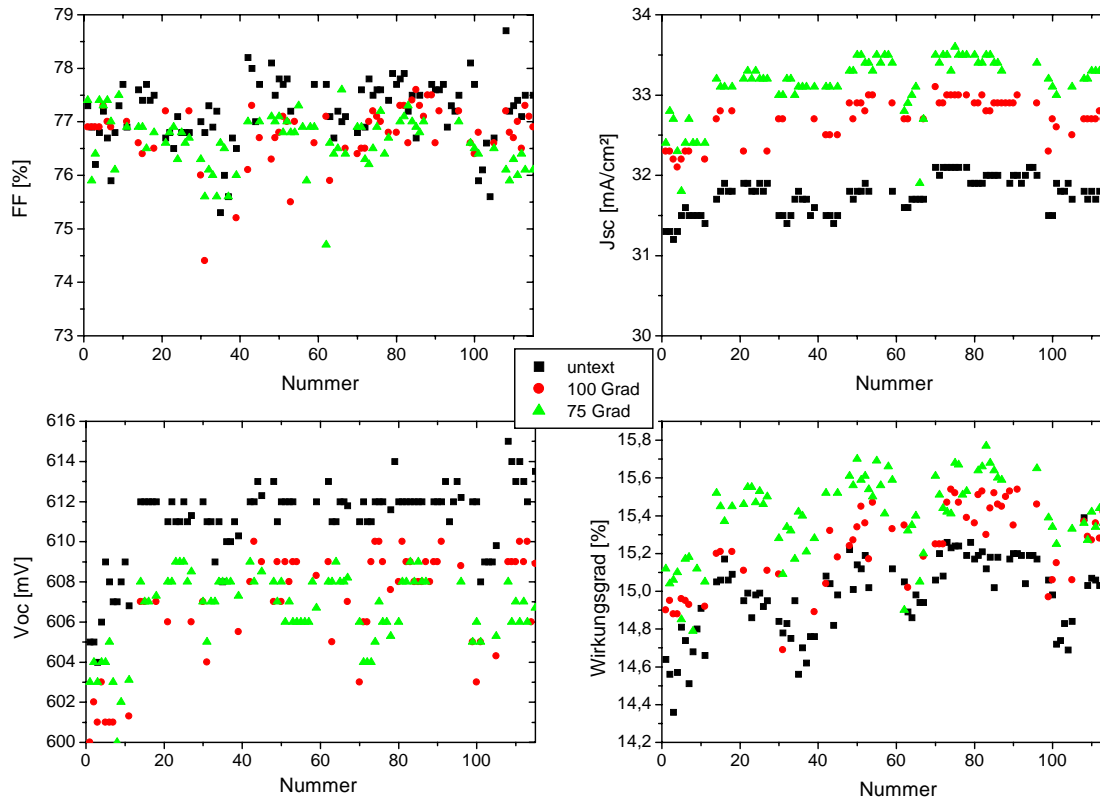


Abbildung 5.7: Übersicht über die im Experiment 2 gefertigten Zellen. Die Zellen sind so sortiert, dass jeweils Zellen einer Kornstruktur untereinander aufgetragen sind.

5.2.2 Zellen aus Produktionsfertigung (Experiment 2)

Für dieses Experiment wurden 3 benachbarte Gruppen $270\mu\text{m}$ dicker Wafer verwendet (Für die Definition von “benachbarte Gruppen“ siehe Kap. 2.1). Nach dem mechanischen Texturieren wurden die Zellen in den Gruppen gemischt, um einen Effekt aufgrund der Prozessreihenfolge ausschließen zu können. Die fertigen Zellen wurden dann wieder nach Kornstruktur sortiert. Abb. 5.7 zeigt eine Übersicht über die Zellparameter, Tab. 5.5 Mittelwerte und Standardabweichungen.

Auf den ersten Blick zeigt sich ein ähnliches Bild wie beim Experiment 1 auf Laborebene. Die Zellen mit 75° -Profil sind im Wirkungsgrad die besten, gefolgt von denen mit 100° -Profil und den untexturierten. Allerdings ist der Unterschied in der Leerlaufspannung zwischen den Zellen mit der mechanischen Textur nicht so deutlich wie beim Experiment 1. Vielmehr liegen die Leerlaufspannungen so eng beieinander, dass sie nicht im Rahmen

Tabelle 5.5: Zellparameter und Standardabweichung der Experiment 2 gefertigten Zellen aus 3 benachbarten Gruppen.

Parameter	untexturiert	100° Profil	Δ [%]	75° Profil	Δ [%]
FF [%]	$77,4 \pm 0,6$	$76,8 \pm 0,6$	-0,8	$76,7 \pm 0,6$	-0,9
Jsc [mA/cm^2]	$31,7 \pm 0,3$	$32,7 \pm 0,3$	3,0	$33,2 \pm 0,4$	4,4
Voc [mV]	$611,0 \pm 2,5$	$606,6 \pm 3,0$	-0,7	$606,3 \pm 1,8$	-0,8
η [%]	$15,01 \pm 0,23$	$15,23 \pm 0,22$	1,5	$15,41 \pm 0,24$	2,7

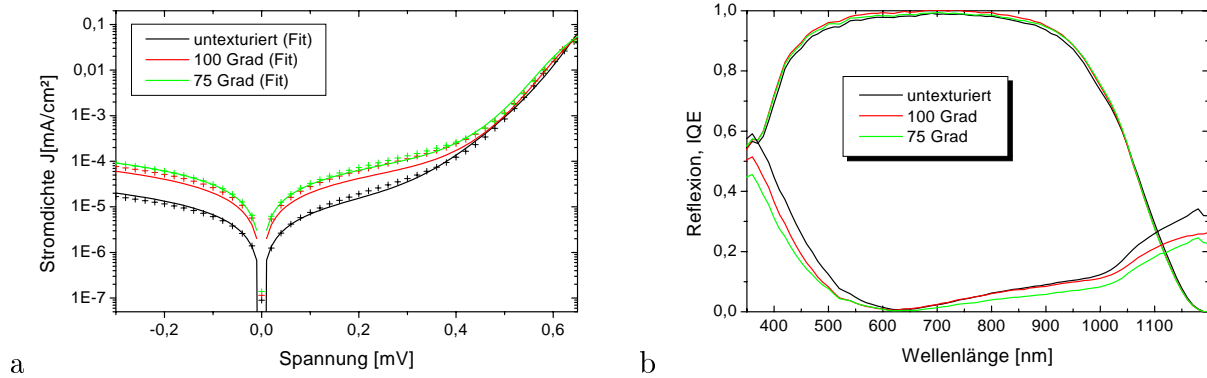


Abbildung 5.8: a) Dunkelkennlinien und Fit nach dem Zwei-Dioden-Modell und b) IQE und Reflexion von Zellen mit verschiedener Oberflächentextur aus Experiment 2.

der Messgenauigkeit unterschieden werden können. Von repräsentativen Zellen, die in den Parametern nahe dem Mittelwert liegen wurden wurden Dunkel IV und J_{sc} - V_{oc} Kennlinien aufgenommen und nach dem Zwei-Dioden-Modell angefitet. Kennlinien dieser typischen Solarzellen sind in Abb. 5.8 und Fitparameter sind in Tabelle 5.6 zu sehen. Es zeigen sich leichte Abweichungen zwischen dem so gefitteten Kurvenverlauf und dem der Dunkelkennlinie. Die Solarzellen lassen sich also nicht vollständig durch das Zwei-Dioden-Modell beschreiben. Jedoch lässt sich sagen, dass auch hier eine Erhöhung der Diodenströme aufgrund von Rekombination im Emitter und in der Raumladungszone zu geringerer offener Klemmspannung der V-texturierten Solarzellen führt.

Die Steigerung im Kurzschlussstrom ist bei diesem Experiment höher als bei Experiment 1. Vergleicht man Reflexion und IQE (siehe Abb. 5.8b), so liegen die Schwankungen im Rahmen der Messgenauigkeit und lassen keinen sicheren Schluss zu. Der verhältnismäßig große Verlust in der Leerlaufspannung bzw. der Anstieg der Diodenströme bei den Zellen mit 100° -Profil deutet jedoch auf eine Schädigung der Oberfläche z.B. durch eine zu geringe Ätztiefe hin. Da dadurch das Profil weniger verrundet ist, würde das auch den höheren Gewinn im Kurzschlussstrom erklären. Allerdings kann auch eine Schädigung an anderer Stelle, z.B. beim Plasmaätzen nicht ausgeschlossen werden. Es ist davon auszugehen, dass nach Verkapselung der Gewinn im Strom nicht so viel höher ist als bei den Zellen aus Experiment 1, und somit der höhere Verlust in der Leerlaufspannung stärker

Tabelle 5.6: Fitparameter repräsentativer Zellen aus Experiment 2 nach dem Zwei-Dioden-Modell.

Parameter	untexturiert	100° Profil	Δ [%]	75° Profil	Δ [%]
FF[%]	77,3	77,1	-0,3	76,9	-0,5
J_{sc} [mA/cm ²]	31,82	32,8	3,1	33,24	4,5
V_{oc} [mV]	612,3	606,1	-1,0	608,3	-0,7
η [%]	15,06	15,30	1,6	15,52	3,1
Rsh[Ohmcm ²]	8540	5080	-40,5	5160	-39,6
Rs[Ohmcm ²]	0,8	0,78	-2	0,78	-2
J_{01} [A/cm ²]	$1,26 \cdot 10^{-12}$	$1,62 \cdot 10^{-12}$	25,6	$1,53 \cdot 10^{-12}$	9,4
n1	1	1		1	
J_{02} [A/cm ²]	$2,56 \cdot 10^{-8}$	$3,20 \cdot 10^{-8}$	25,0	$2,84 \cdot 10^{-8}$	10,9
n2	2	2		2	

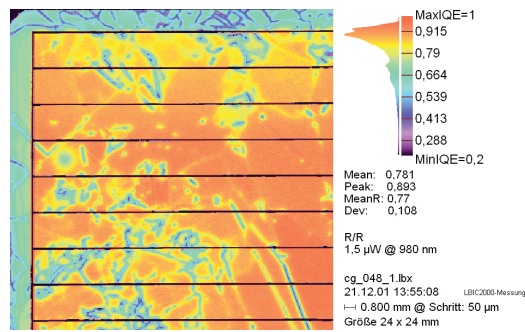


Abbildung 5.9: Lokale IQE einer untexturierten Solarzelle.

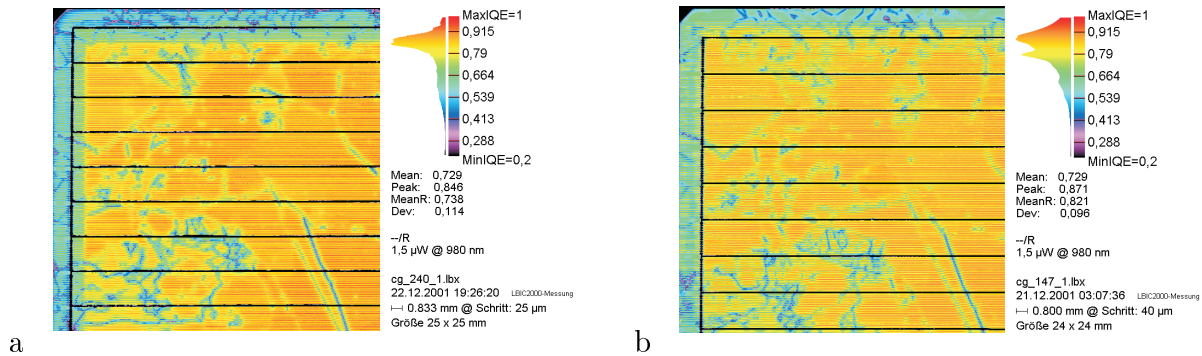


Abbildung 5.10: Lokale IQE einer a) 100° Profil und b) 75° Profil. Man sieht deutlich den Einfluss des Plasmaätzens und V-Gräben. Quantitative Effekte im Vergleich der Zellen liegen im Rahmen der Messgenauigkeit und der Streuung von Wafer zu Wafer. Man gewinnt jedoch den Eindruck, dass im Bereich geringer IQE der flachen Zelle (siehe Abb. 5.9, links unten) die V-texturierten Zellen eine höhere mittlere IQE aufweisen (Farbeindruck: “mehr rot“), allerdings im Bereich sehr hoher IQE (rechts unten) die Zelle mit V-Profil aufgrund der geringeren IQE im Graben eine im mittel geringere IQE zeigen (Farbeindruck: “mehr gelb“).

zu Buche schlägt.

Von je einer Zelle mit den verschiedenen Texturen wurden LBIC Aufnahmen gemacht, die in Abb. 5.9 und 5.10 zu sehen sind. Bei allen Zellen ist der Randbereich aufgrund des Plasmaätzens geschädigt. Weiterhin sind die V-Gräben deutlich zu erkennen, die lokale

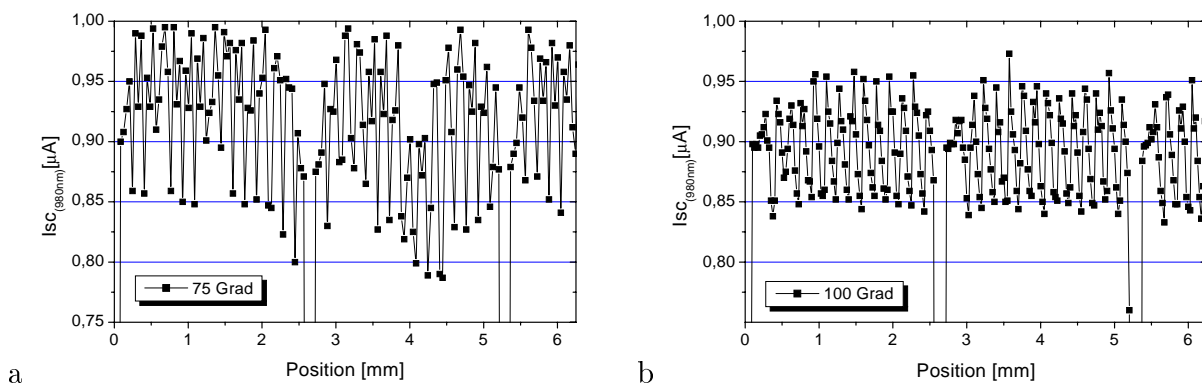


Abbildung 5.11: Linienscans auf einer Zelle mit a) 75° und b) 100° Profil. Die Zelle mit dem 75° -Profil zeigt den größeren Unterschied im Strom zwischen Grabenboden und Spitze.

IQE in den Profilspitzen ist höher als in den Gräben. Quantitative Effekte im Vergleich der Zellen liegen im Rahmen der Messgenauigkeit und der Streuung von Wafer zu Wafer. Man gewinnt jedoch den Eindruck, dass im Bereich geringer IQE der flachen Zelle (links unten) die V-texturierten Zellen eine höhere mittlere IQE aufweisen, allerdings im Bereich sehr hoher IQE (rechts unten) die Zellen mit V-Profil aufgrund der geringeren IQE im Graben eine im mittel geringere IQE zeigen. Um einen genauen Vergleich zwischen Graben und Spitze machen zu können, wurden Linienscans im Kurzschlussstrom aufgenommen (Wellenlänge: 980 nm, siehe Abb. 5.11). Kurz vor und hinter dem Absinken der Kurve wegen des Kontaktes ist das Niveau des Plateaus zu sehen, was in etwa dem der untexturierten Solarzelle entspricht. Die Auflösung der Messung ist geringer, deshalb wird das Profil nicht so genau abgetastet und die Werte streuen mehr. Es lässt sich jedoch erkennen, dass der Unterschied zwischen Graben und Spitze bei der Zelle mit 75°-Profil größer ist als bei der mit 100°-Profil. Der Maximalwert wird durch den Winkel bestimmt: Bei dem kleineren Grabenwinkel ist die Einsammelwahrscheinlichkeit höher und dadurch das LBIC-Signal ebenfalls höher. Die Profiltiefe ist beim 75°-Profil größer, deshalb auch die Waferdicke vom Graben aus gemessen geringer und das LBIC-signal auch geringer.

5.2.3 Vergleich V-Textur - Isotextur - untexturiert (Experiment 3)

Ausgehend von den Erfahrungen auf Produktionsebene im Experiment 2 wurde ein weiteres Experiment durchgeführt, bei dem neben den mechanisch texturierten Zellen auch mit einer Mischung aus den Säuren HF und HNO₃ sowie Wasser und Additiven isotexturierte Zellen prozessiert wurden. Diese Zellen wurden bei IMEC, Belgien texturiert, näheres zur Textur siehe [107]. Abb. 5.12 zeigt die Oberfläche und das Profil einer isotexturierten Zelle. Die mit der Säure erzeugten Strukturen sind etwa 10 μm groß, ein Unterschied der Ätzung verschiedener Kornorientierung ist nicht sichtbar, jedoch ist ein verstärktes Ätzen an der Korngrenze deutlich zu sehen.

Bei diesem Experiment ist die Antireflexschicht der Zellen mit 75°-Profil und mit Isotextur zu dünn. Dadurch ist der Strom bei den Zellen mit diesen Texturen etwa 0,2 - 0,3 mA/cm²

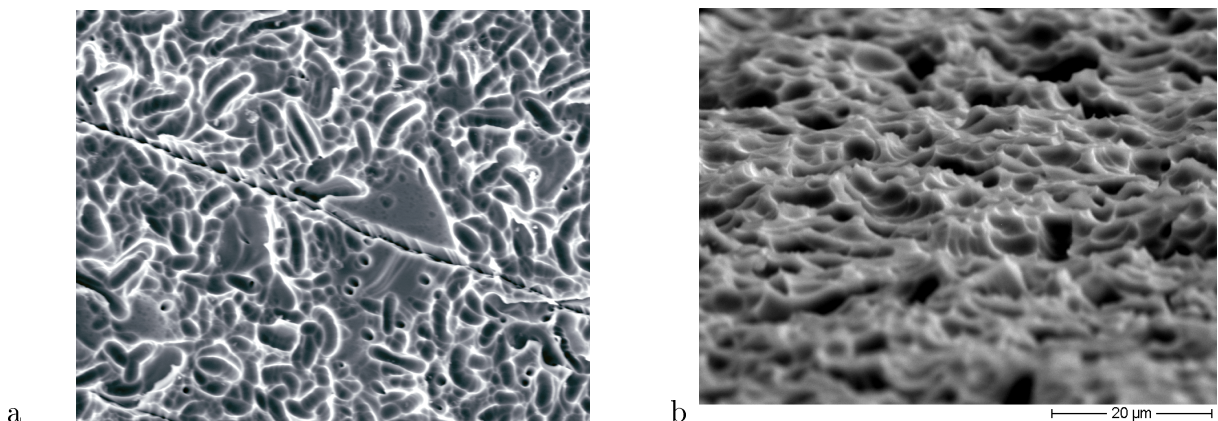


Abbildung 5.12: Oberfläche einer isotexturierten Zelle: a) Mit Korngrenze, man sieht keinen Unterschied in der Textur, wie im Falle der alkalischen Ätzung, jedoch wird an der Korngrenze in den Wafer hineingätzt. b) Schräg, man sieht die scharfen Spitzen der Textur, brechen sie beim Prozess, so führt das nach der Metallisierung zu Schottky-artigen Shunts, die ein Absinken im Füllfaktor und in der Leerlaufspannung zur Folge haben.

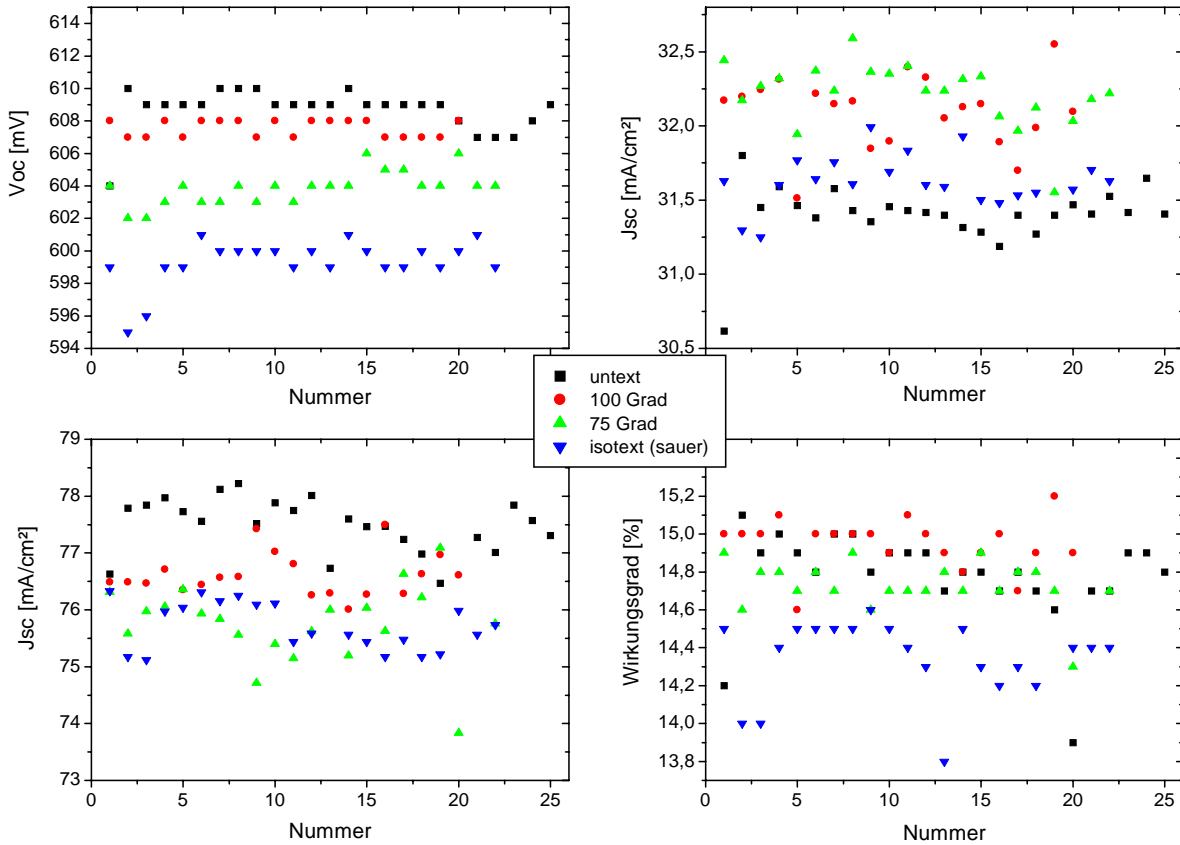


Abbildung 5.13: Übersicht über im Experiment 3 gefertigten Zellen. Die Gruppen sind aus benachbarten Zellen sortiert.

geringer, als er bei optimaler Schichtdicke wäre (Bei texturierten Solarzellen wirkt sich eine zu dünne ARC weniger aus als bei untexturierten). Die Wafer für dieses Experiment stammen alle aus einer Säule und sind somit alle miteinander vergleichbar. In Abb. 5.13 und Tabelle 5.7 sind die Ergebnisse dargestellt.

Während die Parameter für die untexturierten Zellen und die V-texturierten mit dem 100°-Profil vergleichbar zu denen der letzten Experimenten sind, sind die Zellen mit dem 75°-Profil und der Isotextur deutlich schlechter als erwartet. Bei den Zellen mit dem 75°-Profil sind Strom und Füllfaktor unerwartet niedrig, bei den Zellen mit Isotextur

Tabelle 5.7: Zellparameter des Experiment 3 und Standardabweichung.

Parameter	untexturiert	100° Profil	Δ [%]	75° Profil	Δ [%]	isotext	Δ [%]
Voc [mV]	608,6 $\pm 1,3$	607,6 $\pm 0,6$	-0,2	603,8 $\pm 1,1$	-0,8	599,4 $\pm 1,5$	-1,5
Jsc [mA/cm ²]	31,40 $\pm 0,2$	32,10 $\pm 0,2$	2,2	32,22 $\pm 0,2$	2,6	31,63 $\pm 0,2$	0,7
FF [%]	77,3 $\pm 1,1$	76,6 $\pm 0,4$	-0,9	75,8 $\pm 0,7$	-2,0	75,7 $\pm 0,4$	-2,0
η [%]	14,78 $\pm 0,3$	14,94 $\pm 0,1$	1,1	14,73 $\pm 0,1$	-0,3	14,36 $\pm 0,2$	-2,8

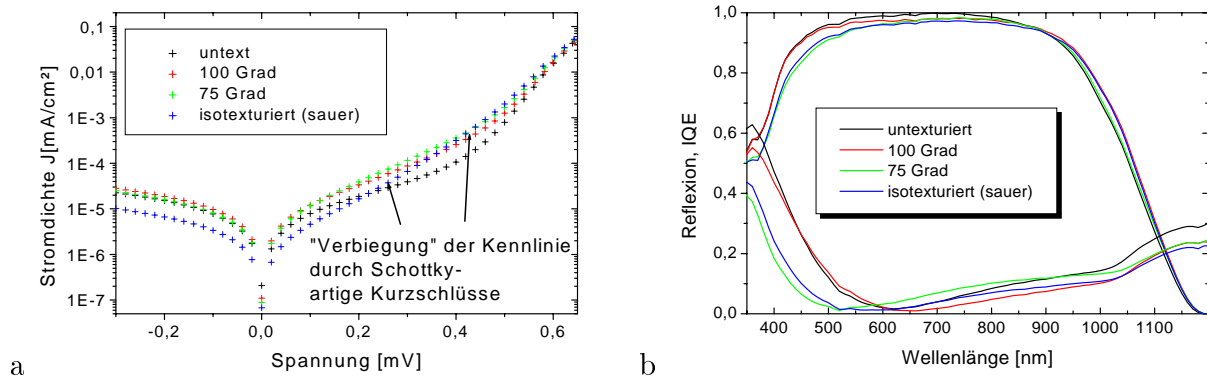


Abbildung 5.14: a) Dunkelkennlinien und b) IQE und Reflexion von Zellen mit verschiedener Oberflächentextur.

auch die Leerlaufspannung. Von typischen Zellen wurden Dunkel-IV-Kennlinien, sowie Reflexion und IQE bestimmt. Bei den Dunkelkennlinien ist eine deutliche ‘‘Verbiegung’’ der Kennlinie zu erkennen, die besonders stark bei den Zellen mit 75°-Profil und Isotextur ist. Dies führt dazu, dass sie sich nicht nach dem Zwei-Dioden-Modell fiten lassen. Ebenso zeigen diese Zellen eine deutlich geringere IQE im kurzwelligen Bereich (siehe Abb. 5.14).

Diese beiden Faktoren lassen darauf schließen, dass die Oberfläche nach der Diffusion beschädigt wurde, es ist wahrscheinlich, dass die Zellen beim Plasmaätzen zu sehr aufeinandergepresst wurden und dabei Spitzen in den Profilen abgebrochen wurden. An diesen Stellen wird bei der Siebdruckmetallisierung die Basis statt des Emitters kontaktiert und es bilden sich lokale Kurzschlüsse unter den Kontakten. Diese wirken sich jedoch nicht auf den Shuntwiderstand, wie er in der Dunkelkennlinie gemessen wird, aus da sie sich nicht wie ohmsche Kontakte verhalten, sondern eher ein Dioden-ähnliches Verhalten wie Schottky-Kontakte zeigen und erst bei höheren Spannungen in Erscheinung treten [108], [109], [110]. In früheren Versuchen zu Plasmaätzen mit V-texturierten Zellen wurde keine so deutliche Schädigung der Oberfläche beobachtet, jedoch zeigten auch die Zellen aus Experiment 2 eine leichte Schädigung. Dies kann dadurch erklärt werden, dass sie für das Plasmaätzen mit geringerer Kraft zusammengepresst wurden. In dem Vergleich Plasmaätzen-Kantenscheiden wurde keine Schädigung der Oberfläche beobachtet, jedoch hatten diese Zellen einen hochdotierten Emitter ($35 \Omega/\square$) und das Wirkungsgradniveau der Zellen lag aufgrund des verwendeten TiO_2 anstelle von PECVD SiN_x wesentlich niedriger. Somit kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass Plasmaätzen für texturierte Zellen mit schwachdotiertem Emitter weiter optimiert werden muss, dabei muss insbesondere das Stapeln und Zusammenpressen betrachtet werden.

5.3 Texturierte Solarzellen im Modul

Für die industrielle Anwendung ist die Leistung der Zellen nach Verkapselung im Modul entscheidend. An der Grenzfläche Luft-Glas wird etwa 3-4% des Lichtes reflektiert (der genaue Wert ist abhängig vom Glas, es sind sowohl texturierte Gläser als auch Gläser mit einer Antireflexschicht erhältlich). Somit erreicht weniger Licht die Solarzelle im Modul, als auf das Modul fällt. Andererseits wird von dem an der Grenzschicht zur Solarzelle reflektierten Licht wieder etwas aufgrund von Totalreflexion an der Innenseite des Glases

auf die Zelle zurückreflektiert (siehe auch Abb. 3.2). Ist die Solarzelle texturiert, kann der Gewinn durch die Verkapselung im Modul geringer sein als bei untexturierten (NaOH-geätzten) Solarzellen. Ist die Textur sehr gut, kann der Ertrag im Strom sogar sinken, da an der Grenzfläche Luft-Glas mehr Licht reflektiert wird, als durch die Totalreflexion gewonnen wird. Deshalb ist es wichtig, texturierte Zellen nach der Leistung im Modul und nicht nur auf Zellebene zu beurteilen. So wurden aus den Zellen der oben beschriebenen Experimente Module hergestellt. Die Ergebnisse werden im folgenden vorgestellt.

5.3.1 Vergleich von verschiedenen Oberflächentexturierungen

Module aus Experiment 1

Aus jeweils zwei Zellen mit den verschiedenen V-Texturen wurden 1-Zell-Mini-Module gefertigt. Eine IV Messung dieser Mini-Module war leider nicht möglich. An den Mini-Modulen aus diesem Experiment und einem Mini-Modul einer TiO_2 beschichteten Zelle aus einem vorangegangenen Experiment wurden deshalb nur Reflexionsmessungen durchgeführt (siehe Abb. 5.6b). Der Anteil der Metallisierung wurde herausgerechnet so dass das Minimum der Reflexion bei der Reflexion des Glases von 3 % liegt. Man sieht deutlich in Abb. 5.15 die höhere Reflexion des alten TiO_2 Moduls, wobei auch das Minimum bei einer größeren Wellenlänge liegt. Analog zu der Berechnung in Tabelle 5.4 wurde mit derselben IQE die Kurzschlussstromdichte aufgrund der Reflexion sowie gewichtete Reflexion und Verluste gemäß den Gleichungen in Kap. A.3 errechnet (siehe Tabelle 5.3.1).

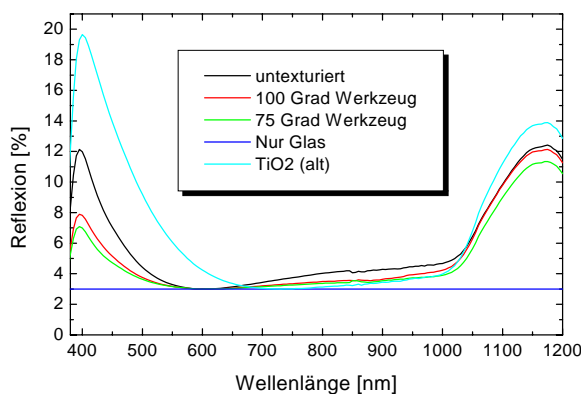


Abbildung 5.15: Reflexionsmessungen der verkapselten Zellen aus Experiment 1, sowie einer Zelle mit TiO_2 ARC.

Nach diesen Berechnungen liegt der Gewinn durch die geringere Reflexion der Texturierten Zellen bei maximal 1,5 - 2,6% je nach betrachtetem Vergleichsmodul (PECVD SiN_x oder TiO_2). Dies zeigt, dass der Vergleichsstandard, zu dem ein Gewinn durch Reflexionsreduktion angegeben wird, von großer Bedeutung ist. Die Messung an ein bis zwei verkapselten Zellen reicht nicht aus, um eine zuverlässige Aussage treffen zu können. Desweiteren kann man sagen, dass der mögliche Stromgewinn aufgrund von Reflexionsreduktion im Modul sicher nicht mehr als 3% relativ beträgt. Um den aussagekräftigen Gewinn zu ermitteln, muss eine größere Anzahl von Zellen und mehrere Module betrachtet werden, was die Möglichkeiten an der Universität übersteigt. In Bezug auf die mechanische Textur kann jedoch aufgrund dieses Experimentes für blockgeessenes Material die Simulation bestätigt werden, dass durch einen Grabenwinkel von etwa 100° der größte Gewinn in der

Moduleistung erzielt werden kann. Der Gewinn durch die Reflexion bei den betrachteten Profilen weist nur sehr geringe Unterschiede auf und somit übersteigt der zusätzliche Gewinn durch die bessere Einsammelwahrscheinlichkeit beim 75°-Profil nicht die zusätzlichen Verluste durch die größere Emitterfläche. Bei Ausgangsmaterial mit geringerer Diffusionslänge kann ein kleinerer Grabenwinkel jedoch durchaus vorteilhaft sein, da ein höherer Gewinn durch die verbesserte Einsammelwahrscheinlichkeit erreicht werden kann [80].

Module zu Experiment 2

Aus jeweils 9 benachbarten Zellen der unterschiedlicher V-Profile wurde ein Modul hergestellt und sowohl vor als auch nach der Verkapselung IV-Messungen durchgeführt, um den Effekt der Verkapselung quantifizieren zu können. Die Messergebnisse sind in Tabelle 5.9 aufgelistet. Der Absolutwert der Stromsteigerung aufgrund der Verkapselung hängt nicht nur vom verwendeten Glas, sondern auch vom Abstand der Zellen im Modul ab. Je größer der Abstand zwischen den Zellen, desto mehr Licht wird von der Modulrückseite zwischen den Zellen über Totalreflexion an der Glasinnenseite auf die Zelle reflektiert. Die Module vom Experiment 2 und 3 sind gleich hergestellt worden und deshalb unmittelbar vergleichbar.

Bevor die Messungen interpretiert werden, muss die Messgenauigkeit hinterfragt werden. Generell ist bei einer IV-Messung keine Genauigkeit besser als 3% relativ zum Absolutwert einer Eichmessung anzunehmen, jedoch kann man davon ausgehen, dass die Wiederholgenauigkeit meist höher, in der Größenordnung 1% relativ, ist. Damit ist ein Vergleich untereinander mit einer höheren Genauigkeit möglich. Aber selbst für eine Messgenauigkeit von 1% relativ liegt die Messgenauigkeit hier in der Größenordnung der Effekte und somit ist eine Interpretation schwierig. Deshalb wurden die Module mehrfach gemessen und somit kann eine Genauigkeit von $\pm 0,1$ V und $\pm 0,03$ A angenommen werden. Beim Füllfaktor besteht eine Streuung von $>1\%$ durch die Verlötung der Module, Somit ist der Füllfaktor und die Leistung nicht aussagekräftig.

Zunächst fällt auf, dass der Füllfaktor aller Zellen nach Verkapselung höher ist als vorher. Eine Ursache konnte noch nicht gefunden werden, nach Aussage des Modulherstellers wurde dies aber auch schon bei ähnlichen Modulen beobachtet [111]. Verglichen mit den Zellen ist der Füllfaktor der Module deutlich geringer, was mit dem Serienwiderstand des Tabblings erklärt werden kann. Es ist davon auszugehen, dass die Unterschiede im

Tabelle 5.8: Berechnungen von Zellparametern aus Reflexionsmessungen der verkapselten Zellen, zum Vergleich sind die Messung eines alten Mini-Moduls einer TiO_2 Zelle sowie eine Reflexion mit konstant 3% (0 Refl.) Reflexion angegeben, was der Reflexion des Glases allein entspricht.

Textur	keine	100° Profil	75° Profil	TiO_2	0 Refl.
Jsc [mA/cm^2]	32,87	33,05	33,10	32,50	33,35
Gewinn (SiN_x) [mA/cm^2]	0,00	0,18	0,24	-0,37	0,48
Gewinn (SiN_x) [%]	0,00	0,54	0,72	-1,12	1,46
Gewinn (TiO_2) [mA/cm^2]	0,37	0,55	0,61	0,00	0,85
Gewinn (TiO_2) [%]	1,14	1,69	1,87	0,00	2,61
gewichtete Reflexion [%]	11,45	10,96	10,81	12,44	10,15
Rekombinationsverluste [mA/cm^2]	6,24	6,28	6,32	6,13	6,58
Reflexion der ARC [mA/cm^2]	2,05	1,84	1,74	2,53	1,24

Tabelle 5.9: IV-Kennndaten der Zellen und Module aus Experiment 2

	FF [%]	Isc [A]	Jsc [mA/cm ²]	Voc [V]	η [%]	Pmax [Watt]
Zellen untext	77,6	4,99	31,93	0,612	15,17	
Modul vorher	70,9	5,03	32,19	5,340	13,54	19,04
Modul nachher	72,0	5,19	33,22	5,400	14,35	20,19
Δ Verkaps.[%]	1,6	3,2	3,2	1,1	6,0	6,0
Zellen 100 Grad	77,1	5,13	32,84	0,608	15,40	
Modul vorher	70,4	5,12	32,77	5,320	13,64	19,18
Modul nachher	73,3	5,29	33,86	5,360	14,78	20,79
Δ Verkaps.[%]	4,1	3,3	3,3	0,8	8,4	8,4
Δ Text. [%]	1,8	1,9	1,9	-0,7	3,0	3,0
Zellen 75 Grad	77,0	5,22	33,41	0,608	15,63	
Modul vorher	69,4	5,22	33,41	5,38	13,86	19,50
Modul nachher	72,1	5,35	34,24	5,36	14,70	20,68
Δ Verkaps.[%]	3,9	2,5	2,5	-0,4	6,1	6,1
Δ Text. [%]	0,1	3,1	3,1	-0,7	2,5	2,5

Füllfaktor der Module hier nicht in den Zellen begründet liegen, sondern durch die Herstellung der Module. Sie sind als nicht signifikant einzustufen. Um signifikante Aussagen machen zu können, müsste eine größere Anzahl von Modulen hergestellt werden. Der Kurzschlussstrom zeigt ein Verhalten, wie es aufgrund der Simulationen zu erwarten war, Der Gewinn aufgrund der Verkapselung ist bei dem Modul aus den Zellen mit 100°-Profil und ohne Textur etwa gleich und höher als bei dem Modul aus den Zellen mit 75°-Profil. Die Leerlaufspannung im Modul ist geringer als die Summe der Leerlaufspannungen der Einzelzellen. Desweiteren ist das Verhältnis der Leerlaufspannung der verschiedenen Module anders, als auf Zellebene. Dies ist ein Messartefakt. Die Messung ist nur auf eine Nachkommastelle genau, die zweite Nachkommastelle wird über einen Korrekturfaktor temperaturabhängig berechnet [112]. Deshalb kann bei diesen Modulen nur ein Unterschied von $0,1 \text{ V}/9=0,011 \text{ mV}$ aufgelöst werden und somit die Unterschiede von $0,004 \text{ mV}$ auf Zellebene nicht wiedergegeben werden. Bei diesem Experiment weist zwar das Modul aus den Zellen mit 100°-Profil die höchste Leistung auf, jedoch ist die aufgrund eines höheren Füllfaktors und somit als Effekt der Streuung zu bewerten. Deshalb ist aufgrund dieses Experiments die Textur mit den 75°-Profil zu bevorzugen, da der größere Gewinn im Strom erreicht wurde und nur geringe Verluste in der Leerlaufspannung beobachtet wurden.

Module zu Experiment 3

Auch bei diesem Experiment wurden aus jeweils 9 Zellen einer Textur ein Modul gefertigt, die Herstellungsbedingungen sind die selben wie bei denen aus Experiment 2. Die Ergebnisse der IV-Messung vor und nach Verkapselung sind in Tabelle 5.10 aufgelistet. Bei allen Modulen ist der Gewinn aufgrund der Verkapselung höher als bei Experiment 2, jedoch schneidet auch hier wie erwartet das 100°-Profil besser als das 75°-Profil ab. Bei dem Modul aus isotexturierten Zellen konnte die Erfahrung anderer reproduziert werden, dass der Gewinn durch die Verkapselung vergleichbar hoch mit dem untexturierter Zellen ist [7]. Dass er hier höher als bei den untexturierten Zellen ist, kann mit der etwas

Tabelle 5.10: Module aus Experiment 3

	FF [%]	Isc [A]	Jsc [mA/cm ²]	Voc [V]	η [%]	Pmax [Watt]
Zellen untext	77,54	4,904	31,39	0,609	14,82	
Modul vorher	71,80	4,95	31,68	5,36	13,55	19,05
Modul nachher	72,70	5,19	33,22	5,36	14,38	20,24
Δ Verkaps. [%]	1,3	4,8	4,8	0,0	6,2	6,2
Zellen 100 Grad	76,58	5,017	32,11	0,608	14,95	
Modul vorher	71,00	5,07	32,45	5,4	13,72	19,3
Modul nachher	71,20	5,29	33,86	5,36	14,36	20,18
Δ Verkaps. [%]	0,3	4,3	4,3	0,0	4,6	4,6
Δ Text. [%]	-2,1	1,9	1,9	0,0	-0,2	-0,2
Zellen 75 Grad	75,85	5,024	32,15	0,603	14,72	
Modul vorher	69,80	5,05	32,32	5,26	13,18	18,55
Modul nachher	71,20	5,24	33,54	5,36	14,22	20
Δ Verkaps. [%]	2,0	3,8	3,8	1,9	7,9	7,8
Δ Text. [%]	-2,1	1,0	1,0	0,0	-1,1	-1,1
Zellen isotext	75,69	4,942	31,63	0,600	14,36	
Modul vorher	70	4,94	31,62	5,28	12,98	18,27
Modul nachher	70,1	5,19	33,22	5,36	13,87	19,51
Δ Verkaps. [%]	0,1	5,1	5,1	1,5	6,8	6,8
Δ Text. [%]	-3,6	0,0	0,0	0,0	-3,6	-3,6

zu dünnen Antireflexschicht begründet werden, die sich im Modul weniger auswirkt als auf Zellebene. Bei den Modulen spiegelt sich nicht das Niveau der Zellspannung wider. Bestand auf Zellebene noch 1,5 % relativ Unterschied zwischen den Zellen der einzelnen Gruppen, sind hier alle Werte gleich. Dies liegt jedoch im Rahmen der Messgenauigkeit. Deutliche Unterschiede sind jedoch im Füllfaktor zu sehen, hier spiegelt sich das Verhalten auf Zellebene gut wieder. Eine Diskussion mit einem Vergleich der Module aus den verschiedenen Experimenten ist im letzten Teil dieses Kapitels zu finden.

5.3.2 Spitzenwirkungsgrade in der Produktion

Unter Berücksichtigung der in dieser Arbeit beschriebene Optimierungen wurde in der Produktionslinie der Firma Q-Cells mechanisch texturierte Zellen produziert und zu einem Modul verarbeitet. Tabelle 5.11 zeigt die erreichten mittleren Wirkungsgrade auf Zellebene und die Moduldaten. Sie liegen mit 15,5% bzw. 85 Watt deutlich über dem Durchschnitt der heute üblichen Zell und Modulproduktion.

Tabelle 5.11: Spitzenwirkungsgrade mechanisch V-texturierter Solarzellen in der Produktionslinie und auf Modulebene

	Voc [V]	Isc [A]	FF [%]	η [%]
Mittel 50 Zellen	0,602	5,314	75,9	15,5
Zellen im 36er Modul	0,601	5,443	72,1	15,1
Modul	21,6	5,443	72,1	85 W _{peak}

5.3.3 Schlussfolgerung aus Experimenten zur Textur

Da die Werte für Leerlaufspannung und Füllfaktor bei den Modulen einer sehr hohen Streuung unterliegen, ist die wesentliche Ergebnisgröße bei diesem Experimenten der Kurzschlussstrom. Aus den Experimenten auf Zellebene ist bekannt, dass Leerlaufspannung und Füllfaktor der V-texturierten Zellen leicht geringer sind als die der untexturierten Zellen.

In Abb. 5.16 ist der Kurzschlussstrom und die Änderung aufgrund Verkapselung und Textur der Module aus Experiment 2 und 3 dargestellt.

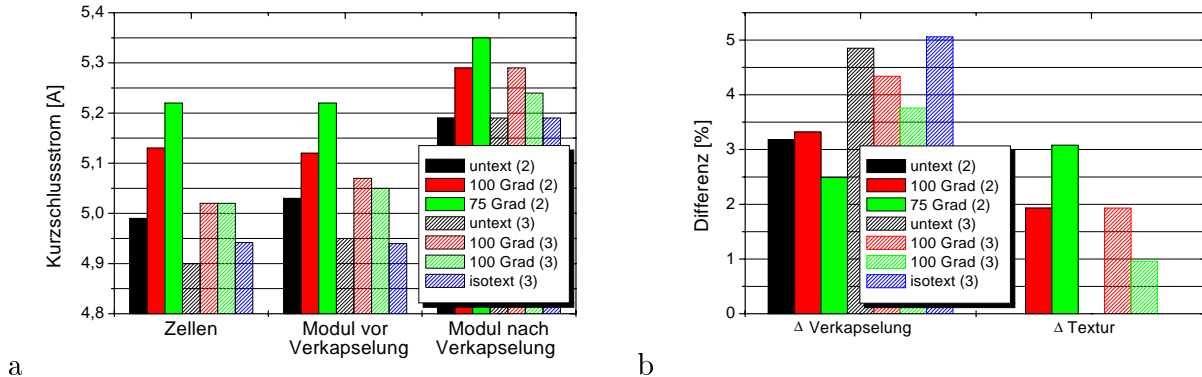


Abbildung 5.16: a) Kurzschlussstrom der Module aus Experiment 2 und 3 und b) Gewinn durch Verkapselung und Textur der Module aus Experiment 2 und 3.

Betrachtet man zunächst in Abb. 5.16a die Absolutwerte im Kurzschlussstrom und vergleicht die Messung auf Zell-Ebene und Modul ohne Verkapselung, so ist festzustellen, dass sie vergleichbar groß sind, die Unterschiede liegen im Rahmen der Messgenauigkeit. Der Gewinn im Kurzschlussstrom aufgrund der Verkapselung ist erheblich von den verwendeten Zellen abhängig. Insbesondere betrifft dies die Oberflächentextur und die Dicke der Antireflexschicht. So ist davon auszugehen, dass die Unterschiede im Verkapselungsgewinn bezüglich des Kurzschlussstroms bei den untexturierten Zellen zwischen Experiment 2 und 3 auf die unterschiedliche Oberflächenbeschaffenheit der Zellen zurückzuführen ist [112]. Dies betrifft nicht nur die untexturierten Zellen, sondern auch die mit 100° -Profil. Nach Verkapselung ist der Unterschied im Kurzschlussstrom zwischen den Modulen aus untexturierten Zellen und denen mit 100° -Profil jedoch bei beiden Experimenten gleich. Die Steigerung im Kurzschlussstrom aufgrund des 100° -Profils beträgt 1,9 % und ist höher als der rein optische Effekt bei den Messungen vom Experiment 1, der nur bei 0,5% liegt. Dies ist zum Teil durch die erhöhte Einsammelwahrscheinlichkeit erklärbar, dafür würde nach den Simulationen laut Tabelle 3.2 etwa 1% veranschlagt werden können. Der restliche Anteil von 0,5% kann gut durch Messgenauigkeit sowohl bei der IV-Messung als auch bei der Reflexionsmessung erklärt werden. Insgesamt können aus den Experimenten folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Für den Fall der vollständigen Optimierung des Prozesses in der Produktion und durchschnittliche Materialqualität kann ein Gewinn von bis zu 3,5% relativ im Kurzschlussstrom von texturierten Zellen auf Modulebene im Vergleich zu NaOH geätzten Zellen erreicht werden. Wie hoch der Gewinn in der Modulleistung ist, hängt vom Füllfaktor und der Leerlaufspannung ab, im Falle der mechanischen V-Textur ist mit ca. 2,5–3% zu rechnen.

- Ein Profil mit verhältnismäßig großem Grabenwinkel von etwa 100° ist für den industriellen Einsatz zu bevorzugen. Der Gewinn im Wirkungsgrad ist höher oder nur unwesentlich niedriger als bei kleinerem Winkel, die Zellen sind einfacher zu prozessieren und ein größere Ausbeute wird erzielt.
- Für die industrielle Anwendung muss der Prozess auf die Textur angepasst werden, dies betrifft insbesondere den Siebdruck und die Behandlung der Oberfläche, die bei den texturierten Solarzellen empfindlicher ist als die der untexturierten (NaOH geätzten) Solarzellen.
- Die Isotexturierung durch Säure ist eine interessante Alternative zur mechanischen Textur, sie ist hier aber nur ansatzweise untersucht worden. Auch dafür muss der Zellprozess entsprechend angepasst werden.

5.3.4 Variation des Einfallswinkels im Modul

Durch Reduktion der Reflexion haben mechanisch V-texturierte Solarzellen einen höheren Kurzschlussstrom. Zusätzlich ändert sich bei nicht senkrechtem Lichteinfall die Reflexion anders als bei untexturierten Solarzellen. Um dies zu quantifizieren wurden zwei ein 12-Zell-Module aus mechanisch texturierten sowie untexturierten Zellen bei Eurosolare gefertigt und bei verschiedenen Lichteinfallswinkeln in horizontaler und vertikaler Richtung gemessen. In Abb. 5.17 ist die relative Änderung des Kurzschlussstromes der beiden Module über verschiedene Einfallswinkel aufgetragen. Man sieht deutlich, dass bei kleinen Abweichungen bis zu 20° die Reduktion des Kurzschlussstromes bei dem Modul aus mechanisch texturierten Zellen geringer ist. Dies bedeutet, dass man über den Tag und Jahr verteilt bei Modulen aus mechanisch texturierten Solarzellen einen höheren Ertrag erwarten kann.

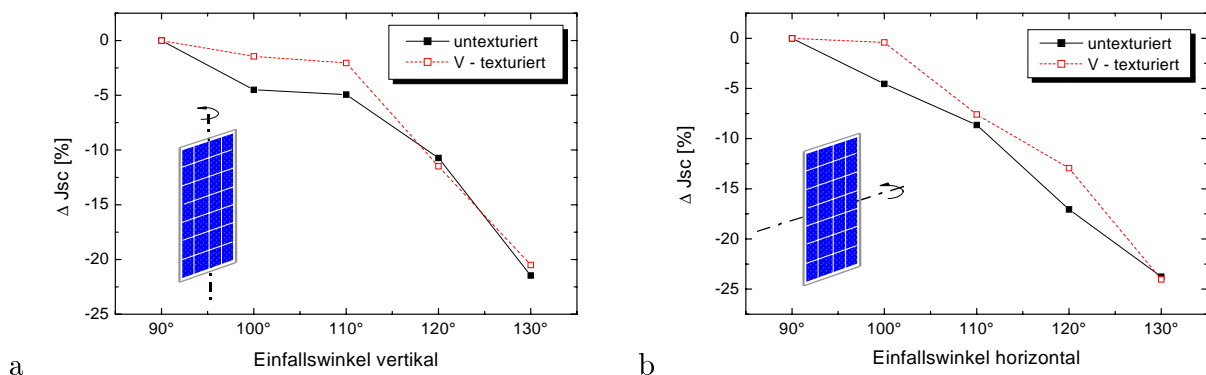


Abbildung 5.17: a) Vertikale und b) horizontale Variation des Einfallswinkels eines 12 Zell - Modules aus untexturierten und V-texturierten Solarzellen [113].

5.4 Solarzellen mit selektivem Emitter

Ein tiefer Emitter mit einem Schichtwiderstand von um $35 \Omega/\square$ bietet den Vorteil, dass er für den Feuerprozess ein großes Prozessfenster zur Verfügung steht. Jedoch bietet ein hochohmiger Emitter den Vorteil, dass weniger Ladungsträger rekombinieren und dadurch Kurzschlussstrom und Leerlaufspannung höher sein können. Beide Vorteile werde

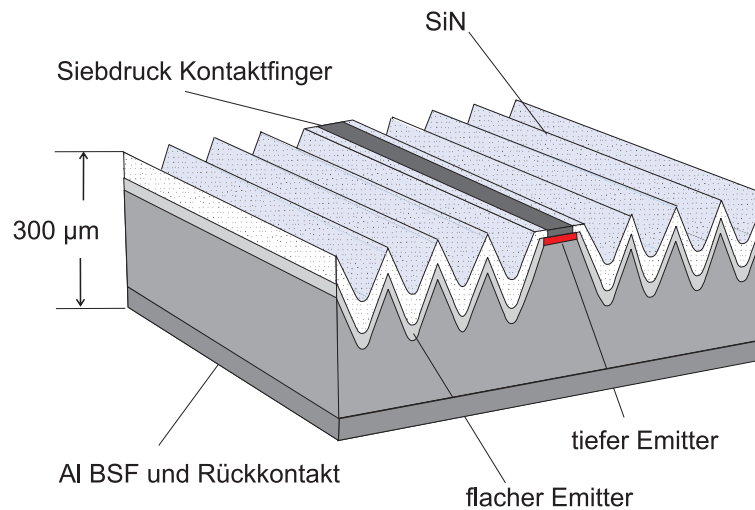


Abbildung 5.18: Konzept einer Zelle mit selektivem Emitter und mechanischer V-Textur.

bei einem Konzept mit selektivem Emitter vereint. Unter den Kontakten ist ein tiefer Emitter, zwischen den Kontakte ein flacher Emitter (siehe Abb 5.18).

Für mechanisch texturierte Zellen bietet sich folgende einfach zu realisierende Prozesssequenz an:

1. Sägeschaden ätzen
2. starke Diffusion
3. Maskieren der Kontaktregionen (ätzresistent)
4. Einbringen der Gräben (auf Plateaus bleibt tiefer Emitter erhalten)
5. Sägeschadenätzen
6. schwache Diffusion
7. PECVD SiN
8. Siebdruck der Kontakte

Die Maskierung muss nicht exakt sein, da die genaue Definition der Kontaktregionen für die Finger beim Texturschritt erfolgt. Dies hat weiterhin den Vorteil, dass die hochdotierten Bereiche leicht zu erkennen sind. Jedoch hat das Konzept drei Schwachpunkte:

- Es ist besser wenn zuerst die schwache Diffusion erfolgt, da dann die starke Diffusion als Drive-In genutzt werden kann.
- Der Busbar verläuft senkrecht zu den Fingern und somit über den Bereich des hochohmigen Emitters. Zum Drucken muss also eine Paste verwendet werden, die auf dem tiefen Emitter einen guten Kontakt herstellt, aber in dem flachen Bereich nicht in die Raumladungszone eindringt. Alternativ könne für den Druck des Busbars und des Emitters verschiedene Pasten verwendet werden.
- Aufgrund des hochohmigen Emitters zwischen den Kontaktregionen ist der Serienwiderstandsbeitrag des Emitters größer als bei Zellen mit homogenem starker dotierten Emitter. Dieser generelle Effekt bei Solarzellen mit selektivem Emitter wird durch die Textur verstärkt, da die Fläche zwischen den Fingern vergrößert wird.

5.4.1 Simulationsrechnungen

Um das Wirkungsgradpotential für Solarzellen mit dem oben beschriebenen Prozess abzuschätzen wurden Simulationsrechnungen nach dem Zwei-Dioden-Modell durchgeführt. Dabei wurden aufgrund von Erfahrungen vorangegangener Experimente und Simulationen [114] sowie Literaturwerten für den Emittersättigungsstrom [115] folgende Annahmen getroffen:

- Der Anstieg in der Kurzschlussstromdichte durch den hochohmigen Emmitter im Vergleich zu Solarzellen mit einem homogenem $35 \Omega/\square$ Emmitter beträgt $1,5 \text{ mA}/\text{cm}^2$ für $60 \Omega/\square$ bzw. $1,8 \text{ mA}/\text{cm}^2$ $80 \Omega/\square$.
- Durch eine 60° V-Textur steigt der Wirkungsgrad auf Zellebene maximal und die Kurzschlussstromdichte um 4% relativ.
- Der Emmitteranteil von I_{01} , der mit dem Geometriefaktor skaliert wird, beträgt $5 \cdot 10^{-13} \text{ A}/\text{cm}^2$ für $35 \Omega/\square$ homogenem Emmitter und $4 \cdot 10^{-13} \text{ A}/\text{cm}^2$ bzw. $3,75 \cdot 10^{-13} \text{ A}/\text{cm}^2$ für 60 bzw $80 \Omega/\square$ selektivem Emmitter.
- Der Diodenstrom I_{02} ist durch die Rekombination in der Raumladungszone dominiert und kann deshalb mit dem Geometriefaktor skaliert werden.
- Für sonstige Zellparameter die Daten aus Tabelle 2.2.

Die Ergebnisse der Simulation sind in Abhängigkeit vom Fingerabstand d in Abb. 5.19 und als Zellparameter für optimalem Fingerabstand in Tabelle 5.12 und 5.13 dargestellt. Aufgrund des höheren Serienwiderstandes im Emmitter muss der Fingerabstand deutlich reduziert werden, was einen Verlust durch Abschattung zur Folge hat. Die Leerlaufspannung und der Füllfaktoren der texturierten Solarzelle ist wegen der größeren Fläche des Emitters und der Raumladungszone geringer als bei einer untexturierten Solarzelle. Um die Effekte der Textur zu veranschaulichen, sind jeweils auch Parameter für untexturierte Solarzellen mit berechnet ($Gf=1$ für untexturiert, siehe Tabelle 5.13).

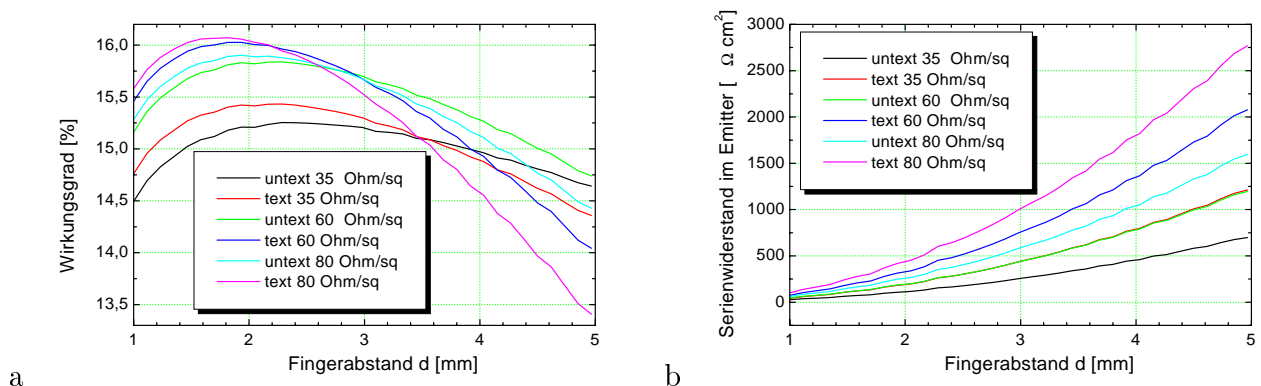


Abbildung 5.19: Simulation des Wirkungsgrads (a) und des Serienwiderstandes im Emmitter (b) bei homogenem und selektivem Emmitter für texturierte und untexturierte Zellen in Abhängigkeit des Fingerabstandes.

Tabelle 5.12: Serienwiderstandsbeiträge aus der Simulationsrechnungen zum selektivem Emitter

d_{Finger} [mm]	Gf	$R_{Schicht}$ [Ω/\square]	Abschattung [%]	$R_{Emitter}$ [Ωcm^2]	$R_{Kontakt}$ [Ωcm^2]	R_{Finger} [Ωcm^2]	R_{Busbar} [Ωcm^2]	R_{gesamt} [Ωcm^2]
1,8	1,7	80	8,52	0,37	0,1	0,33	0,01	0,84
1,9	1	80	8,15	0,25	0,1	0,35	0,01	0,74
1,9	1,7	60	8,15	0,3	0,11	0,35	0,01	0,8
2,2	1	60	7,63	0,2	0,13	0,39	0,01	0,76
2,3	1,7	35	7,21	0,26	0,13	0,42	0,01	0,82
2,4	1	35	7,06	0,16	0,14	0,43	0,01	0,73

Tabelle 5.13: Zellparameter aus der Simulationsrechnungen zum selektivem Emitter

d_{Finger} [mm]	Gf	$R_{Schicht}$ [Ω/\square]	J_{01} [A/cm ²]	J_{02} [A/cm ²]	Voc [mV]	FF [%]	Jsc [mA/cm ²]	η [%]
1,8	1,7	80	$1,06 \cdot 10^{-12}$	$3,22 \cdot 10^{-8}$	617,1	76,72	34,25	16,22
1,9	1	80	$8,50 \cdot 10^{-13}$	$2,00 \cdot 10^{-8}$	623,3	77,98	33,07	16,07
1,9	1,7	60	$1,14 \cdot 10^{-12}$	$3,22 \cdot 10^{-8}$	615,2	76,93	33,91	16,05
2,2	1,0	60	9,00E-13	$2,00 \cdot 10^{-8}$	621,8	77,56	32,94	15,89
2,3	1,7	35	$1,24 \cdot 10^{-12}$	$3,22 \cdot 10^{-8}$	612,2	76,96	32,81	15,46
2,4	1,0	35	$1,00 \cdot 10^{-12}$	$2,00 \cdot 10^{-8}$	618,1	78,09	31,6	15,25

5.4.2 Ergebnisse

Nach der Simulation zeigt das Konzept mit 80 Ω/\square einen höheren Wirkungsgrad als mit 60 Ω/\square , um die Wahrscheinlichkeit eines negativen Effektes auf die Raumladungszone durch die Paste des Busbar zu minimieren wurde ein jedoch ein 60-65 Ω/\square Emitter für die hochdotierte Diffusion gewählt. Desweiteren wurden die Zellen am unteren Rand des Prozessfensters gefeuert, sie könnten also leicht unterfeuert sein. In Tabelle 5.14 sind die Zellparameter zweier Zellen mit selektivem Emitter nach dem oben beschriebenen Prozess dargestellt. Es wurde gezeigt, dass mit diesem Prozess sehr hohe Wirkungsgrade erreicht werden können. Zumindest bis zum jetzigen Zeitpunkt (Anfang 2002) war 16,2% der höchste am Lehrstuhl mit Siebdruckmetallisierung erreichte Wert auf einer Zellfläche von $12,4 \times 12,4 cm^2$.

Der Serienwiderstand ist nur geringfügig höher als nach der Simulationsrechnung zu erwarten war. Dies zeigt, dass der Kontaktwiderstand gut ist und die Zellen ausreichend gefeuert wurden. Die wesentlichen Schwankungen sind in der Rekombination in der Raumladungszone zu finden. Daraus kann geschlossen werden, dass die hier verwendete Metallisierungspaste bei den Feuerparametern zumindest teilweise in die Raumladungszone eindringt und dadurch Leerlaufspannung und Füllfaktor erniedrigt wird. Der Unterschied im Strom liegt innerhalb der Grenzen, die für nicht direkt benachbartes Material aus einer Säule mit dem Prozess erwartet werden können. Das hohe Niveau der Leerlaufspannung und des Kurzschlussstroms zeigt, dass das Material (Solsix) eine hohe Qualität aufweist. Leider konnten keine flachen Referenzen prozessiert werden, da nur eine begrenzte Anzahl Wafer guter Qualität zur Verfügung standen.

Die guten erzielten Ergebnisse zeigen die prinzipielle Machbarkeit des beschriebenen Prozesses mit selektivem Emitter. Allerdings werden auch die Schwächen des Prozesses of-

Tabelle 5.14: Zellparameter zweier Solarzellen mit selektivem Emmitter.

	FF	Jsc	Voc	η	Rsh	Rs	J ₀₁	J ₀₂
	[%]	[mA/cm ²]	[mV]	[%]	[Ω cm ²]	[Ω cm ²]	[10 ⁻¹² A/cm ²]	[10 ⁻⁸ A/cm ²]
1	76,0	34,4	620	16,2	7550	0,95	0,97	3,08
2	75,8	34,1	616	15,9	4500	0,86	1,04	4,65

Tabelle 5.15: Zu erwartenden Zellparameter bei einem besseren Wert für den zweiten Diodenstrom.

	FF	Jsc	Voc	η	Rsh	Rs	Jo1	Jo2
	[%]	[mA/cm ²]	[mV]	[%]	[Ω cm ²]	[Ω cm ²]	[10 ⁻¹² A/cm ²]	[10 ⁻⁸ A/cm ²]
2*	77,3	34,1	619	16,3	4500	0,86	1,04	2,0

fensichtlich. Da der Busbar über schwachdotiertes Gebiet läuft, kann es zu verstärkter Rekombination in der Raumladungszone kommen und über den Anstieg des Diodensättigungsstroms I_{02} zu einem Abfall in der Leerlaufspannung und dem Füllfaktor. Bei einem geringeren Diodenstrom von $I_{02}=2 \cdot 10^{-8}$ A/cm² könnten deutlich bessere Werte erreicht werden. Die Zelle Nr. 2 würde um 0,4% absolut im Wirkungsgrad besser sein (siehe Tabelle 5.15). Dies könnte durch einen separaten Druckschritt der Finger und des Busbars mit verschiedenen Pasten erreicht werden. Die für den Busbar verwendete Paste müsste keinen elektrischen Kontakt zur Zelle herstellen, sondern nur die Finger verbinden. Dieses Konzept konnte im Falle des Rollendrucks erfolgreich umgesetzt werden [116].

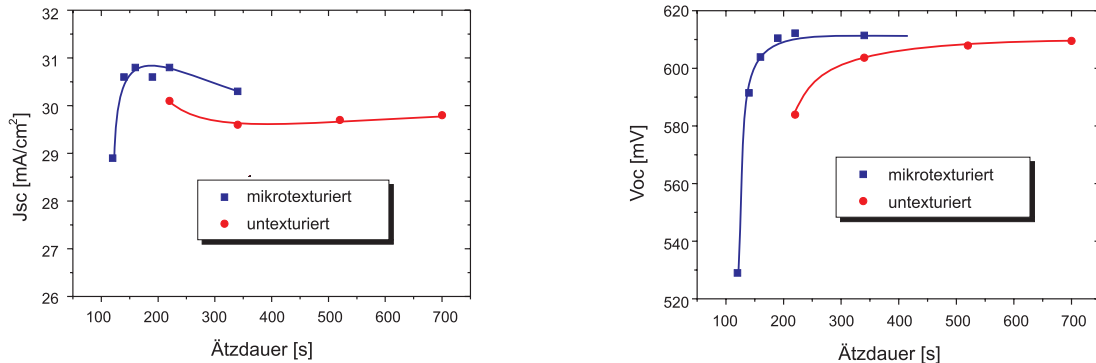
Da durch den hohen Schichtwiderstand viele Kontaktfinger nötig sind, gewinnt ebenfalls die Breite der Finger an Bedeutung. Ein guter Druck mit schmalen Fingern ist wichtig, damit die Abschattungsverluste nicht zu sehr mit der Fingeranzahl steigen. Deshalb ist dieser Prozess insbesondere für die Rollendruckmetallisierung geeignet.

5.4.3 Industrielle Umsetzung

Eine Anwendung des Prozesses für die industrielle Produktion wird nicht kosteneffektiv sein. Zwar gewinnt man im Wirkungsgrad, jedoch sind 3 Prozessschritte mehr notwendig (Maskierung, Defektätzen, Diffusion). Der Gewinn im Wirkungsgrad wird bei der Verkapselung im Modul geringer als auf Zellebene sein, da sowohl der Gewinn durch die Textur aufgrund von Totalreflexion am Glas als auch durch den hochohmigen Emmitter aufgrund von Absorption des Glases im kurzwelligem Bereich geringer ist. Ein wesentlicher Vorteil des selektiven Emmitter Prozesses in der Produktion ist ein größeres Prozessfenster. Störungen würden sich somit weniger stark im Wirkungsgrad auswirken und den mittleren Wirkungsgrad der Produktion erhöhen sowie den Ausschuss senken. Bei dem hier vorgestellten Prozess bedeutet das jedoch, dass der Busbar separat mit einer anderen Paste gedruckt werden müsste, also ein zusätzlicher Prozessschritt eingeführt werden müsste. Falls ein selektiver Emmitter Prozess in der Produktion eingesetzt wird, ist eher zu vermuten, dass sich ein einfacheres Konzept durchsetzt, wobei maximal ein zusätzlicher Prozessschritt notwendig ist. Dies ist zum Beispiel der Fall, wenn eine Dotierpaste auf die Kontaktregionen selektiv aufgetragen wird und somit den hochdotierten Bereich definiert. Der schwachdotierte Bereich wird entweder über Ausgasung der Paste oder eine zusätzliche Dotierquelle wie ein Gas oder eine homogen aufgetragene Flüssigkeit erzeugt [117].

5.5 Mechanisch mikrotexturierte Solarzellen

Mit dem in Kap. 4.3 vorgestellten Verfahren wurden erste Solarzellen hergestellt. In Abb. 5.20 sind Kurzschlussstromdichte und Leerlaufspannung in Abhängigkeit von der Ätzdauer zu sehen. Die mikrotexturierten Solarzellen haben einen um etwa 2% höheren Kurzschlussstrom auf Zellebene. Versuche mit verkapselten Zellen sind jedoch noch nicht durchgeführt worden, da das Verfahren sich noch in der Entwicklung befindet und der Schwerpunkt dabei auf der Werkzeugentwicklung liegt.



a

b

Abbildung 5.20: a) Kurzschlussstromdichte und b) Leerlaufspannung von mikrotexturierten Solarzellen (Mittelwert über 5 Zellen). Man sieht eine geringe Steigerung im Kurzschlussstrom und keinen Abfall in der Leerlaufspannung.

Kapitel 6

Technologietransfer

Der hier beschriebene Prozess ist Ausgangsbasis für den Technologietransfer der Uni Konstanz. Er konnte erfolgreich schon in mehreren Produktionslinien eingesetzt werden und liefert dort mittlere Wirkungsgrade deutlich über 14 %. Im folgendem diskutiere ich einige Punkte, die bei der Auslegung einer Produktionslinie relevant sind.

6.1 Oberflächentexturierung in industrieller Anwendung

In dieser Arbeit wurde gezeigt, dass der Wirkungsgrad einer multikristallinen Solarzelle im Modul höher als der einer untexturierten Solarzelle ist. Zum gegenwärtigem Stand des Wissens ist der Einsatz einer Oberflächentexturierung für die Produktion auf Basis von blockgegossenem multikristallinem Material kritisch zu beurteilen . Auf die drei meistdiskutierten Verfahren wird im folgenden näher eingegangen.

6.1.1 Mechanische Textur

Bisher ist dieses Verfahren nur für den Spezialfall der POWER-Solarzelle industriell umgesetzt worden [119]. Im optimalen Fall ist bei der Verwendung der V-Textur mit einer Erhöhung des Wirkungsgrads von etwa 3% relativ zu rechnen. Dem gegenüber stehen aber noch unbekannte Prozesskosten. Dabei sind die wichtigsten Faktoren die Standzeit des Werkzeuges und die Ausbeute in der Produktion. Beides sind Aspekte, die durch Experimente im Labor nicht vollständig geklärt werden können. Zur Zeit laufen Experimente in Kooperation mit dem FhG IPT Aachen, um die Standzeit der Werkzeuge anhand der vollständigen Zerspanung von Siliziumblöcken zu optimieren. Darauf aufbauend soll mit dem bestem Werkzeug-Konzept Versuche zur Ausbeute in Kooperation mit einem Zellhersteller durchgeführt werden. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass damit zu rechnen ist, dass dünne (200 μm) blockgeessene Wafer im Laufe der nächsten Jahre preisgünstiger sein werden als die heute überwiegend verwendeten 330 μm dicken Wafer. Ebenfalls geht der Trend zu Wafern der Größe 15 x 15 cm^2 . Ein Texturierungsverfahren sollte also auch bei Verwendung größerer und dünnerer Wafer noch kosteneffektiv sein. Alternativ geht der Trend jedoch auch zu Folienmaterialien, die sich kostengünstiger herstellen lassen und eine geringere Diffusionslänge aufweisen. Dafür wären die Kosten bei Waferbruch geringer und weiterhin wird bei Material mit geringer Diffusionslänge durch eine makroskopische V-Textur ein höherer Wirkungsgradgewinn erreicht. Wenn das mechanische Texturieren

also für blockgegossenes Material nicht kosteneffektiv ist, so kann es das durchaus für ein Folienmaterial wie RGS sein [80]. Desweiteren kann eine mechanische Textur mit dem Recycling von Solarzellen, also dem Entfernen von Beschichtungen und Kontakten kombiniert werden und auch dafür kosteneffektiv sein.

6.1.2 Isotextur auf Basis von Säuren

Alternativ zur mechanischen Textur steht zur Zeit die Isotextur auf Basis von HF und HNO₃ zur Diskussion. Die hier durchgeführten Experimente lassen nach vollständiger Optimierung auch eine Steigerung in der Modulleistung von etwa 2% relativ realistisch erscheinen. In dem hier durchgeführten Experiment konnte kein Vorteil im Kontaktwiderstand aufgrund der größeren Kontaktfläche festgestellt werden, wie es bei anderen beobachtet wurde [107]. Für diese Technologie bleibt ebenfalls zu klären, inwieweit sie für dünne Wafer geeignet ist, da an den Korngrenzen stärker geätzt wird und somit eine mechanische Schwächung wahrscheinlich erscheint. Desweiteren muss die Umweltverträglichkeit kritisch beurteilt werden. Ziel sollte sein, einen möglichst umweltfreundlichen Prozess zu etablieren. Wenn also giftige Chemikalien eingesetzt werden, muss die Entsorgung oder besser das Recycling der Chemikalien sichergestellt und das Unfallrisiko in der Produktion minimiert sein.

6.1.3 Reaktives Ionenätzen (RIE)

Die dritte zur Zeit viel diskutierte Texturierungsmethode ist die auf Basis reaktiver Gase (Reactive Ion Etching, RIE) [102]. Hier konnten sehr hohe Wirkungsgrade auf großen Flächen erreicht werden [103]. Allerdings ist die Oberfläche aufgrund der Feinheit der Textur empfindlich und die Siebdruckmetallisierung deshalb problematisch. Desweiteren sind bisher keine Anlagen verfügbar, die einen hohen Durchsatz bei geringen Kosten aufweisen. Ein wichtiger Vorteil des RIE ist sicherlich, dass das Verfahren für großflächige und dünne Wafer geeignet ist und deshalb weiter verfolgt werden sollte.

6.2 Wirkungsgrad und Ausbeute

Die Bedeutung vom mittleren Wirkungsgrad und Ausbeute in der Produktion ist sehr groß. Zur Quantifizierung ist der jährliche Gewinn durch Erhöhung des mittleren Wirkungsgrads einer 25 MW Produktion um 0,1 % und einer Erhöhung der Ausbeute¹ um 0,1% in Tabelle 6.1 veranschaulicht. Der große Kosteneffekt in der Ausbeute ist im vergleichsweise hohem Preis des Wafers begründet. Bei einem Standard Solarmodul aus multikristallinen Zellen betragen die Kosten für den Wafer etwa 55%, für den Solarzellprozess etwa 12% und das Modul etwa 33% [120]. Hauptkostenfaktoren beim Prozess sind das Al-BSF wegen der vergleichsweise hohen Preise der Al-Paste und die PECVD Abscheidung.

¹Bei der Berechnung des Gewinns durch erhöhte Ausbeute ist vereinfachend angenommen, dass es keine Änderung in den Prozesskosten gibt, sondern lediglich mehr verkaufbare Zellen mit dem mittleren Wirkungsgrad zu Verfügung stehen. Realer Weise steigen mit der Ausbeute das natürlich die absoluten Prozesskosten, da ein Wafer im Laufe des Prozesses bricht und z.B. der kostenintensive Schritt des Al-Drucks nicht für einen zerbrochenen Wafer durchgeführt wird. Von der angegebenen Differenz müssen also die zusätzlichen Prozesskosten abgezogen werden.

Tabelle 6.1: Jahresgewinn durch Erhöhung des mittleren Wirkungsgrads um 0,1 Prozent oder der Ausbeute um 0,1% bei einer 25 MW Produktionslinie

	Standard	0,1% abs. höherer Wirkungsgrad	0,1% rel. höhere Ausbeute
Wirkungsgrad Zellen [%]	14,5	14,6	14,5
Leistung je Zelle [W_{peak}]	2,27	2,28	2,27
Jahresproduktion an Zellen [Mio]	11,00	11,00	11,01
Jahresleistung gesamt [MW_{peak}]	24,921	25,093	24,946
Preis Euro/ W_{peak}	2,40	2,40	2,40
Gesamtwert [Euro]	59.812.500	60.225.000	59.872.313
Δ [Euro]		412.500	59813

6.2.1 Inline Prozesskontrolle

Die Betrachtung über den Gewinn bei einer Verbesserung der Ausbeute oder des mittleren Wirkungsgrads oben verdeutlicht, wie wichtig es ist, die Ausbeute zu optimieren. Moderne Produktionsanlagen haben heute meist einen Durchsatz von etwa 1000 Zellen/h. Wird ein Prozessfehler erst am Ende der Linie durch schlechte Wirkungsgrade erkannt, so besteht die Gefahr dass mehrere tausend Solarzellen ebenfalls einen schlechten Wirkungsgrad wegen dieses Prozessfehler haben. In Tabelle 6.2 sind einige Prozessschritte und entsprechende Kontrollparameter aufgelistet.

Neben der Überwachung von Parametern bestimmter Prozessschritte ist eine Kontrolle des eingesetzten Materials anhand von Lebensdauerermessung vor und/oder während des Prozesses empfehlenswert. Während an AsCut Wafern die effektive Lebensdauer nur sinnvoll über Mikrowellenreflexion (μ PCD) gemessen werden kann ist zwischen einzelnen Prozessschritten eine Messung anhand von Quasi Steady State Photo Conductivity (QSSPC) mit einer sehr kurzen Messzeit an jedem Wafer möglich. [121] [122]. Eine Detektion von optischen Fehlern wie Flecken und mechanische Fehler wie Risse oder Ausbrüche ist

Tabelle 6.2: Prozessschritt oder zu überprüfendes Qualitätsmerkmal und entsprechender Kontrollparameter sowie Messinstrument für eine Prozesskontrolle.

Zu Überprüfen	Messgröße	Messgerät
Elektr. Qualität Wafer	Lebensdauerermessung	μ PCD oder QSSPC
Defektätzen	Gewichtsverlust	Waage
Diffusion	Schichtwiderstand	Vierpunktmessgerät kontaktlos (in Entwicklung)
Isolation		In Entwicklung
Phosphorglasätzen	kein	kein
Antireflexschicht	Dickenverteilung	Kamera / Farberkennungssoftware
Druck der Kontakte	Position, Vollständigkeit	Kamera / Bilderkennungssoftware
Elektr. Qualität Zelle	Parameter IV-Kennlinie	IV - Messstand
Elektr. Qualität Zelle	Shuntmapping	Thermographie / Sperrstrom
Mech. Qualität Wafer	Risse und Ausbrüche	Kamera / Bilderkennungssoftware (Durchlichtverfahren)
Opt. Qualität Zelle	Flecken etc.	Kamera / Bilderkennungssoftware

sinnvoll, da diese Fehler entweder später im Prozess Probleme verursachen (z.B. Bruch bei Rissen) oder aber die Zellen können nicht verkauft werden (z.B. Flecken). Ebenfalls sinnvoll ist die Shuntdetektion der Zellen zusätzlich zur IV - Messung. Dies kann über eine Thermokamera erfolgen, mit der die Wärmeverteilung über die Zelle aufgenommen wird, während an der Zelle eine Spannung angelegt wird. Lokale Shunts erwärmen sich stärker als der Rest der Zelle [123]. Eine Shuntmessung ist von Bedeutung, da bei Abschattung einer Zelle die Modulspannung an der abgeschatteten Zelle abfällt und sich durch starke Erwärmung das Laminat ablösen kann.

Fehlerfreundliche Prozesse

Mit Fehlerfreundlichkeit ist gemeint, dass kleine Störungen oder Prozessschwankungen wenig Einfluss auf den Wirkungsgrad oder den Durchsatz haben sollten. Dies sei anhand des Siebdrucks veranschaulicht: Durch eine schmalere Öffnung im Sieb kann ein schmalerer Finger gedrückt werden und die Abschattung reduziert werden. Auch wenn dadurch die Leitfähigkeit des Fingers sinkt, wird es in der Regel vorteilhaft sein schmale Finger zu drücken. Andererseits verstopft das Sieb leichter und es kommt zu Fingerunterbrechungen. Diese beeinflussen den Wirkungsgrad der Solarzelle. Bei zu vielen Fingerunterbrechungen muss das Sieb gewechselt oder gereinigt werden, was den Durchsatz herabsetzt. Desweiteren ist für schmalere Öffnungen evtl. ein feineres Siebgewebe sinnvoll, welches wiederum anfälliger gegen Störungen ist. Ein sehr fehlerfreundlicher Prozess, wäre also einer, bei dem sehr breite Finger mit einem groben Gewebe gedrückt werden. Es wird zu wenig Fingerunterbrechungen und einem hohem Durchsatz aufgrund geringem Eingreifen wegen Reinigung etc. kommen. Dies ist abzuwägen gegen einen anfälligeren Prozess mit höherer Spitzenqualität. Für einen Produktionsbetrieb muss also die mittlere Qualität und die Streuung bei vertretbarem Eingriffszeiten und Durchsatz betrachtet werden.

6.3 Prozessfluss: Inline oder Batch

In den letzten Jahren ist die Frage der Inline - Prozessierung oft diskutiert worden. Einige Firmen verfolgen ein strenges Inline-Konzept, so dass die Produktionslinie in einer langen "Linie" angeordnet ist, wobei am Anfang die Wafer aus der Schachtel ausgepackt werden und am Ende nach Sortierung die Zellen in eine Schachtel verpackt werden. Ein wesentlicher Nachteil des Inline-Konzeptes ist, dass alle Geräte darauf ausgelegt werden müssen, dieselbe Anzahl von Zellen pro Zeit bearbeiten zu können. Leistet ein Gerät weniger, kann es meist nicht einfach erweitert werden, sondern limitiert den Durchsatz der gesamten Linie. Desweiteren muss die Störanfälligkeit einer Anlage sehr genau bekannt sein und entsprechende Puffer zwischen den Prozessschritten eingebaut werden, da sonst bei einer Störung die gesamte Linie angehalten werden muss. Es muss mindestens ein Puffer für so viele Zellen vorgesehen werden wie gleichzeitig in der vorangehenden Anlage prozessiert werden, da bei dem Ausfall einer Anlage die Zellen aus der entsprechenden Anlage aufgefangen werden müssen.

Die Alternative zum Inline-Betrieb ist ein Batch-Betrieb. Hierbei werden immer eine gewisse Anzahl von Wafern gleichzeitig prozessiert und dann als Einheit zur nächsten Station weitergeleitet. Der wesentliche Vorteil ist, dass Batchanlagen meist in mehrfacher Anzahl vorhanden sind, also zum Beispiel ein POCl_3 Diffusionsofen mit 4 Rohren. Fällt ein Rohr aus, kann der Betrieb der Linie mit gemindertem Durchsatz weitergehen und legt nicht die gesamte Produktion still. Desweiteren können Transportkassetten oder

Blisterpackungen gleichzeitig als Puffer zwischen den Stationen dienen. Somit kann die Pufferkapazität leicht ausgeweitet werden. Allerdings sind Batchanlagen meist schwieriger zu automatisieren. Zwar ist das Beladen von Kassetten und Booten inzwischen eine Standardaufgabe, jedoch führt ein Waferbruch während einer solchen Be- oder Entladung zu wesentlich größeren Problemen, als das bei einem Inline Konzept der Fall ist. Da die Batchgröße in den verschiedenen Anlagen meist nicht gleich ist, gestaltet sich die Verfolgung der Chargen schwieriger. Beim vollautomatischen Betrieb kann jedoch auch hier eine befriedigende Lösung gefunden werden, indem die Anlage wie eine Inline-Anlage betrieben wird: Die Wafer werden laufend von Kassetten in Prozessboote umgeladen, in verschiedenen Rohren prozessiert, aber in der gleichen Reihenfolge ausgeladen, wie sie beladen wurden.

In einigen modernen Produktionsanlagen werden deshalb manchmal beide Konzepte gemischt. So werden die nasschemischen Prozesse in Batches betrieben, Diffusion geschieht entweder über POCl_3 in einem Rohrofen oder über Spray-On-Quellen in einem Durchlaufbetrieb. Für die PECVD-SiN-Beschichtung werden wegen der leichten Anpassung an den geforderten Durchsatz und günstigeren Preises zur Zeit Batch-Anlagen vorgezogen und Siebdruck incl. Feuern der Kontakte geschieht in eine Inline-Drucklinie.

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Herstellungsprozess für multikristalline Industriesolarzellen entwickelt¹, der inzwischen in mehrere Produktionslinien transferiert worden ist. Kernpunkte des Prozesses sind die Oberflächen- und Volumenpassivierung durch Verwendung von **Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition** (PECVD) SiN_x und **Al-Back Surface Field** (BSF). Desweiteren wird durch das Feuern der Kontakte durch die Antireflexschicht und die Multifunktionalität der Prozessschritte eine hohe Prozessintegrität erreicht. Mit diesem Prozess wird in der Produktion unter Verwendung von blockgesessenen Siliziumwafern ein mittlerer Wirkungsgrad deutlich über 14% erzielt. Dies entspricht einer Steigerung von 15% relativ zu dem bis vor wenigen Jahren üblichen Industrieprozess unter Verwendung von TiO_2 .

In einem weiteren Teil der Arbeit wird die Erhöhung des Wirkungsgrads durch eine mechanische V-Textur untersucht. Bei V-texturierten Solarzellen bewirkt eine erhöhte Einsammelwahrscheinlichkeit der Ladungsträger, eine Reduktion der Reflexion und die bessere Ausnutzung von langwelligem Licht durch das schräge Einkoppeln (Lighthtrapping) eine Erhöhung des Kurzschlussstromes. Durch Vergrößerung der Oberfläche wird jedoch auch die Rekombination im Emitter und in der Raumladungszone erhöht, wodurch die offene Klemmspannung und der Füllfaktor sinken. Mittels Computersimulationen wurde abgeschätzt, dass der Wirkungsgrad im Modul im Vergleich zu alkalisch geätzten multikristallinen Standardsolarzellen um maximal 3% relativ gesteigert werden kann.

Damit die V-Texturierung industriell angewendet werden kann, muss der Texturierungsprozess hinsichtlich Ausbeute und Durchsatz optimiert sein. Es konnte gezeigt werden, dass Vibrationen und Welligkeit (warp) der Wafer die Ausbeute bei der mechanischen Bearbeitung limitieren. Basierend auf diesen Erfahrungen wurde in Kooperation mit dem Fraunhofer Institut für Produktionstechnologie in Aachen (FhG-IPT) eine Anlage entwickelt, bei der durch besonders hohe Steifheit von Spindel und Lagerung sowie angepasster Waferhalterung die Vibrationen von Wafer und Spindel minimiert werden konnten. Des Weiteren wurden mehrere Werkzeugvarianten untersucht und ein Konzept für industrielle Tests erarbeitet. Dabei wird Abriebschicht des Werkzeuges im Wesentlichen durch die Anforderungen an den geforderten Durchsatz und die hohe Standzeit bestimmt. Der Grabenwinkel des Profils von 100° wurde aufgrund der Optimierung auf Solarmodulebene

¹Mit Prozessentwicklung ist hier die Optimierung der Prozessparameter gemeint. Die Kombination der hier verwendeten Technologien wurde schon vor Beginn der Arbeit in der Literatur erwähnt, siehe z.B. [18] [118]

(s.u.) festgelegt. Um eine geringe Reflexion zu erreichen, muss der Krümmungsradius in der Profilspitze des Werkzeugs möglichst gering sein, er wird jedoch durch fertigungstechnische Gesichtspunkte beschränkt. Zur Minimierung der mechanischen Belastung des Wafers wird das Profil in zwei Schnitten erzeugt, wobei beim ersten Schnitt jeweils die Hälfte der Gräben erzeugt wird und das Werkzeug für den zweiten Schnitt um einen halben Spitzenabstand versetzt wird. Die Profiltiefe von $50\ \mu\text{m}$ ergibt sich aus der Optimierung der Ausbeute unter Berücksichtigung der Modulleistung.

Um eine möglichst hohe Leistung der Module aus V-texturierten Solarzellen zu erreichen, wurde der Standardprozess in wesentlichen Punkten angepasst und die Geometrie des V-Profiles optimiert. Wichtigster Punkt bei der Anpassung des Prozesses ist der Frontseitensiebdruck. Um ein Ausschmieren der Finger zu vermeiden, werden diese auf Plateaus gedruckt, welche parallel zu den Gräben verlaufen. Da bisher kein Alignment-system an Siebdruckern verfügbar ist, das die Plateaus als Druckposition erkennt, muss der Wafer sowohl beim Texturieren als auch beim Drucken an denselben Kanten ausgerichtet werden. Der Busbar verläuft senkrecht zu den Gräben, was zu Unterbrechungen an den Profilspitzen führen kann. Bei Verwendung einer geeigneten Paste und optimierten Druckparametern können solche Unterbrechungen jedoch vermieden werden. Neben dem Siebdruck muss die Dicke der Antireflexschicht auf das V-Profil sowie die Feuerparameter auf die geringere Zellmasse angepasst werden. Untersuchungen auf Modulebene ergaben eine maximale Modulleistung bei Verwendung eines Grabenwinkels von etwa 100° , womit die Simulationen bestätigt wurden. Die Steigerung im Kurzschlussstrom im Vergleich zu Modulen aus alkalisch geätzten multikristallinen Industriesolarzellen betrug dabei 1,9% relativ, jedoch ist die Messgenauigkeit nicht höher als 1% und Prozessschwankungen sind ebenfalls in dieser Größenordnung. Die Schwankungen im Füllfaktor sind höher, deshalb betrug die Leistungssteigerung der Module durch die V-Textur zwischen -0,2% und 3% relativ. Um genaue Werte zur Leistungssteigerung zu erhalten müssen Experimente mit einer deutlich höheren Anzahl an Solarzellen (> 1000 Stück) und Modulen durchgeführt werden. Dies ist jedoch nicht auf Labor-, sondern nur auf Pilotproduktionsebene möglich. Unter Berücksichtigung der beschriebenen Optimierungen wurde in der Produktionslinie der Firma Q Cells ein mittlerer Wirkungsgrad von 15,5% (50 Zellen der Größe $12,5 \times 12,5\ \text{cm}^2$) erreicht. Ein aus diesen Zellen hergestelltes 36-Zell-Modul hat eine Leistung von $85\ \text{Watt}_{peak}$. Dies liegt deutlich über der Leistung der zur Zeit kommerziell erhältlichen Module.

Aufbauend auf diesen Erfahrungen wurde im Labor ein Prozess mit mechanischer V-Textur und selektivem Emitter entwickelt und ein maximaler Wirkungsgrad von 16,2% auf einer $12,4 \times 12,4\ \text{cm}^2$ großen multikristallinen Solarzelle erzielt.

7.2 Ausblick

Zum Schluss dieser Arbeit sei ein Ausblick gegeben, wie die Entwicklung in den nächsten Jahren verlaufen könnte. Dieser basiert auf den Erfahrungen der letzten Jahre sowie Gesprächen mit Industriepartnern und Artikeln in Fachzeitschriften. Letztendlich ist es aber die persönliche Meinung des Autors.

Alle Hersteller von Solarzellen haben für die kommenden Jahre eine deutliche Erweiterung ihrer Produktionskapazität angekündigt und somit ist in den nächsten Jahren mit einer mittleren Steigerung der produzierten Solarzelleistung von etwa 25% p.a. zu rechnen. Bei den meisten der neuen Produktionslinien für kristalline Siliziumsolarzellen wird

voraussichtlich ein Prozess zur Anwendung kommen, der dem hier beschriebenen sehr ähnlich ist. Ausgangsmaterial ist blockgegossenes multikristallines Silizium, die Verwendung von PECVD SiN_x und Al-BSF sind Stand der Technik, der mittlere erreichte Wirkungsgrad liegt in der Größenordnung von 14,5–15%. Einige Hersteller setzen anderes Material ein (z.B. das Folienmaterial **E**dge-**d**efined **F**ilm-**f**ed **G**rowth (EFG) bei RWE Solar [124]) und nur wenige einen völlig anderen Prozess (**L**aser **G**rooved **B**uried **G**rid (LGBG) bei der Saturn Serie von BP Solar [70]). Der Anteil von monokristallinen Solarzellen wird weiter zurückgehen. Aufgrund der Produktionssteigerung wird die Nachfrage nach Siliziumwafern stark ansteigen und deshalb versucht, das eingesetzte Rohsilizium besser auszunutzen. So ist anzunehmen, dass verstärkt Folienmaterialien eingesetzt werden und bei herkömmlichen Wafern die Normaldicke in den nächsten 5 Jahren auf bis zu 200 μm bei einer Größe von bis zu 12,5 x 12,5 cm^2 abnehmen wird. Dies erfordert neben der Anpassung der Al-Paste, um die Biegung (bow) des Wafers zu minimieren [73], eine Optimierung der Ausbeute insbesondere beim Sägen der Wafer incl. Automatisierung und bei der Modulherstellung. Weiterhin werden die Zellhersteller die Kapazität der Anlagen möglichst voll ausnutzen und deshalb einige Produktionslinien auf 15,0 x 15,0 cm^2 Wafergröße umstellen². Durch Weiterentwicklung der Frontseitenpasten wird die Kontaktierung eines Emitters mit Schichtwiderstand bis zu 70 Ω/\square auch bei großem Prozessfenster möglich. Eine weitere Erhöhung des Schichtwiderstandes ist nicht sinnvoll, da das Modulglas im kurzwelligen Wellenlängenbereich zu viel absorbiert und der größere Serienwiderstand der Zelle mehr Verluste erzeugt als im Strom gewonnen wird. Siebdruck wird die Standard-Metallisierungstechnologie bleiben, jedoch werden Weiterentwicklungen im Sieb- und Schablonenbereich sowie bei der Paste Fingerbreiten unter 100 μm auch im industriellen Einsatz ermöglichen.

Im Bereich Oberflächentexturierung ist in den nächsten Jahren kein Durchbruch zu erwarten. Einige Hersteller werden evt. das saure Isotexturieren implementieren, die Mehrzahl der Solarzellen wird aber weiterhin noch alkalisch geätzt. Die mechanische Textur wird nur in Spezialbereichen wie z.B. der POWER-Solarzelle, bei Foliensilizium und im Waferrecycling eingesetzt werden.

Aufgrund steigender Nachfrage im Fassadenbereich ist in den nächsten Jahren mit der ersten Produktionslinie für Rückkontaktsolarzellen zu rechnen [54] [125] [126].

Um den Anforderungen der Zellentwicklung nachzukommen, ist mit der Anpassung der Modultechnologie auf die Verschaltung von dünneren Solarzellen und Rückkontaktsolarzellen unter Verwendung z.B. von leitenden Klebern zu rechnen [127].

Ob das derzeitige Wachstum länger als 5 Jahre anhält, ist von den politischen Rahmenbedingungen abhängig. Falls die Förderprogramme insbesondere in Deutschland und Japan so weitergeführt, ausgebaut bzw. auf Europa und die USA ausgeweitet werden, wird auch das Wachstum weiterhin auf hohem Niveau bleiben. Bei einem Rückgang der Förderungen ist mit einer Stagnation zu rechnen. Für diesen Fall werden verstärkt Effizienz und Ausbeute der bestehenden Produktionslinien optimiert werden. Langfristig ist in jedem Fall mit einem kontinuierlichen Wachstum zu rechnen, da der Energiepreis steigen wird und die Produktionskosten der Solarzellen sinken. Bedenkt man zusätzlich die Einsparpotentiale im Energiebereich, so kann Solarstrom in ca. 35 Jahren wirtschaftlich konkurrenzfähig sein [5]. Eine Förderung ist jetzt vor allem nötig, um die Nachfrage am Markt zu steigern, damit auf Seiten der Hersteller Investitionen in neue Technologien ge-

²Die meisten der in letzter Zeit gebauten Produktionslinien könnten bereits diese Wafergröße verarbeiten, der Prozess ist jedoch noch nicht etabliert.

macht werden. Eine Schlüsselfrage bei kristallinen Solarzellen wird hierbei die Herstellung von Solar Grade Silizium sein [11] [12] [128], also die Aufbereitung von Silizium extra für die Solarindustrie, die jetzt noch hauptsächlich Ausschussmaterial der Halbleiterindustrie verwendet. Gelingt es kostengünstig Silizium für die Solarindustrie in großer Menge bereitzustellen, werden auch in 10-15 Jahren Solarzellen auf Basis kristalliner Siliziumwafer den Markt dominieren und das Recycling entsprechender Module an Bedeutung gewinnen [129]. Noch ist nicht absehbar, ob und wann sie von Dünnschichtsolarzellen auf Basis anderer Materialien verdrängt werden.

Anhang A

Herleitungen und Berechnungen

A.1 Die Leitungsgleichungen (line equations)

In Abb. A.1 entspricht der serielle Widerstand R' der Leitung dem Widerstand der Halbleiterschicht, und der parallele Leitwert G' dem Leitwert des Kontaktes zwischen Halbleiterschicht und Kontakt. Der Kontaktfinger entspricht der negativen Leitung. Die Kapazität und die Induktivität werden vernachlässigt [130] [131].

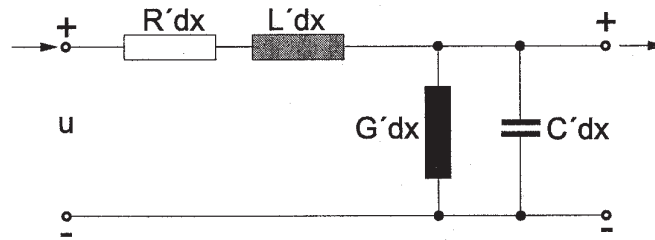


Abbildung A.1: Ersatzschaltbild für einen infinitesimalen Abschnitt einer elektrischen Leitung. Dabei ist R' der serielle Widerstand und G' der parallele Leitwert der Leitung [130].

Die x -Koordinate zeige entlang der elektrischen Leitung. Für einen infinitesimalen Abschnitt dx wählen wir das Ersatzschaltbild Abb. A.1. Ströme und Spannungen auf den Leitungen sind Funktionen der Zeit t und des Orts x . Am Ausgang des Ersatzschaltbildes sind der Strom i um $\frac{\partial i}{\partial x} dx$ und die Spannung u um $\frac{\partial u}{\partial x} dx$ gegenüber dem Eingang erhöht. Mittels der Kirchhoffschen Schleifen- bzw. Knotenregel ergibt sich nach einer Division durch dx das folgende System partieller Differentialgleichungen erster Ordnung für die Beschreibung der elektrischen Leitung.

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial x} &= - \left(R' + L' \frac{\partial}{\partial t} \right) i \\ \frac{\partial i}{\partial x} &= - \left(G' + C' \frac{\partial}{\partial t} \right) u\end{aligned}\tag{A.1}$$

Von Interesse ist nur die quasistationäre Lösung, d.h. die partikuläre Lösung, die dem eingeschwungenem Zustand entspricht. Hierzu wird angenommen, dass auf der Leitung nur eine Schwingung der Frequenz ω besteht. Dann lassen sich Strom und Spannung

durch folgende komplexe Zeiger ausdrücken: $i = \sqrt{2}\operatorname{Re}(Ie^{j\omega t})$ und $u = \sqrt{2}\operatorname{Re}(Ue^{j\omega t})$ ($j^2 = -1$). In (A.1) eingesetzt, folgt:

$$\begin{aligned}\sqrt{2}\operatorname{Re}\left(\frac{dU}{dx}e^{j\omega t}\right) &= -\sqrt{2}\operatorname{Re}\left((R' + j\omega L')Ie^{j\omega t}\right) \\ \sqrt{2}\operatorname{Re}\left(\frac{dI}{dx}e^{j\omega t}\right) &= -\sqrt{2}\operatorname{Re}\left((G' + j\omega C')Ue^{j\omega t}\right)\end{aligned}$$

Diese Beziehung ist zu allen Zeiten erfüllt, wenn:

$$\frac{dU}{dx} = -(R' + j\omega L')I \quad (\text{A.2})$$

$$\frac{dI}{dx} = -(G' + j\omega C')U \quad (\text{A.3})$$

Dies sind die Differentialgleichungen für U und I im eingeschwungenem Zustand. Sie bilden ein lineares System gewöhnlicher Differentialgleichungen mit konstanten Koeffizienten.

Differenziert man Gleichung (A.2) nach x und setzt $\frac{dI}{dx}$ aus Gleichung (A.3) ein, so erhält man für U die Wellengleichung:

$$\frac{d^2U}{dx^2} = (R' + j\omega L')(G' + j\omega C')U = \gamma^2 U \quad (\text{A.4})$$

wobei $\gamma^2 := (R' + j\omega L')(G' + j\omega C')$. Die Größe γ wird **Ausbreitungskonstante** genannt und hat die Dimension m^{-1} . Die allgemeine Lösung der Wellengleichung ist:

$$U(x) = u_1 e^{-\gamma x} + u_2 e^{\gamma x}. \quad (\text{A.5})$$

Die Größen u_1 und u_2 sind Integrationskonstanten, die sich aus den entsprechenden Anfangsbedingungen ergeben. Einsetzen von (A.5) in (A.2) liefert dann die allgemeine Lösung für den Strom:

$$I(x) = -\frac{1}{R' + j\omega L'} \frac{dU}{dx} = \frac{\gamma}{R' + j\omega L'} (u_1 e^{-\gamma x} - u_2 e^{\gamma x}). \quad (\text{A.6})$$

Mit der Definition des **Wellenwiderstandes**

$$\mathcal{Z} := \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}} \quad (\text{A.7})$$

vereinfacht sich (A.6) zu:

$$I(x) = \frac{1}{\mathcal{Z}} (u_1 e^{-\gamma x} - u_2 e^{\gamma x}). \quad (\text{A.8})$$

Durch Zusammenfassen der Glieder mit gleichen Koeffizienten vor den Exponentialfunktionen, z.B.: $U(x) = u_1 \frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2} - \mathcal{Z} i_1 \frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2}$, kann man die Hyperbelfunktion einführen. Die Lösungen der Differentialgleichungen für die elektrische Leitung (line equations) lauten also für den stationären Grenzfall:

$$U(x) = u_1 \cosh \gamma x - i_1 \cdot \mathcal{Z} \sinh \gamma x \quad (\text{A.9})$$

$$I(x) = i_1 \cosh \gamma x - \frac{u_1}{\mathcal{Z}} \sinh \gamma x \quad (\text{A.10})$$

A.2 Kontaktwiderstand

Es ergeben sich im TLM durch Vergleich der Größen des Kontaktes und Abb. A.1 folgende Beziehungen:

$$R' = \frac{\rho_s}{Z} \quad \text{und} \quad G' = \frac{Z}{\rho_c} \quad (\text{A.11})$$

Im Gleichstromfall erhält man für die charakteristische Impedanz \mathcal{Z} :

$$\mathcal{Z} = \sqrt{\frac{R'}{G'}} = \frac{1}{Z} \sqrt{\rho_s \rho_c} \quad (\text{A.12})$$

und für die Ausbreitungskonstante γ :

$$\gamma = \sqrt{R' G'} = \sqrt{\frac{\rho_s}{\rho_c}} = \frac{1}{L_T}. \quad (\text{A.13})$$

Die Spannung unter dem Kontakt nimmt nach Gl. (A.9) gemäß $U_x = U_0 e^{-x/L_T}$ ab. Die Transferlänge ist somit die Länge, auf der die Spannung auf $1/e$ abgefallen ist.

Mit Hilfe der Gleichungen (A.9) und (A.10) ergibt sich der **Kontaktwiderstand** (contact front resistance) zu

$$R_c = \frac{u_1}{i_1} \Big|_{i_2=0} = \mathcal{Z} \coth \gamma B \quad (\text{A.14})$$

wobei i_2 der Anteil des Stromes ist, der nicht durch den Kontakt fließt. Hierbei wird also die Annahme gemacht, dass der gesamte Strom durch den Kontaktfinger abfließt, d.h. $i_2 = 0$. Ferner wurde angenommen, dass die Fingerlänge Z gleich der Breite der Teststruktur ist.

Wird die Transferlänge L_T in Gleichung (A.14) bzw Gleichung (A.12) eingesetzt, erhält man für den Kontaktwiderstand folgende Beziehung:

$$R_c = \frac{\sqrt{\rho_s \rho_c}}{Z} \coth \left(\sqrt{\frac{\rho_s}{\rho_c}} \cdot B \right) = \frac{\rho_s L_T}{Z} \coth \left(\frac{B}{L_T} \right) = \frac{\rho_c}{L_T Z} \coth \left(\frac{B}{L_T} \right). \quad (\text{A.15})$$

Der Faktor $\coth \left(\frac{B}{L_T} \right)$ trägt der Tatsache Rechnung, dass der Strom nicht homogen über den ein Fläche des Kontaktes den Kontakt übergeht, sondern inhomogen verteilt über die Transferlänge (siehe Abb. 1.7 b)).

A.3 Berechnung der Verluste einer Solarzelle

Um einen Überblick über die Verluste in der Zelle zu erhalten werden in dem von B. Fischer erstellten Programm folgende Werte berechnet:

Die Kurzschlussstromdichte einer idealen Zelle $J^{tot\ inc}$:

$$J^{tot\ inc} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} q \cdot \Phi_{in(\lambda)} d\lambda, \quad (\text{A.16})$$

weiterhin werden folgende Verlustmechanismen in Form einer Kurzschlussstromdichte berücksichtigt:

Abschattungsverluste durch die Metallisierung:

$$J^{shadow} = J^{tot\ inc} \cdot M^{IV}, \quad (\text{A.17})$$

die Verluste durch Reflexion der Antireflexschicht:

$$J^{refl\ ARC, IV} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} q \cdot \Phi R_{(\lambda)}^{cell} (1 - M^{IV}) d\lambda, \quad (\text{A.18})$$

die Verluste durch Absorption in der Antireflexschicht

$$J^{abs\ ARC, IV} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} q \cdot \Phi A_{(\lambda)} (1 - M^{IV}) d\lambda, \quad (\text{A.19})$$

und die Summe der optischen Verluste:

$$J^{opt.\ loss} = J^{shadow} + J^{refl\ ARC, IV} + J^{abs\ ARC, IV}. \quad (\text{A.20})$$

Die Kurzschlussstromdichte der generierte Ladungsträger ergibt sich danach zu:

$$J^{gen} = J^{tot\ inc} - J^{opt.\ loss}. \quad (\text{A.21})$$

Anhand der EQE (siehe Gl. 1.13) lässt sich die tatsächlich beitragenden Ladungsträger ohne Berücksichtigung der Metallisierung errechnen:

$$J_{sc}^{EQE} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} q \cdot \Phi_{in(\lambda)} EQE_{(\lambda)}^{scaled} d\lambda \quad (\text{A.22})$$

berücksichtigt man nun noch die Abschattung der Metallisierung ergibt sich:

$$J_{sc}^{IV} = J_{sc}^{EQE} (1 - M^{IV}) \quad (\text{A.23})$$

daraus lassen sich nun die Verluste durch Rekombination errechnen:

$$J^{rec} = J^{gen} - J_{sc}^{IV} \quad (\text{A.24})$$

Ist der Skalierungsfaktor S nicht bekannt, kann er aus der Kurzschlussstromdichte der IV - Messung $J_{sc}^{IV, mess}$ errechnet werden nach:

$$S = \frac{J_{sc}^{IV, measured}}{J_{sc}^{EQE, unscaled}} \frac{1}{1 - M^{IV}} \quad (\text{A.25})$$

Hierbei ist $J_{sc}^{EQE, unscaled}$ analog zu Gleichung A.22 berechnet, nur dass nicht die skalierte, sondern unskalierte EQE verwendet wird.

Auch wird eine gewichtete Reflexion berechnet, die in früheren Arbeiten als effektive Reflexion bezeichnet wurde:

$$R_{(eff)} = 1 - \frac{J_{sc}^{IV}}{J_{sc}^{ideal}} \quad (\text{A.26})$$

dabei ist:

$$J_{sc}^{ideal} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} q \cdot \Phi_{in(\lambda)} IQE_{(\lambda)}^{scaled} d\lambda \quad (\text{A.27})$$

A.4 Geometrie der V-Textur

Die Oberfläche kann in eine texturierte und eine untexturierte Fläche (Plateaus für den Finger des Frontkontaktes) unterteilt werden. Dann ist der Plateaubandabstand gleich dem Fingerabstand F und besteht aus n Gräben mit Spitzenabstand a und der Plateaubreite P (siehe Abb. A.2).

$$F = n \cdot a + P \quad (\text{A.28})$$

Der Spitzenabstand wiederum teilt sich auf die Projektionen der Grabenlänge L_G^* , der Flankenlänge L_F^* sowie der Spitzenlänge L_S^* auf (siehe Abb. A.2).

$$a = L_G^* + L_F^* + L_S^* \quad (\text{A.29})$$

Um weitere Berechnungen einfach zu gestalten wird, der Geometriefaktor Gf als Verhältnis der Oberflächen von texturierten zur flachen Zelle eingeführt:

$$Gf = \frac{n \cdot a + P}{n \cdot (L_G + L_F + L_S) + P} \quad (\text{A.30})$$

Aus geometrischen Überlegungen (siehe Abb. A.2) ergeben sich die Projektionen und entsprechenden Längen durch die Krümmungsradien K_G für den Graben bzw. K_S für die Spitze und den Öffnungswinkel α . Es ist hierbei $\beta = 90 - \frac{\alpha}{2}$

$$L_G^* = 2K_G \cdot \sin(\beta) \quad (\text{A.31})$$

$$L_S^* = 2K_S \cdot \sin(\beta) \quad (\text{A.32})$$

sowie

$$L_G = K_G \cdot \frac{2\pi \cdot (\beta)}{360} \quad (\text{A.33})$$

$$L_F = L_F^* \cdot \frac{1}{\sin(\frac{\alpha}{2})} \quad (\text{A.34})$$

$$L_S = K_S \cdot \frac{2\pi \cdot (\beta)}{360} \quad (\text{A.35})$$

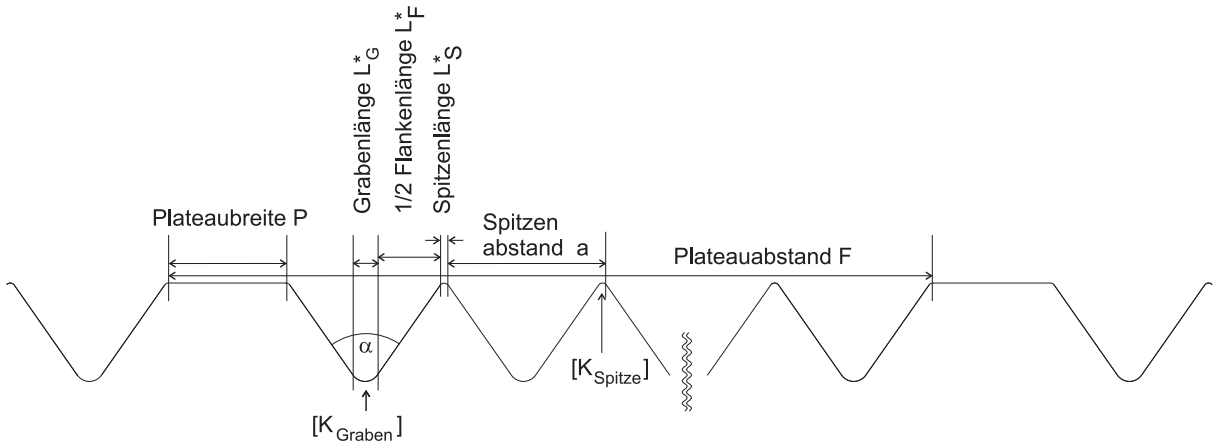


Abbildung A.2: Geometrie der Oberfläche.

Es seien H_G und H_S die überstehenden Höhen im Graben und in der Spitze, damit ergibt sich für die Profiltiefe s (Siehe Abb. A.3):

$$s = \frac{a}{2} - H_G - H_S \quad (\text{A.36})$$

$$H_G = \frac{K_G \cdot \sin(\beta)}{\tan(\frac{\alpha}{2})} + K_G \cdot (1 - \cos(\beta)) \quad (\text{A.37})$$

$$H_S = \frac{K_S \cdot \sin(\beta)}{\tan(\frac{\alpha}{2})} + K_S \cdot (1 - \cos(\beta)) \quad (\text{A.38})$$

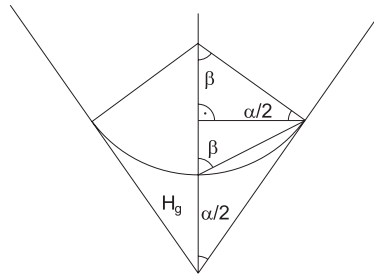


Abbildung A.3: Details im Grabenboden.

Anhang B

Siebdruck

B.1 Anlagenparameter beim Siebdruck

B.1.1 Rakel

In der Dickschichttechnik sind zwei verschiedene Rakelformen im Einsatz, das Flach- und das Diamantrakel. Durch das Diamantrakel wird der Rakeldruck direkter übertragen und Veränderungen machen sich eher im Druckbild bemerkbar. Das Diamantrakel verformt sich kaum bei Unebenheiten im Substrat, die sich dann stärker auf das Druckbild auswirken. Somit sollte für den Druck auf unebene Substrate besser Flachrakel eingesetzt werden. Für den Druck von feinen Linien werden meist Diamantrakel verwendet.

B.1.2 Rakelgeschwindigkeit

Je höher die Rakelgeschwindigkeit ist, desto eher neigt das Rakel dazu aufzuschwimmen (vergleichbar mit dem Aquaplaning-Effekt), dies kann jedoch durch höheren Rakeldruck kompensiert werden. Es sollte darauf geachtet werden, dass das Sieb "leergedruckt" wird. Bei zu hoher Rakelgeschwindigkeit wird besonders an Ende des Substrates Paste wieder vom Substrat heruntergerissen. Die Rakelgeschwindigkeit beeinflusst unter anderem die Dauer, die das Sieb am Substrat haftet. Bei großem Absprung haftet das Sieb gerade die Zeit, die das Rakel über das Substrat fährt, also bei niedriger Rakelgeschwindigkeit länger. Bei geringem Absprung und hoher Rakelgeschwindigkeit haftet das Sieb länger am Substrat, als das Rakel über das Substrat fährt, somit kann es hierbei der Fall sein, dass das Sieb bei hoher Rakelgeschwindigkeit länger am Substrat haftet, als bei niedriger. Bleibt das Sieb zu lange am Substrat haften wirkt sich das in unsauberer Konturen aus.

B.1.3 Rakeldruck

Der Rakeldruck muss zum einen die Siebspannung überwinden und das Sieb auf das Substrat drücken, zum anderen die Paste durch das Sieb pressen und das Aufschwimmen des Rakels bei gegebener Rakelgeschwindigkeit verhindern. Bei zu hohem Rakeldruck verzerrt das Rakel das Sieb und die Passgenauigkeit wird schlechter.

B.1.4 Rakelhöhe

Die Rakelhöhe liefert einen Anschlag, so dass das Rakel nicht weiter heruntergedrückt werden kann. Sie sollte 0,2 - 0,3 mm unterhalb der Substrathöhe liegen, damit das Rakel Unebenheiten im Substrat zwar folgt, aber bei der Substratkante das Sieb nicht beschädigt wird.

B.1.5 Absprung

Über den Absprung wird die Größe der Siebfläche eingestellt, die beim Druck auf dem Substrat aufliegt. Je größer diese Fläche, desto unsauberer werden die Konturen und desto höher die Kraft, mit der das Sieb beim Ablösen an dem Substrat zieht. Dies kann dazu führen, dass das Substrat am Sieb kleben bleibt. Auf der anderen Seite führt ein großer Absprung auch zu einem schnelleren Verschleiß des Siebes, da das Gewebe verformt wird.

B.2 Siebparameter

B.2.1 Gewebe

Die Art des Gewebes hat entscheidenden Einfluss auf das Druckbild. Für den Solarzellendruck werden meist Gewebe aus Edelstahldraht verwendet, da diese stärker gespannt werden können, als Polyestergewebe. Eine höhere Siebspannung erlaubt einen geringeren Absprung und damit einen besseren Druck. Die zwei wichtigsten Funktionsgrößen der Gewebe sind die Maschenweite w und der Drahtdurchmesser d (Siehe auch Abb. B.1).

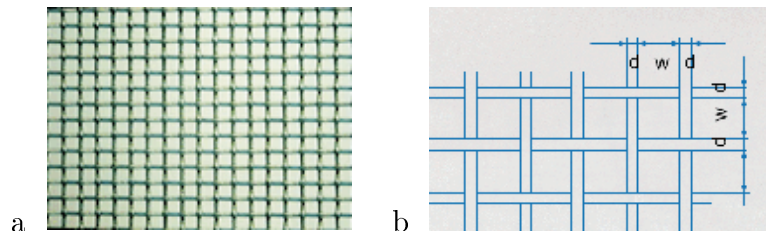


Abbildung B.1: a) Gewebe eines Siebes und b) Maschenweite w und Drahtdurchmessers d des Siebgebewebes (rechts) [132].

Eine gängige Angabe zur Art des Gewebes ist die Meshzahl, sie ist definiert als die Anzahl der Drähte pro inch:

$$Mesh = \frac{25,4\text{mm}}{w[\text{mm}] + d[\text{mm}]} \quad (\text{B.1})$$

Je feiner das Gewebe ist, desto feinere Konturen lassen sich drucken. Allerdings wird das Sieb auch anfälliger auf Beschädigungen.

Je feiner das Gewebe, desto geringer ist auch die offene Siebfläche a_o (siehe auch Abb. B.2 und Formel B.2, und somit die Menge der Paste, die gedruckt werden kann.

$$a_o = \left(\frac{w}{w + d}\right)^2 \cdot 100\% \quad (\text{B.2})$$

B.2.2 Theoretisches Farbvolumen

Mit Hilfe der Gewebedicke D (siehe auch Abb. B.2) wird das theoretische Farbvolumen V_{th} als Mass für die maximal verdruckte Pastenmenge errechnet (siehe auch Abb. B.2 und Formel B.3).

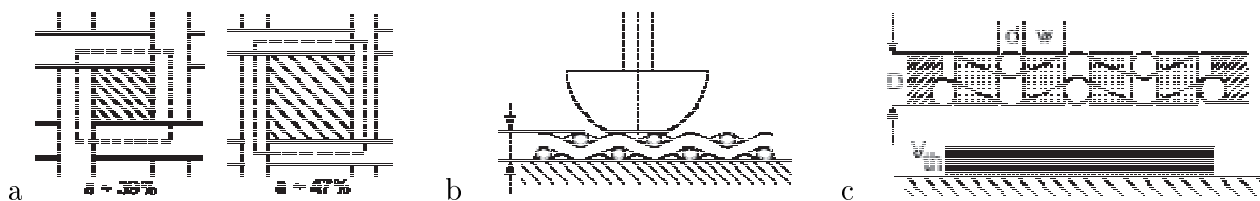


Abbildung B.2: a) Siebfläche. b) Gewebedicke des Siebgewebes. c) Farbvolumen des Siebgewebes [132].

$$V_{th} = \left(\frac{w}{w+d}\right)^2 \cdot D \quad (\text{B.3})$$

mit w, d, D in μm , V_{th} in cm^3/m^2 So ist zum Beispiel ist für ein Sieb mit $90\mu\text{m}$ Maschenweite und $36\mu\text{m}$ Drahtdurchmesser die offene Siebfläche 51% und die Meshzahl 200.

Bei feinen Konturen, bestimmt jedoch nicht nur das theoretische Farbvolumen, sondern auch die Dicke der Emulsion die Dicke des Druckbildes. Hierbei ist jedoch zu beachten, sich nicht beliebig feine Konturen in beliebig dicke Emulsionen einbringen lassen und sich die Paste noch gut aus dem Sieb lösen muss, also die Adhesion zwischen Paste und Substrat die zwischen Paste und Sieb übersteigt.

B.2.3 Rahmen

Der Rahmen sollte gross genug, dass bei nötigem Absprung das Gewebe nicht zu schnell ermüdet. Somit sollte das Sieb etwa drei mal so lang sein, wie der Rakelweg (Strecke, die das Rakel über das Sieb fährt) und doppelt so breit wie das Rakel.

Publikationen

P. Fath, C. Zechner, B. Terheiden, A. Boueke, C. Marckmann, C. Gerhards, R. Tölle, M. Spiegel, G. Willeke and E. Bucher, „*Processing, Characterisation and Simulation of Advanced Mechanically Textured Mono- and Multicrystalline Silicon Solar Cells*“ Proc. 14th EC PVSEC, p. 73-76 (1997).

C. Gerhards, C. Marckmann, R. Tölle, M. Spiegel, P. Fath, G. Willeke and E. Bucher, „*Mechanically V-Textured Low-Cost Multicrystalline Silicon Solar Cells with a Novel Printing Metallization*“, Proc. 26th PVSC; p. 43-46 (1997).

M.Spiegel, R. Tölle, C. Gerhards, C. Marckmann, H. Nussbaumer, P. Fath, G. Willeke and E. Bucher, „*Implementation of Hydrogen Passivation in an Industrial Low-Cost Multicrystalline Silicon Solar Cell Process*“, Proc. 26th, PVSC, p. 151-154 (1997).

C. Gerhards, F. Huster, M. Spiegel, C. Marckmann, P. Fath, G. Willeke and E. Bucher, „*Progress in Machine and Tool Development Towards the Implementation of the Mechanical Texturization in a Cr Si Solar Cell Production Line*“, Proc. 2nd, WPVSEC, p. 1836-1839 (1998).

F. Duerinckx, F.; Szlufcik, J.; Nijs, J.; Mertens, R.; Gerhards, C.; Markmann, C.; Fath, P., and Willeke, G. „*High efficiency, mechanically V-textured, screen-printed multicrystalline silicon solar cells with silicon nitride passivation*“. Proc. 2nd, WPVSEC, p. 1248-1253 (1998)

F. Huster, C. Gerhards, M. Spiegel, P. Fath, and E. Bucher, „*Roller printed multicrystalline silicon solar cells with 16% efficiency and 25 m finger width*“, Proc. 27th IEEE PVSC, p. 205-208 (2000).

M. Spiegel, C. Gerhards, F. Huster, W. Jooss, P. Fath, E. Bucher „*Industrially Attractive Front Contact Formation Methods for Mechanically V-grooved Multicrystalline Silicon Solar Cells*“ Proc. 12th IPVSEC (2001).

G. Hahn, C. Gerhards, M. Spiegel, C. Zechner, P. Fath, GT. Willeke, E. Bucher, H.-U. Höfs, C. Häßler, S. Thurm, F. Duerinckx, F.; Szlufcik, J.; Nijs, F. Ferazza, C. Bucci, A.M. Vallera, J.M. Serra, J. Maria Alves, R. Gamboa, J.C. Henriques. „*Overvie and Results of the EC HEXSI Project*“, Proc. 16th EPVSEC, p. 1095-1099 (2000).

C. Gerhards, P. Fath, E. Bucher., „*Mechanical Microtexturization for Multicrystalline Si Solar Cells*“, Proc. 16th EPVSEC, p. 1385-1389 (2000).

C. Gerhards, A. Fischer, M. Spiegel, P. Fath and E. Bucher, B. Leifhelm and M. Weck, „*High Throuput Mechanical Structuring System for Solar Cell Wafers*“ Proc. 17th EPVSEC (2001).

A. Schneider, C. Gerhards, F. Huster, W. Neu, M. Spiegel, P. Fath, E. Bucher, R.J.S

Young, A.G. Prince, J.A. Raby, A.F. Carroll, „*Al-BSF for thin Screenprinted Multicrystalline Si Solar Cells*“ Proc. 17th EPVSEC, (2001).

Literaturverzeichnis

- [1] IIASA [International Institute for Applied Systems Analysis] „*Global Energy Perspectives*“, University Press, Cambridge (1998).
- [2] A.Hennicke, „*Die globale Faktor Vier-Strategie für Klimaschutz und Atomausstieg*“ Campus Verlag, Frankfurt/ New York (1999).
- [3] WEC [World Energy Council], „*Global Energy Perspectives to 2050 and Beyond*“, University Press, Cambridge (1995)
- [4] Christoph Butz, „*PV 2001, Markt Akteure und Prognosen*“, Studie des Bankhauses Sarasin, Basel (2001), www.sarasin.ch/sustainability
- [5] O. Langniß, J. Luther, J. Nitsch, E. Wiemken, „*Strategien für eine nachhaltige Energieversorgung - Ein solares Langfristszenario für Deutschland*“, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme. Stuttgart, Freiburg, Oktober 1997 (2. Aufl., März 1998). Auch in: Workshops des Forschungsverbunds Sonnenenergie (Hrsg.: H.P. Hertlein, P.Tolksdorf), Workshop 12.12.1997 in Freiburg, ISSN 0949-1082, Köln, April 1998.
- [6] Shell-Prognose aus G. Eisenbeiß, Perspektiven für die Energie der Zukunft, Spektrum der Wissenschaften, Dossier: Klima und Energie, Juni 1996.
- [7] Publicable Report des EU ASCEMUS Projektes, Untersuchung PECVD SiN_x, Shell Solar Energy.
- [8] , G. Hahn, P. Geiger, P. Fath, E. Bucher „*Hydrogen Passivation of Ribbon Silicon Electronic Properties and Solar Cell Results*“, Proc. 28th IEEE VSEC (2001)
- [9] W. Jooss, Dissertation, Universität Konstanz 2002
- [10] Rainer Tölle, „*Herstellung und Charakterisierung von kristallinen Low-Cost Silizium-Solarzellen*“, Diplomarbeit, Universität Konstanz (1997)
- [11] W. Koch, P. Woditsch, „*Solar Grade Silicon Feedstock Supply for PV Industry*“, Proc. 17th EPVSC
- [12] Y. Sakaguchi, N. Yuge, N. Nakamura, H. Baba, K. Hanazawaa, M.Abe and Y. Kato, „*Purification of Metallic Grade Silicon up to Solar Grade by Nedo Melt Purification Process*“, Proc. 14th EPVSEC, p 157-160 (1997)

- [13] Firmenbroschüre der Deutsche Solar AG , Freiberg (2001) (ehemals Bayer Solar)
- [14] GT Solar Infoplakat zur Herstellung von HEM
- [15] Hässler, „*Multicrystalline Baysix silicon for high efficient solar cells from the new Freiberg Production Facility*“, Proc. 2nd WPVSC (1998), p. 1886-1889
- [16] K.F. Teng and R.W. Vest, „*Ink Jet Printer Metallization for Low Cost Flat Plate Solar Cells*“, Proc. 19th IEEE PVSC (1987), p. 1430
- [17] Hahne, Reis, Hirth, Huljic, Preu, „*pad printing - a novel thick-film technique of fine line printing for solar cells*“, Proc. 2nd WPVSC (1998), p. 1646-1649
- [18] F.J. Bottari, J. Hanoka and F. W. Sylva, „*Method of Applying Metallized Contacts to a Solar Cell*“, U.S. Patent No. 5151386 (1992) und U.S. Patent No. 5151377 (1992)
- [19] S. Roberts, T. Bruton , „*Reduction of module power losses by optimisation of the tabbing ribbon*“, Proc. 16th EPVSC (2000), p. 2378-2381
- [20] B. Fischer, „*Evaluation of Solar Cell J(V) - Measurements with a Distributed Series Resistance Model*“, Proc. 16th EPVSEC (2000)
- [21] A.S.H. van der Heide, A. Schönecker, G.P. Wyers, W.C. Sinke, „*Mapping of contact resistance and locating shunts on solar cells using resistance analysis by mapping of potential (RAMP) techniques*“, Proc. 16th EPVSC (2000), p. 1438-1441
- [22] B. Fischer, „*Representative Values from Lifetime and Diffusionlengths Mappings*“ submitted to Journal of Applied Physics 2002
- [23] Richard J.S. Young, Alan F. Carroll, „*Advances in Front - side Metallisations for Silicon Solar Cells*“, Proc. 16th EPVSC (2000), p 1731 -1734
- [24] Verkaufsprospekt der Solamed Pastenserie für die Kontaktierung von Solarzellen der Firma DuPont (1998)
- [25] J. Bultmann, ECN, Projektantrag des EU-Projektes EC2Contact.
- [26] B. Thuillier, S. Berger, J. P.Boyeaux, A. Laugier., „*Observation of Mechanisms of Screen Printed Contact Formation During Heat Treatment on Multicrystalline Silicon Solar Cells by Transmission Electron Microscopy*“, Proc. 28th IEEE PVSC (2000)
- [27] G. Schubert, Diplomarbeit, Universität Konstanz (2002)
- [28] D. Meier, D. Schroder, „*Solar Cell Contact Resistance – A Review*“, IEEE Transactions on Electron Devices **ED-31**, no. 5,637-647 (Mai 1984)
- [29] D. Meier, D. Schroder, „*Contact Resistance: Its Measurement and Relative Importance to Power Loss in a Solar Cell*“, IEEE Transactions on Electron Devices **ED-31**, no. 5, 647-650 (Mai 1984)
- [30] Dieter K. Schroder, „*Semiconductor Material and Device Characterization*“, J. Wiley & Sons (1990)

- [31] H. Berger, „*Models for Contacts to Planar Devices*“, Solid State Electronics **15**, 145-158 (Feb. 1972)
- [32] B. Fischer, „*Auswertesoftware zum Kontaktwiderstandsmessprogramm*“,
- [33] , A.Schönecker, A Zastrow, K. Bücher „*Accurate Spectral Response Measurements of non linear High Efficiency Solar Cells*“, Proc. 12th EPVSEC (1994), p. 500-503
- [34] B. Fischer, Anleitung zur SR-Messung und bestimmung der IQE, Universität Konstanz (2001)
- [35] R. Brendel, R. Plieninger „*IQE1D Manual, IQE1D, programm for the analysis of solar cell quantum efficiency measurements*“, Garching Innovation GmbH München (1996)
- [36] ,S. Keller „*Optoelektronische Charakterisierung von kirstallinen Silizium Solarzellen*“, Diplomarbeit, Universität Konstanz, (1997)**15**
- [37] Montgomery, Douglas C. „*Design and analysis of experiments*“, 2. ed. New York: Wiley, ISBN 0-471-88908-3 (1984)
- [38] Bart „*Stochastik*“, Ehrenwirth, ISBN 3-431-02511-0 (1988)
- [39] Turner, „*On the Mechanism of Chemically Etching Germanium and Silicon*“, Journal of the Electrochemical Society, Oct. 1960 p. 810 - 816
- [40] D.L. King and M.E. Buck, „*Experimental Optimisation of an Anisotropic Etching Process for Random Texturisation of Silicon Solar Cells*“, Proc. 22nd IEEE PVSC, p. 303-308 (1991)
- [41] E. Vazsonyi, K. De Clercq, R. Einhaus, E. Van Kerschaver, K Said, J. Poortmans, J. Szlufcik and J. Nijs, „*Improved Anisotropic Etching Process for Industrial Texturing of Silicon Solar Cells*“, Solar Energy Materials & Solar Cells **57**, p. 179- 188 (1999)
- [42] S.Arimoto, M.Nakatani, Y.Nishimoto, H.Morikawa, M.Hayashi, H.Namizaki, and K.Namba, „*Simplified Mass-Production Process for 16% Efficiency Multicrystalline Si Solar Cells*“, Proc. 28th IEEE PVSC (2000), p. 188-193
- [43] A. F. Bogenschütz, „*Ätzpraxis für Halbleiter*“, Carl Hauser Verlag, München (1967)
- [44] R. Einhaus, E. Vazsonyi, J. Szlufcik, J. Nijs, R. Mertens, „*Isotropic Texturing of Multicrystalline Silicon Wafer with Acidic Texturing Solutions* Proc. 26th IEEE PVSEC (1997)
- [45] M. Meuris, P.W. Mertens, A. Optebeeck, H.F. Schmid, M. Depas, G. Veerecke, .M.M. Heyns, A.Philipossian „*The IMEC clean:A New Concept for Particle an Metal Removal on Si Surfaces*“, Solid State Technology **38** (1995), p. 109-114
- [46] , J. Szlufcik et.al. „*Monocrystalline Silicon Solar Cell Cost Effective Production Technology (MONOCEPT)- Achievements and Exploitation of the Project Results*“, Proc. 16th EPVSEC (2000)
- [47] HFO₃ Reinigung, Prospekt der Firma ASTEC GmbH, Berg / Deutschland

- [48] Schumacher Air Products and Chemicals, Inc. „*Manual POCl₃-Quelle*“, 1969 Palomar Oaks Way, Carlsbad, California (1993)
- [49] M.J.A.A. Goris, A.W. Weeber (ECN, Petten), W. Jooss, F. Huster, „*Comparison of emitters diffused using an IR belt furnace and a POCl₃ system*“ Proc. 17th EPVSEC (2001)
- [50] Rob A. Steeman, Marcel Lefrancois, „*RTP Emitter Diffusion in an Industrial Process*“, Proc. 28th IEEE PVSC (2000), p. 288-290
- [51] Mündliche Information der Firma Centrotherm (Hersteller des verwendeten Diffusionsofens)
- [52] Dessis Softwarepaket zur Simulation von Halbleiterdevices, ISE, Zürich, CH
- [53] K. Faika, R. Kühn, P. Fath, and E. Bucher, „*Novel Techniques to Prevent Edge Isolation of Silicon Solar Cells by Avoiding Leakage Currents Between the Emitter and the Aluminium Rear Contact*“, Proc. 16th EPVSEC (2000)
- [54] A. Kress, P. Fath, E. Bucher, „*Recent Results in low Cost Back Contact Solar Cells*“, Proc. 16th EPVSC (2000), p. 1359-1362
- [55] A. Hauser, G. Hahn, M. Spiegel, H. Feist, O. Breitenstein, J.P. Rakotoniaina, P. Fath, E. Bucher, „*Comparison of Different Techniques for Edge Isolation*“, Proc. 17th EPVSEC (2001)
- [56] J. Szlufcik, K. De Clercq, P. De Schepper, J. Poortmans, A. Buczkowski, J. Nijs, R. Mertens, „*Improvement in Multicrystalline Silicon Solar Cells after Thermal Treatment of PECVD Silicon Nitride AR Coating*“, Proc. 12nd EPVSEC (1994), p. 1018-1022.
- [57] C. Leguijt, P. Lölgen, J.A. Eikelboom, A.W. Weeber, F.M. Schuurmans, W.C. Sinke, P.F.A. Alkemade, P.M. Sarro, C.H.M. Maree, and L.A. Verhoef, „*Low Temperature Surface Passivation for Silicon Solar Cells*“, Sol. En. Mat. Sol. Cells **40** (1996), p. 297-345.
- [58] W.J. Soppe, C. Devilée, S.E.A. Schiermeier, J. Hong, W.M.M. Kessels, M.C.M. van de Sanden, W.M. Arnoldbik, A.W. Weeber „*Bulk and surface passivation by silicon nitride grown by remote microwave PECVD*“, Proc. 17th EPVSEC (2001)
- [59] Interner Bericht über die Optimierung der PECVD SiN_x - Schicht, Universität Konstanz, Lehrstuhl Prof. Dr. Bucher (1999)
- [60] K. Coates, S. Morrison, S. Narayana and A. Madan, „*Deposition of Silicon Nitride to Improve the conversion Efficiency of Multicrystalline Silicon Solar Cells*“, Proc. 16th EPVSC (2000)
- [61] W.Soppe, H. de Moor, W. Sinke, T. Lauinger, R. Auer, B. Lenkeit, A. Aberle, „*Cost-effective mc Si Cell Processing by Sreenprinting on Remote-PECVD Layers*“, Proc. 2nd WPVSEC (1998), p. 1826-1828

- [62] A. Hauser, M. Spiegel, P. Fath, E. Bucher, „*Influence of an Ammonia Activation Prior to the PECVD-SiN Deposition on the Solar Cell Performance*“, Proc. 12th IPVSEC (2001)
- [63] H. H. C. de Moor, A. W. Weeber, J. Hoornstra, W. C. Sinke „*Fine-line screen printing for silicon solar cells*“, Proc. 6th Workshop on the role of impurities and defects in silicon device processing, 1996, NREL/SP - 413- 21551
- [64] J. Hornstra, S. Roberts, H. de Moor, T. Bruton, „*First experiences with double layer stencil printing for low cost production of solar cells*“, Proc. 2nd WPVSEC (1998), p. 1527-1530
- [65] F. Huster, Programm zur Optimierung eines Fingergrids
- [66] Kruzek , „*Infrared Furnaces for Firing Solar Cell Contacts* “, Informationsschrift der Firma RTC, USA
- [67] D. Hulcik, D. Biro, R. Preu, C. Castillo, R.Lüdemann, „*Rapid Thermal Firing of Screen Printed Contacts For Large Area Crystalline Silicon Solar Cells*“, Proc. 28th IEEE PVSC (2000), p. 379-382
- [68] K. Mahfoud, B. Pivac, J. C. Muller, „*P/Al co-gettering effectiveness in various polycrystalline silicon*“, Solar Energy Materials and Solar Cells **46**, (1997),p. 123
- [69] , W. Jooss „*Getterstudien an multikristallinem Silizium*“,Diplomarbeit, Universität Konstanz 1998
- [70] N.B. Mason, D. Jordan, J G Summers „*A High Efficiency Silicon Solar Cell Production Tecnology*“,Proc. 12th EPVSEC (1990)
- [71] A. Rohatgi et al. „*Aluminium-enhanced PECVD SiN Hydrogenation in Silicon Ribbons*“, Proc. 16th EPVSEC (2000)
- [72] B. L. Sopori et.al., „*Hydrogen in Silicon: A discussion of diffusion and passivation mechanisms*“, Solar Energy Materials and Solar Cells **41/42** (1996), p. 159-169
- [73] A. Schneider, C. Gerhards, F. Huster, W. Neu, M. Spiegel, P. Fath, E. Bucher, R.J.S Young, A.G. Prince, J.A. Raby, A.F. Carroll, „*Al-BSF for thin Screenprinted Multicrystalline Si Solar Cells*“ Proc. 17th EPVSEC (2001)
- [74] S. Narasimha, A. Rohatgi, „*Optimized Aluminium Back Surface Field Techniques For Silicon Solar cells*“, Proc. 26th IEEE PVSC (1997)
- [75] A. Kaminski, B. Vandelle, J.P. Boyeaux, A. Laugier, R. Monna, Le Quam Nam, D. Sarti „*BSF analysis on multicrystalline silicon solar cells*“, Proc. 16th EPVSEC (2000), p. 1267-1270
- [76] H.Nakaya, M. Nisida,Y.Takeda, S.Moriuchi, T.Tonegawa, T.Machida T.Nunoi, „*Polycrystalline silicon solar cells with V-grooved surface*“, Sol. Energy Mater. Solar Cells **34** (1994), p. 219-225

- [77] Duerinckx, J Szlufcik, J. Nijs, R. Mertens and C. Gerhards, C. Marckmann, P. Fath, G. Willeke, „*High efficiency mechanically V-textured screen printed multicrystalline silicon solar cells with silicon nitride passivation*“, Proc. 2nd WPVSC, p. 1248-1253 (1999)
- [78] J.H.Wohlgemuth, T. Koval, D. Whitehouse, J. Creager, „*Evaluating the Effectiveness of Optical Coupling Techniques*“, Proc. 1st WCPEC (1994), 1450 - 1453
- [79] S. Narayanan, J. Wohlgemuth, J. Creager, S. Roncin, M. Perry, „*Large Area High Efficiency Polycrystalline Silicon Buried Contact Solar Cells*“, Proc. 12th EU PVSEC (1994), p. 740-742
- [80] G. Hahn „*RGS-Silizium - Materialanalyse und Solarzellenprozessierung*“, Dissertation, Universität Konstanz (1999)
- [81] F. Duerinckx, L. Frisson, P.P. Michiels, P. Choulat, J. Slufcik „*Towards Highly Efficient Industrial Cells And Modules From Multicrystalline Wafers*“, Proc. 17th EPVSC (2001)
- [82] C. Zechner „*Mechanisch texturierte Solarzellen und Rückkontaktsolarzellen aus kristallinem Silizium*“, Dissertation, Universität Konstanz (1999)
- [83] R. Brendel, „*Coupling of Light into Mechanically Textured Silicon Solar Cells*“, Progress in Photovoltaics **3** (1995), p. 25-38
- [84] B. Fischer, UKN „*Berechnungen der Reflexion alkalisch texturierter multikristalliner Wafer*“, im Rahmen der Dissertation, Erscheinungsjahr Ende 2002
- [85] B. Fischer, mündliche Mitteilungen
- [86] R. Kühn, A. Boueke, M. Wibrat, P. Fath, G. Willeke, E. Bucher „*Investigations of the effect of p/n-junctions bordering on the surface of silicon solar cells*“, Proc. 2nd World Conference on PVSEC, Wien, 1998, p. 1390 - 1393
- [87] M. Spiegel, C. Gerhards, F. Huster, W. Jooss, P. Fath, E. Bucher „*Industrially Attractive Front Contact Formation Methods for Mechanically V-grooved Multicrystalline Silicon Solar Cells*“ Proc. 12th IPVSEC (2001) p. 625-626
- [88] Wilfried König, „*Fertigungsverfahren Bd. 2 Schleifen, Honen, Läppen*“, VDI - Verlag Düsseldorf (1996)
- [89] B. Lawn, A. Evans, „*Review indentation fracture: Principles and Applications*“, J. Mat. Science **10** (1975), S. 1049-1081
- [90] B. Lawn, R. Wishaw, „*A Modell of crack initiation in elastic/plastic indentation fields*“, J. Mat. Science **12** (1977), S. 2195-2199
- [91] D. Marshall, A. Evans, „*The Nature of Machining Damage in Brittle Materials*“, Proc R. Soc. Lond. A385 (1983), S. 461-475
- [92] Gert et. al. , „*Structure of the surface layers of molybdenum single crystals after machining*“, Phys. Chem. Mech. Surf. **2** (1984), p. 583-598

- [93] Hadamowsky, „*Werkstoffe der Halbleitertechnik*“, Deutscher Verlag für Grundstofftechnik, Leipzig **3**, 2. Auflage (1990)
- [94] T. Nunoi, S. Okamoto, K. Nakajima, S. Tanaka, N. Shibuja, K. Okamoto, T. Nam-mori „*Cast polycrystalline silicon solar cell with grooved surface*“, Proc. 21th IEEE PVSC, p. 664-665
- [95] G. Willeke, H. Nussbaumer, H. Bender, E. Bucher „*A simple and effective light trapping technique for polycrystalline silicon solar cells*“, Solar En. Mat. And Solar Cells **26** (1992) p. 345-356
- [96] P. Fath „*Processing, characterization and simulation of mechanically textured crystalline silicon solar cells*“, Dissertation, Universität Konstanz (1998)
- [97] B. Leifhelm, M. Weck, „*New lights in solar cell manufacturing: High throughput surface structuring system for solar cell wafers* Proceedings of the euspen 2nd International Conference, Turin, Italy, Volume 2, p. 766 - 769
- [98] C. Gerhards, A. Fischer, M. Spiegel, P. Fath and E. Bucher, B. Leifhelm and M. Weck, „*High Throuput Mechanical Structuring System for Solar Cell Wafers*“, Proc. 17th EPVSEC (2001)
- [99] Messung der Schnittkräfte auf der DSICO DAD320, interner Bericht Universität Konstanz, FhG-IPT
- [100] P. Fath, C. Gerhards, Patentantrag zur Mikrotexturierung
- [101] T.G. Bifano , S.C. Fawcett, „*Specific grinding energy as an in-process control variable for ductile-regime grinding*“ Journ. of Prec. Eng. **13** (1991) 4, S 256-262
- [102] p. Ruby, S. H. Zaidi, S. Narayanan, „*Plasma-Texturization for Multicrystalline Silicon Solar Cells*“, Proc. 28th IEEE PVSC (2000), p. 75-78
- [103] Y. Inomata, K. Fukui, K. Shirasawa, „*Surface Texturing of Large Area Multicrystalline Si Solar Cells Using Reactive Ion Etching Method*“, Solar Energy Mat. Solar Cells **48** (1997), p. 237-242
- [104] Informationsplakat über Schleifen von Siliziums des Fraunhofer Instituts für Produktionstechnologie, Aachen
- [105] R. Ekai et.al. „*Optimisation of SiN Antireflection coatings fo encapsulated and non-encapsulated Silicon Solar Cells with V-Groove Surface Texture*“, Proc. 15th EPV-SEC (1998), p. 1430-1433
- [106] Frank Huster, mündliche Mitteilung über die Auslegung von Messspitzen bei der IV-Messung
- [107] p. De Wolf, P. Choulat, E. Vazsonyi, R. Einhaus, E. Van Kerschaver, K. DeClercq, J. Slufcik , „*Towards Industrial Application Of Isotropic Texturing for Multicrystalline Silicon Solar Cells*“, Proc. 16th EPVSC (2000)
- [108] F. Hernando, R. Gutierrez, G. Bueno, F. Recart, V. Rodriguez, „*Humps, a surface damage explanation*“, Proc. 2nd WPVSEC (1998) p.1321-1324

- [109] Matthew Stocks and Daniel Macdonald „*Non-ideal resistive effects in silicon solar cells*“, Proc. 16th EPVSEC (2000), p 1671-1674
- [110] F. Huster, P. Fath, E. Bucher, „*Roller Printed mc-SI Solar Cells With Optimized Fill Factors of 78%*“, Proc. 17th EPVSEC (2001)
- [111] Luis Frisson, Soltech, Fax vom 24.12.01.
- [112] Luis Frisson, Soltech, mündliche Mitteilungen.
- [113] Messungen bei Eurosolare auf einem Pasan Sonnensimulator für Module
- [114] Interne Rundokumentation des Lehrstuhl Buchers an der Universität Konstanz, sowie noch nicht veröffentlichte Doktorarbeiten
- [115] A.Goetzberger, B.Voß, J. Knobloch, „*Sonnenenergie: Photovoltaik*“, Teubner (1997)
- [116] F. Huster, Dissertation über Rolldruck für Siliziumsalarzellen an der Universität Konstanz
- [117] J. Horzel, R. Einhaus, K. DeClercq, F. Duerinckx, E. Van Kerschaver, M. Honore, J. Slufcik, J Nijs, R: Mertens , „*Optimisation Results for an Industrially Applicable Selective Emitter Process*“, Proc. 2nd EPVSC (1998), p. 1483-1486
- [118] J. Szlufcik, S. Sivoththaman, J. F. Nijs, R. P. Mertens, R. van Overstraten „*Low-Cost industrial technologies of crystalline silicon solar cells*“, Proc. 26th IEEE PVSC, p. 709 - 713 (1997)
- [119] H. Nussbaumer, R. Burkhardt, M. Merkler, „*New Possibilitier for PV Integration in Buildings Using the new POWER Solar Cell*“, Proc. 16th EPVSEC (2000)
- [120] T.M. Bruton et. al., „*A Study of the manufacture at 500 MWp p.a. of crystalline siliconphotovoltaic modules*“, Proc. 14th EPVSEC (1997), p. 11-16
- [121] A. Castaldini, A. Cavallini, M. Rossi, t. Pernau, M. Spiegel , „*Minority Carrier Lifetimes of multicrystalline Si Obtained from different Methods: A Comparison*“, Proc. 17th EPVSC (2001)
- [122] G. Coletti, S. De Juliis, F. Ferazza, „*A new approach to measure multicrystalline Silicon Solar Celss in a Production Process*“, Proc. 17th EPVSEC (2001)
- [123] O. Breitenstein, M. Langenkamp, J.P. Rakotoniaina, J. Zettner „*The Imaging Of Shunts in Solar Cells By Infrared Lock-In Thermography*“, Proc. 17th EPVSC (2001),
- [124] W. Schmidt, B. Woesten, J.P.Kalejs, „*Experience with Automated Production of Ribbon Silicon (EFG) Solar Cells*“, Proc. 16th EPVSC (2000), p. 1082-1086
- [125] J.H. Bultmann, A.W. Weebwe, .W. Brieko, J. Hornstra, A.R. Burgers, J.A. Dijkstra, A.C. Tip, F.M. Schuurmanns, „*Pin Up Modules: A Design for High Efficiency, Easy Module Manufacturing and Attractive Appearance*“, Proc. 16th EPVSEC (2000), p. 1210-1213

- [126] Emmanuel Van Kerschaver, S. De Wolf, C. Allebé, J. Slufcik, „*High Performance Modules Based on Back Contacted Solar Cells*“, Proc. 17th EPVSC (2001),
- [127] L. Frisson, K. Lieten, S. Roberts, T. Bruton, „*Conductive Adhesives as an Interconnection Technique for Very Thin Solar Cells*“, Proc. 17th EPVSEC
- [128] „*Der Zeitdruck ist enorm - Die Photovoltaikindustrie braucht dringend eine neue Quelle für Silizium*“, Solar Verlag GmbH Aachen, Photon 09/2001
- [129] L. Frisson, K. Lieten, T. Bruton, K. Declercq, J. Slufcik, H.de Moor, M. Goris, A. Benali, O. Aceves , „*Recent improvements in industrial PV module recycling*“, Proc. 16th EPVSC (2000), p. 2164-2163
- [130] H.-G. Unger, „*Theorie der Leitungen*“, Vieweg & Sohn (1967)
- [131] Peter Henseler, „*Kontaktwiderstandsmessungen an siebdruckmetallisierten Silizium-solarzellen*“, interner Arbeitsbericht, LSB, Universität Konstanz(1999)
- [132] Siebdruckprospekt der Firma Koenen, 85521 Ottobrunn, Deutschland

Danksagung

Mit dem Abschluss dieser Arbeit danke ich all denen, die mich in den vergangenen Jahren in vielfacher Weise unterstützt haben:

Prof. Dr. Ernst Bucher für die Möglichkeit an seinem Lehrstuhl zu promovieren,

Prof. Dr. Prof. Dr. W. Wettling für die Übernahme der Zweitkorrektur,

Priv. Doz. Dr. Gerd Willeke für die Leitung der Arbeitsgruppe in den ersten Jahren der Arbeit,

Dr. Peter Fath für die Leitung der Arbeitsgruppe in den letzten Jahren und das Engagement bei der Aquirierung von Projekten,

Barbara Terheiden, Andreas Schneider, Alexander Hauser, Frank Huster, Giso Hahn, Wolfgang Jooss, Bernhard Fischer, Barbara Zimmermann und Anne De Díaz für das Korrekturlesen und die kritischen Anmerkungen,

Giso Hahn für die Hilfe im Umgang mit TEX.

Andreas Schneider und Stefan Kühne für die Instandhaltung des Elektronenmikroskopes und Elektronenmikroskopaufnahmen der Zellen und Wafer, Burckhard Leifhelm für die Elektronenmikroskopaufnahmen von Texturierungswerkzeugen am Fraunhofer IPT, Aachen,

Bernhard Fischer für den Aufbau, Ausbau und die Betreuung der Anlagen zur Messung der Spectral Response, IV - Kennlinien, Kontaktwiderstand und QSSPC, die Erstellung der Auswerte- und Fitsoftware sowie für viele gewinnbringende Gespräche

Barbara Terheiden für ihr Engagement um die Infrastruktur und Reinheit im Prozessbereich,

Benita v. Finckenstein, Markus Spiegel und Arnd Boueke für zahlreiche PECVD Abscheidungen und Frank Huster für die unzähligen Reparaturen der Anlage im Laufe der Jahre,

Steffen Keller, Manfred Keil und Peter Henseler für die Unterstützung im Bereich Charakterisierung,

Thomas Pernau für den Aufbau des hochauflösenden LBIC-Messtandes und die Messungen,

Manfred Keil für die zahlreichen Diffusionen und die Wartung und Instandhaltung der Diffusionsöfen,

Alexander Hauser für weitere Diffusionen und PECVD-Abscheidungen,

Said Riazi für die Betreuung des Computernetzwerkes und die stete Hilfsbereitschaft bei vielen Problemen des Büro- und Laboralltages,

Ansgar Fischer und Christoph Marckmann für die Instandhaltung der Anlagen zur me-

chanischen Texturierung,

Barbara Terheiden, Frank Huster und Bernhard Fischer für spannende Diskussionen rund um die Arbeit und darüber hinaus,

Angela Schellinger für die stets freundliche Atmosphäre rund ums Sekretariat und die perfekte Organisation rund um Räumlichkeiten und Bewirtung bei den vielen Projekttreffen, Allen weiteren KollegInnen für das angenehme Betriebsklima am Lehrstuhl,

Burckhardt Leifhelm vom FhG-IPT für die interessanten Diskussion und Zusammenarbeit im Bereich mechanische Texturierung,

Filip Duerinckx von IMEC für die Zusammenarbeit im Rahmen des HEXSI und ASCEMUS Projekts und die Isotexturierung der Wafer für meine Experimente,

den Mitarbeitern von ECN für die gewinnbringenden Diskussionen in den Bereichen Design of Experiment und Siebdruckmetallisierung,

den Mitarbeitern der Firma Q-Cells für die Kooperation bei den gemeinsamen Experimenten, Nutzung ausgewählter Anlagen auch außerhalb der regulären Produktion und die herzliche Atmosphäre während meiner Aufenthalte in Thalheim,

den Mitarbeitern der Firmen Shell und Eurosolare für die Unterstützung bei den Experimenten in der Produktionslinie im Rahmen des PROTEX und ASCEMUS Projekts.

Richard Yound und Julie Raby von der Firma Dupont für die interessanten Diskussionen und gemeinsamen Experimente,

Den Mitarbeitern der Firma WINTER für Kooperation im Bereich Werkzeugentwicklung, sowie den Mitarbeitern der Firma DISCO für die Kooperation im Bereich Wafersägen.

DANKE

Christoph Gerhards

