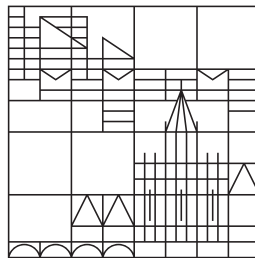


# Simulation, Analyse und Herstellung von kristallinen Si-Solarzellen mit Multi-Busbar-Verschaltung

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades  
des Doktors der Naturwissenschaften  
(Dr. rer. nat.)

vorgelegt von  
Stefan Braun

an der Universität Konstanz



Mathematisch-Naturwissenschaftliche Sektion  
Fachbereich Physik

Tag der mündlichen Prüfung: 15. Mai 2014

1. Referent: Prof. Dr. Giso Hahn
2. Referent: Prof. Dr. Johannes Boneberg







# Inhaltsverzeichnis

<b>Einleitung</b>	<b>7</b>
<b>Verwendete Abkürzungen</b>	<b>9</b>
<b>Einleitung</b>	<b>13</b>
<b>1 Theoretische Betrachtung der Multi-Busbar-Solarzelle</b>	<b>17</b>
1.1 Herstellung von kristallinen Silizium-Solarzellen . . . . .	17
1.1.1 Ausgangsmaterial . . . . .	17
1.1.2 Texturierung des Si-Wafers . . . . .	18
1.1.3 Emitterdiffusion . . . . .	19
1.1.4 Kantenisolation und selektives Rückätzen der Emitterstruktur . .	19
1.1.5 Abscheidung der Antireflexionsbeschichtung . . . . .	21
1.1.6 Metallisierung der Solarzelle und Kontaktbildung . . . . .	22
1.1.7 Zusammenfassung des Fertigungsprozesses . . . . .	23
1.2 Optimierung der Modulleistung . . . . .	24
1.2.1 Verschaltung von Solarzellen im Modul . . . . .	24
1.2.2 Variation der Busbaranzahl . . . . .	25
1.2.3 Geometrische Überlegungen zum Draht- und Ribbondesign . . . .	28
1.2.4 Verkürzung der effektiven Fingerlänge . . . . .	30
1.3 Aufbau des Simulationsprogramms . . . . .	31
1.3.1 Das Zweidiodenmodell . . . . .	31
1.3.2 Grenzen des Zweidiodenmodells . . . . .	33
1.3.3 Komponenten des Serienwiderstands . . . . .	33
1.3.4 Bestimmung des Serienwiderstands über die Einheitszelle . . . . .	35
1.3.5 Erweiterung des Modells auf eine verschaltete Solarzelle . . . . .	38
1.3.6 Auswertungsalgorithmus des Zweidiodenmodells . . . . .	40
1.4 Verwendung einer Referenz-Solarzelle . . . . .	40
1.5 Weitere Näherungen und Annahmen . . . . .	42
1.6 Zusammenfassung . . . . .	43
<b>2 Simulation von Multi-Busbar- und 3-Busbar-Solarzellen</b>	<b>45</b>
2.1 Bestimmung der Diodenkennlinie einer Solarzelle . . . . .	45
2.1.1 Analyse der Kontaktspitzenanzahl . . . . .	46
2.1.2 Optimierung der Drahtanzahl . . . . .	47
2.1.3 Simulation der Diodenkennlinie mit verschalteter Vorderseite . . .	48
2.2 Optimierung des Rückseitendesigns . . . . .	51
2.2.1 Untersuchung des Serienwiderstands einer verschalteten 3-Busbar- Solarzellenrückseite . . . . .	53
2.2.2 Untersuchung des Serienwiderstands einer verschalteten Multi- Busbar-Solarzellenrückseite . . . . .	55

2.3	Optimierung des Wirkungsgrads . . . . .	57
2.3.1	Verringerung der effektiven Abschattung der Drähte . . . . .	60
2.3.2	Schlussfolgerungen aus den bisherigen Simulationen . . . . .	61
2.4	Optimierung der Metallmenge für die Vorderseitenmetallisierung . . . . .	61
2.4.1	Optimierung der Siebdruck-Vorderseitenmetallisierung . . . . .	62
2.4.2	Zusätzliche Variation des Fingerabstands . . . . .	64
2.5	Optimierung des Metallbedarfs einer plattierten Vorderseite . . . . .	65
2.5.1	Silber-Vorderseitenmetallisierung . . . . .	65
2.5.2	Nickel-Vorderseitenmetallisierung . . . . .	67
2.5.3	Plattierte Vorderseitenmetallisierungen für 3-Busbar-Solarzellen . . . . .	69
2.6	Zusammenfassung . . . . .	72
<b>3</b>	<b>Alternative Metallisierungsverfahren und deren Evaluation</b>	<b>73</b>
3.1	Der Plattierprozess . . . . .	73
3.1.1	Außenstromloses Plattieren . . . . .	73
3.1.1.1	Außenstromloses Plattieren von Ni/P-Schichten . . . . .	75
3.1.2	Elektrochemisches Plattieren . . . . .	76
3.1.3	Lichtinduziertes elektrochemisches Plattieren . . . . .	77
3.2	Öffnen der SiN <sub>x</sub> :H-Schicht . . . . .	79
3.2.1	Kontaktierung der Emitterstruktur mittels Druckverfahren . . . . .	79
3.2.2	Nasschemisches Öffnen der SiN <sub>x</sub> :H-Schicht . . . . .	80
3.2.3	Öffnen der SiN <sub>x</sub> :H-Schicht durch Laserablation . . . . .	82
3.3	Untersuchung der Kontakteigenschaften von gesinterten Ni-Schichten . . . . .	83
3.3.1	Bestimmung des spezifischen Kontaktwiderstands . . . . .	84
3.3.2	Untersuchung von Ni/P-Schichten . . . . .	86
3.3.3	Kontaktwiderstandsuntersuchung von gesinterten Ni/P-Schichten . . . . .	89
3.4	Ungewollte Metallabscheidung auf dielektrischen Schichten . . . . .	92
3.4.1	Probenpräparation zur Untersuchung des Background Platings . . . . .	93
3.4.2	Untersuchung der Probenoberfläche . . . . .	96
3.4.3	Profiluntersuchung von Metallpartikeln . . . . .	98
3.5	Zusammenfassung . . . . .	103
<b>4</b>	<b>Elektrische Charakterisierung von Multi-Busbar-Solarzellen</b>	<b>105</b>
4.1	Grundlegende Überlegungen zum Messaufbau . . . . .	105
4.1.1	Charakterisierung von Solarzellen . . . . .	106
4.2	Messaufbauten für Multi-Busbar-Solarzellen . . . . .	108
4.2.1	Messaufbau mit Day4 <sup>TM</sup> ecoTest-Messbrücken . . . . .	108
4.2.2	Messaufbau mit gefederten Messbrücken . . . . .	111
4.2.3	Messaufbau mit gebogener Auflage . . . . .	113
4.2.4	Messaufbau mit flexibel gelagerten Drähten . . . . .	115
4.3	Zusammenfassung . . . . .	118
<b>5</b>	<b>Untersuchungen auf Zell- und Modulebene</b>	<b>121</b>
5.1	Untersuchung von Ein-Zell-Modulen . . . . .	121
5.1.1	Beschreibung des Experiments . . . . .	121
5.1.2	Analyse der siebgedruckten Solarzellen . . . . .	124
5.1.3	Analyse der Ein-Zell-Module . . . . .	125
5.1.4	Vergleich des Experiments mit der Simulation. . . . .	128

---

5.2	Untersuchung von Vier-Zell-Modulen . . . . .	130
5.2.1	Beschreibung des Experiments . . . . .	131
5.2.2	Analyse der siebgedruckten Solarzellen . . . . .	132
5.2.3	Analyse der Vier-Zell-Module . . . . .	133
5.3	Optimierung der plattierten Vorderseitenmetallisierung . . . . .	135
5.3.1	Beschreibung des Experiments . . . . .	136
5.3.2	Analyse der Multi-Busbar-Solarzellen mit Vorderseitenpads . . . . .	136
5.3.3	Vergleich des Experiments mit der Simulation . . . . .	138
5.3.4	Analyse der Multi-Busbar-Solarzellen ohne Vorderseitenpads . . . . .	140
5.4	Optimierung des Grids für Multi-Busbar-Solarzellen . . . . .	141
5.4.1	Beschreibung des Experiments . . . . .	141
5.4.2	Analyse der Multi-Busbar-Solarzellen mit optimiertem Grid . . . . .	142
5.5	Zusammenfassung . . . . .	146
	<b>Zusammenfassung</b>	<b>147</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>151</b>
	<b>Publikationsliste</b>	<b>165</b>
	<b>Patente</b>	<b>167</b>
	<b>Danksagung</b>	<b>169</b>



# Verwendete Abkürzungen

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
3BB	3-Busbar
A	Anode
$A_{\text{Bus}}$	Querschnittsfläche des Busbars
$A_{\text{Emitter}}$	Fläche des Emitters
$A_{\text{gesamt}}$	Gesamtfläche
$A_{\text{F}}$	Querschnittsfläche des Fingers
$A_{\text{Ribbon}}$	Querschnittsfläche des Ribbons
Ag	Silber
$\text{AgNO}_3$	Silbernitrat
Al	Aluminium
$B_{\text{B}}$	Breite des Busbars
$B_{\text{E1}}$	Breite der Einheitszelle 1
$B_{\text{E2}}$	Breite der Einheitszelle 2
$B_{\text{E3}}$	Breite der Einheitszelle 3
$B_{\text{F}}$	Breite des Fingers
BSF	Back Surface Field
CCD	Charge Coupled Device
Cl	Chlor
$\text{Cl}^-$	Chloranion
ct.	Eurocent
CVD	Chemical Vapour Deposition
Cu	Kupfer
$\text{CuSO}_4$	Kupfersulfat
Cz	Czochralski
Cz-Si	Czochralski-Silizium
$d_i$	Dicke der Schicht i
$D_i$	Abstand zwischen zwei metallisierten Bereichen
DI- $\text{H}_2\text{O}$	Deionisiertes Wasser
$e^-$	Elektron
$\eta$	Wirkungsgrad der Solarzelle
ECV	Electrochemical Capacitance Voltage
EDX	Energy Dispersive X-Ray
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz
EL	Elektrolumineszenz
EVA	Ethylenvinylacetat
$\phi_i$	Potentialdifferenz
$\Phi_i$	Intentsität an der Stelle i
FEM	Finite-Elemente-Methode
FF	Füllfaktor

## Verwendete Abkürzungen

---

FIB	Focused Ion Beam
FZ	Floating Zone
H	atomarer Wasserstoff
H <sub>2</sub> O	Wasser
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Wasserstoffperoxid
H <sub>2</sub> PO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Hypophosphition
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Schwefelsäure
HCl	Salzsäure
HF	Flusssäure
HNO <sub>3</sub>	Salpetersäure
I	elektrischer Strom
I <sub>01</sub>	Sättigungsstrom der ersten Diode
I <sub>02</sub>	Sättigungsstrom der zweiten Diode
I <sub>E</sub>	elektrischer Strom der durch den Emitter fließt
I <sub>ext</sub>	externer elektrischer Strom
I <sub>int</sub>	interner elektrischer Strom
I <sub>gesamt</sub>	elektrischer Gesamtstrom
I <sub>ph</sub>	elektrischer Photostrom
I <sub>ph-Abs</sub>	elektrischer Photostrom mit Abschattung
IBC	Interdigitated Back Contact
IEC	International Electrotechnical Commission
ISE	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme
I(U)-Messaufbau	Aufbau zur Bestimmung der Diodenkennlinie einer Solarzelle
j	Stromdichte
j <sub>0</sub>	Sättigungsstromdichte der Diode
j <sub>01</sub>	Sättigungsstromdichte der ersten Diode
j <sub>02</sub>	Sättigungsstromdichte der zweiten Diode
j <sub>ph</sub>	Photostromdichte
j <sub>sc</sub>	Kurzschlussstromdichte der Solarzelle
JRC-ESTI	Joint Research Center - European Solar Test Installation
K	Kathode
k <sub>B</sub>	Boltzmannkonstante
KOH	Kaliumhydroxid
kW <sub>P</sub>	Kilowattpeak
kWh	Kilowattstunde
L <sub>E1</sub>	Länge der Einheitszelle 1
L <sub>E2</sub>	Länge der Einheitszelle 2
L <sub>E3</sub>	Länge der Einheitszelle 3
L <sub>F</sub>	Länge des Fingers
L <sub>T</sub>	Transferlänge
L <sub>Ver</sub>	Länge der Ribbonverlängerung
LIP	Light Induced Plating
MBB	Multi-Busbar
Me	Metallatom
Me <sup>+</sup>	Metallion
n	Oxidationsstufe
$\vec{n}$	Normalenvektor

$n_1$	Idealitätsfaktor der ersten Diode
$n_2$	Idealitätsfaktor der zweiten Diode
$n(\lambda)$	wellenlängenabhängiger Brechungsindex
$n_i$	Brechungsindex des Materials i
$N_K$	Kontaktpunkte der Messspitzen auf dem Busbar
$Na_2H_2PO_2$	Natriumhypophosphit
$NaOH$	Natriumhydroxid
$NH_3$	Ammoniak
$Ni$	Nickel
$Ni/P$	Nickel/Phosphor Legierung
$NiCl_2$	Nickeldichlorid
$NiSi$	Nickelsilizid Legierung 1
$NiSi_2$	Nickelsilizid Legierung 2
$Ni_2Si$	Nickelsilizid Legierung 3
$NiSO_4$	Nickelsulfat
$O_2$	Sauerstoff
$\Phi_K$	Potential am Kontakt
$P$	Phosphor
$P_{Modul}$	Modulleistung
$P_{Verlust}$	Verlustleistung
$P_2O_5$	Phosphorpentoxid
PECVD	Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition
PERC	Passivated Emitter and Rear Contacts
PERL	Passivated Emitter and Rear Locally diffused
$POCl_3$	Phosphoroxychlorid
PSG	Phosphorsilikatglas
PV	Photovoltaik
$q$	elektrische Ladung eines Elektrons
$\rho_B$	spezifischer Widerstand der Basis
$\rho_C$	spezifischer Kontaktwiderstand des Emitters
$\rho_{Rück}$	spezifischer Widerstand der Rückseite
$r_{Basis}$	flächengewichteter ohmscher Widerstand der Basis
$r_{Busbar}$	flächengewichteter ohmscher Widerstand des Busbars
$r_{Emitter}$	flächengewichteter ohmscher Widerstand des Emitters
$r_{Finger}$	flächengewichteter ohmscher Widerstand des Fingers
$r_{Ges}$	flächengewichteter Gesamtwiderstand der Solarzelle
$r_{Ke}$	flächengewichteter ohmscher Widerstand zwischen der Vorderseitenmetallisierung und dem Emitter
$r_{Kr}$	flächengewichteter ohmscher Widerstand zwischen der Basis und der metallischen Rückseite
$r_{Rück}$	flächengewichteter ohmscher Widerstand der metallischen Rückseite
$R$	Reduktionsmittel
$R_P$	Parallelwiderstand
$R_{Basis}$	ohmscher Widerstand der Basis
$R_{Busbar}$	ohmscher Widerstand des Busbars
$R_{Emitter}$	ohmscher Widerstand des Emitters

## Verwendete Abkürzungen

---

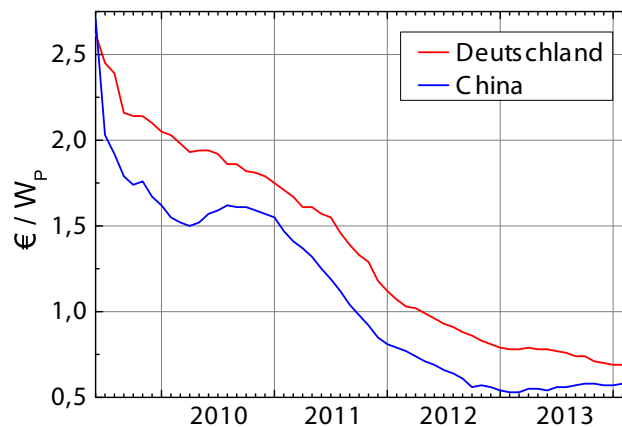
$R_{\text{Finger}}$	ohmscher Widerstand des Fingers
$R_{\text{Front-Ribbon}}$	ohmscher Widerstand des metallischen Vorderseiten-Ribbons
$R_{\text{gesamt}}$	Gesamtwiderstand
$R_{\text{Ke}}$	ohmscher Widerstand zwischen der Vorderseitenmetallisierung und dem Emitter
$R_{\text{Kr}}$	ohmscher Widerstand zwischen der Basis und der metallischen Rückseite
$R_{\text{Rück}}$	ohmscher Widerstand der metallischen Rückseite
$R_{\text{Rück-Ribbon}}$	ohmscher Widerstand des metallischen Rückseiten-Ribbons
$R_{\text{ser}}$	Serienwiderstand
$R_{\text{sh}}$	Schichtwiderstand
REM	Rasterelektronenmikroskop
RTP	Rapid Thermal Processing
$\sigma$	elektrische Leitfähigkeit
$\sigma_{\text{Bus}}$	elektrische Leitfähigkeit des Busbars
$\sigma_{\text{F}}$	elektrische Leitfähigkeit des Fingers
$\sigma_{\text{Ribbon}}$	elektrische Leitfähigkeit des Ribbons
Si	Silizium
$\text{SiH}_4$	Silan
$\text{SiN}_x\text{:H}$	Siliziumnitrid
T	Temperatur
TiPdAg	Titan-Palladium-Silber-Metallisierung
TLM	Transferlängenmethode
U	elektrische Spannung
$U_{\text{ext}}$	externe elektrische Spannung
$U_{\text{int}}$	interne elektrische Spannung
$U_{\text{lokal}}$	lokale elektrische Spannung
$U_{\text{T}}$	Temperaturspannung
UV	ultraviolett
$V_{\text{oc}}$	offene Klemmenspannung
z	Ionisationsstufe

---

# Einleitung

Die Nutzung regenerativer Energiequellen aus Photovoltaikanlagen wurde im Jahre 2000 von der damaligen rot/grünen Bundesregierung durch das „Erneuerbare Energien Gesetz“ (EEG) ins Leben gerufen [1]. Im Gegensatz zu früheren Förderprogrammen wie dem „1.000-Dächer-“ [2] und dem „100.000-Dächer-Programm“ [3], wurde der Ausbau ab diesem Zeitpunkt nicht mehr kontingentiert. Das EEG regelt bis zum heutigen Tage die Einspeisung regenerativen Stroms in das deutsche Stromnetz. Ziel des EEG war es, klimaschädliche Emissionen zu verringern und Technologien zur Stromerzeugung zu fördern, die keine Brennstoffe benötigen. So sollte die Klimaerwärmung gebremst und die Abhängigkeit von ausländischen Brennstofflieferungen verringert sowie die technologische Vorreiterrolle Deutschlands bei der Produktion und Vermarktung regenerativer Energiequellen ausgebaut werden.

Durch eine stete Kostenreduktion, bedingt durch neuartige Fertigungstechniken und Skaleneffekte beim Ausbau der Produktion, wurden in den letzten Jahren weltweit beständig neue Zubaurekorde von Photovoltaikanlagen verzeichnet. In Abbildung 0.1 sind die Netto-Spotmarktpreise pro Wattpeak von kristallinen Silizium-Photovoltaikmodulen aus deutscher und chinesischer Produktion dargestellt.



**Abb. 0.1:** Nettopreis pro Wattpeak in Deutschland und China produzierter Photovoltaikmodule [4].

In den letzten Jahren sind die Modulpreise signifikant gefallen, wodurch die Photovoltaik (PV) zunehmend wettbewerbsfähiger wurde. Aus der Höhe der Einspeisevergütung von 13,55 ct./kWh im Februar 2014 für Anlagen bis 10 kW<sub>p</sub> [5] ist ersichtlich, dass der durch Sonnenkraft erzeugte Strom deutlich unter den angebotenen Strompreisen für Privatpersonen liegt. Selbst für Großkraftwerke stellt die dezentrale Energieerzeugung aus Photovoltaikanlagen mittlerweile eine ernstzunehmende Konkurrenz dar. Aus ökonomischen Gesichtspunkten wird sich die regenerative Energieerzeugung als „alternativlos“ darstellen, da im Gegensatz zu konventionellen Großkraftwerken

für den Betrieb von Photovoltaikanlagen kaum laufende Kosten anfallen. Regional erzeugter und gespeicherter Strom wird in Zukunft besonders die ländlichen Gebiete energieautark machen. Somit wird die Stromerzeugung der Zukunft nicht mehr zentral über Großkraftwerke geregelt werden, sondern durch eine große Anzahl kleiner umweltfreundlicher Kraftwerke.

Hierzu müssen jedoch die Herstellungskosten sämtlicher PV-Komponenten weiter gesenkt und kostengünstige Methoden zur Energiespeicherung entwickelt werden. Je schneller dies geschieht, umso schneller wird die subventionierte Förderung der Photovoltaik überflüssig werden, da aus rein ökonomischen Gesichtspunkten die Eigenstromerzeugung attraktiver wird. Die einfachste Methode, dies zu verwirklichen, stellt die Optimierung der bereits zur Verfügung stehenden Technologie dar.

Ziel dieser Arbeit ist es, Wege aufzuzeigen, die durch eine Optimierung der Verschaltung von Solarzellen deren Modulwirkungsgrad erhöhen können. Hierzu wird ein auf dem Zweidiodenmodell basierendes Simulationsprogramm verwendet, das die Solarzelle im verschalteten Zustand abbildet. Zusätzlich werden nasschemische Metallisierungsverfahren evaluiert, die die Metallmenge für die Vorderseitenmetallisierung reduzieren und gleichzeitig den Zellwirkungsgrad erhöhen. In den folgenden Experimenten werden Solarzellen und Module hergestellt und die ermittelten Messwerte mit der Simulation verglichen, um die Aussagekraft der Simulation zu überprüfen.

Zu Beginn wird auf die grundlegenden Prozessschritte zur Herstellung von kristallinen Si-Solarzellen eingegangen, um dem Leser einen tieferen Einblick in den Zellprozess zu ermöglichen. Anschließend wird die Verschaltung von Solarzellen im Modul erläutert und der Aufbau einer Multi-Busbar-Solarzelle veranschaulicht. Bei diesem Zellkonzept wird anstatt der gängigen drei Verbindungsleiter eine große Anzahl runder zinnbeschichteter Kupferdrähte zur Verschaltung der Solarzelle verwendet. Anschließend wird der Aufbau des Simulationsprogramms schrittweise erläutert und auf die Berechnung des Serienwiderstands eingegangen.

Im zweiten Kapitel werden die Ergebnisse der Simulation präsentiert. Es wird demonstriert, wie die Kontaktierung einer Solarzelle ihre Leistung beeinflusst. Für eine 3-Busbar- und eine Multi-Busbar-Solarzelle wird eine detaillierte Analyse der Rückseitenverschaltung durchgeführt. Anschließend folgt die Evaluation der Solarzellen auf Zell- und Modulebene. Dies geschieht sowohl für siebgedruckte als auch für plattierte Vorderseitenmetallisierungen. Des Weiteren wird untersucht, ob für eine plattierte Vorderseite anstatt Silber auch geringer leitfähiges Nickel verwendet werden kann.

Das dritte Kapitel widmet sich der Analyse verschiedener Metallisierungstechniken. Es beinhaltet die Vorstellung und Evaluation von Druckverfahren und nasschemischen Abscheideverfahren. Unterschiedliche Techniken zum Öffnen und Kontaktieren von  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schichten und Emitterstrukturen werden veranschaulicht. Nickelhaltige, temperaturbehandelte Metallschichten werden auf ihre Kontakteigenschaften hin untersucht. Eine detaillierte Untersuchung des „Background Platings“, der ungewollten Metallabscheidung auf  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schichten, wird durchgeführt und die Ursachen dieses Phänomens ermittelt.

Im vierten Kapitel werden verschiedene Aufbauten, die zur Bestimmung der Diodenkennlinie von Multi-Busbar-Solarzellen dienen und im Rahmen dieser Arbeit entworfen wurden, vorgestellt und miteinander verglichen.

Im letzten Kapitel dieser Arbeit soll die Aussagekraft des erstellten Simulationspro-

gramms untersucht werden. Hierzu werden unterschiedliche Experimente auf Zell- und Modulebene durchgeführt und die Ergebnisse mit der Simulation verglichen. Besonderes Interesse gilt der möglichst exakten Bestimmung des Serienwiderstands einer verschalteten Solarzelle sowie der Bestimmung der benötigten Metallmenge für eine plattierte Multi-Busbar-Solarzelle.

Die gewonnenen Erkenntnissen zeigen, dass eine Steigerung der Modulleistung unter signifikanter Reduktion der Metallmenge zur Vorderseitenmetallisierung, bei Nutzung des Multi-Busbar-Designs, realisiert wird.



# 1 Theoretische Betrachtung der Multi-Busbar-Solarzelle

Zu Beginn soll eine Auflistung der Fertigungsschritte einer Solarzelle dem Leser ein tieferes Verständnis für den Herstellungsprozess ermöglichen. Dieses Wissen wird benötigt, um die Unterschiede zwischen dem in dieser Arbeit untersuchten Multi-Busbar- und dem weit verbreiteten 3-Busbar-Zellkonzept zu verstehen. Es wird erklärt, wie eine kristalline Silizium-Solarzelle in einem Modul verschaltet wird und warum eine Variation der Verschaltung die Modulleistung erhöhen kann. Es wird eine Erläuterung der optischen Eigenschaften bezüglich der unterschiedlichen Verschaltung beider Zelldesigns gegeben. Des Weiteren werden die Randparameter definiert, in denen beide Zelldesigns optimiert werden. Im Folgenden wird der Aufbau eines Simulationsprogramms für Multi-Busbar- und 3-Busbar-Solarzellen beschrieben, welcher als Grundgerüst das Zweiodenmodell verwendet. Anschließend wird auf die Näherungen, die für die Simulation verwendet werden, eingegangen, die Ergebnisse der Simulation werden präsentiert und abschließend wird ein Resümee gezogen.

## 1.1 Herstellung von kristallinen Silizium-Solarzellen

Damit der Aufbau und die grundlegende Funktionsweise einer Solarzelle verständlich wird, soll in diesem Kapitel der Herstellungsprozess einer Solarzelle beschrieben werden. Im Folgenden wird jeder Prozessschritt dargestellt, der zur Herstellung der in dieser Arbeit gefertigten Solarzellen benötigt wird.

Primär handelt es sich bei einer kristallinen Si-Solarzelle um ein Halbleiterbauelement, das durch gezielte Dotierung mit Bor- und Phosphoratomen zu einer großflächigen Diode geformt wird. Durch Einstrahlung von Photonen definierter Energie können durch den „Inneren Photoelektrischen Effekt“ Elektron-Loch-Paare generiert werden, indem Elektronen angeregt und aus dem Valenz- in das Leitungsband gehoben werden. Diffundieren Elektronen oder Löcher in den Bereich des pn-Übergangs, werden sie über einen elektrischen Feldgradienten am pn-Übergang separiert. Die Ladungsträger werden damit in ihre Majoritätsgebiete getrennt.

### 1.1.1 Ausgangsmaterial

Als Ausgangsmaterial zur Herstellung der kristallinen Siliziumscheiben (engl. Wafer) wird hochreines Silizium verwendet [6], das mithilfe des Siemensprozesses hergestellt wird [7]. Für die industrielle Herstellung der Si-Wafer zur Solarzellenproduktion werden prinzipiell zwei unterschiedliche Verfahren verwendet. Für die konventionelle Herstellung multikristallinen Materials wird eine dotierte Siliziumschmelze in einem Tiegel aus Quarzglas kontrolliert abgekühlt [8, 9]. Die Tiegeltwände können zusätzlich mit  $\text{SiN}_x$  beschichtet werden, um die Reinheit zu erhöhen und die Ausdiffusion von

Fremdstoffen aus den Tiegelwänden während des Herstellungsprozesses zu vermeiden [10]. Hierbei entsteht ein Block aus multikristallinem Silizium, welcher in den nachfolgenden Schritten zu quadratischen Säulen weiterverarbeitet wird.

Für die Herstellung von monokristallinem Silizium mit dem Czochralski-Verfahren (Cz-Si) wird unter Argon-Schutzgasatmosphäre mithilfe eines Saatkristalls ein zylindrischer Einkristall (engl. Ingot) aus einer Siliziumschmelze gezogen [11, 12]. Die Rand- und Kappenbereiche werden anschließend entfernt.

Sowohl die multikristalline Säule als auch der monokristalline Ingot werden in einem anschließenden Prozess mithilfe einer Drahtsäge vereinzelt [13]. So kann in einem Sägeschnitt aus einer Säule eine große Menge an Wafern gewonnen werden. Während des Vereinzlungsschritts wird, bedingt durch den verwendeten Draht der Säge, Material aus der Säule abgeführt. Dieser Materialverlust ist nicht unerheblich und kann in Abhängigkeit von der verwendeten Drahtdicke über 50 % des Volumens der Säule betragen [14]. Aufgrund des hohen Verlusts werden Ansätze verfolgt, bei denen Si-Wafer direkt aus der Schmelze gezogen werden. So kann der Materialverlust durch den Sägeprozess vermieden werden [15, 16]. Heutzutage besitzen die Wafer für die industrielle Fertigung eine Kantenlänge von 156 mm und sind quadratisch (full-square) oder quadratisch mit abgerundeten Ecken (semi-square). Die Substratdicke liegt zwischen 160-200  $\mu\text{m}$ .

In der Simulation wurde mit quadratischen Cz-Si-Wafern mit einer Kantenlänge von 156 mm und einer Dicke von 200  $\mu\text{m}$  gerechnet. In den Experimenten wurde semi-square Cz-Material benutzt. Die verwendeten Siliziumwafer sind mit Bor dotiert. Der Basiswiderstand beträgt ca. 2  $\Omega\text{cm}$ , was einer Dotierstoffkonzentration von  $7,2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  entspricht.

Im Folgenden wird der Herstellungsprozess für bordotierte kristalline Cz-Si-Wafer beschreiben.

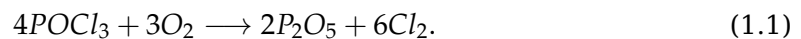
### 1.1.2 Texturierung des Si-Wafers

Bedingt durch den hohen Brechungsindex wird auftreffendes Licht an einer glatten Siliziumoberfläche stark reflektiert. Eine strukturierte Oberfläche kann Licht besser einkoppeln, indem zunächst reflektiertes Licht ein weiteres Mal auf die Substratoberfläche trifft. Diese Strukturierung wird mithilfe chemischer Ätzverfahren erreicht. Für monokristalline Wafer wird standardmäßig eine wässrige Lösung aus Kaliumhydroxid (KOH) oder Natriumhydroxid (NaOH) und einem Alkohol verwendet [17]. Durch die Verwendung von hochsiedenden Alkoholen und Additiven wird eine Homogenisierung des Prozesses erreicht [18]. Das Ätzverhalten der Lösung ist anisotrop, also richtungsabhängig. Bei Prozesstemperaturen um 80-100  $^{\circ}\text{C}$  werden ausgehend von der durch den Sägeprozess geschädigten Oberfläche die  $\langle 111 \rangle$ -Ebenen des Kristalls durch die anisotrope Ätzung freigelegt. Beim dem verwendeten monokristallinen Material mit globaler  $\langle 100 \rangle$ -Orientierung der Oberflächen bilden sich kleine Pyramiden (etwa 1-10  $\mu\text{m}$  hoch) heraus. Die Beigabe des Alkohols dient dabei der lokalen, zufälligen Maskierung der Oberfläche, sodass eine Textur zufällig verteilter Pyramiden (engl. Random Pyramid Texture) entsteht [19].

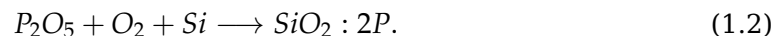
### 1.1.3 Emitterdiffusion

Für die Funktionsweise der Solarzelle ist die Ausbildung zum Substrat komplementär dotierter Oberflächenbereiche erforderlich, um durch Licht generierte Ladungsträgerpaare voneinander zu trennen. Für das vierwertige Element Silizium werden meist die Elemente Bor (dreiwertig) und Phosphor (fünfwertig) verwendet, um einen pn-Übergang zu bilden. Die Wertigkeit oder Valenz eines Elements beschreibt die Anzahl der Außenelektronen, die es besitzt. Bevor der bordotierte, texturierte Wafer eine stark phosphordotierte Schicht erhält, muss gewährleistet sein, dass die Oberfläche des Wafers ausreichend rein ist. Besonders metallische Verunreinigungen sind sehr schädlich [20], aber auch organische Verunreinigungen können durch den Hochtemperaturschritt bei 850 °C die Reinheit des Substrats herabsetzen. Vor der Emitterdiffusion werden deshalb Oberflächenverunreinigungen entfernt. Dies geschieht durch einen Tauchschrift des Wafers in verdünnter Salzsäure ( $\text{HCl}_{\text{aq}}$ ). Anschließend wird der Wafer in deionisiertem Wasser ( $\text{DI-H}_2\text{O}$ ) gesäubert. Im nächsten Schritt werden Oberflächenoxide in verdünnter Flußsäure ( $\text{HF}_{\text{aq}}$ ) entfernt. Danach wird der Wafer in DI-Wasser gespült und getrocknet.

Der Wafer wird in ein Quarzglasboot geladen und anschließend in einen Rohrofen gefahren, in dem die Emitterdiffusion stattfindet. Hierbei wird gasförmiger Stickstoff durch ein Gefäß mit Phosphoroxychlorid ( $\text{POCl}_3$ ), den sogenannten Bubbler, gepumpt und in das Quarzglasrohr des Ofens geleitet. Unter Zugabe von Sauerstoff  $\text{O}_2$  und bei Temperaturen um 850 °C spaltet sich das  $\text{POCl}_3$  zu  $\text{P}_2\text{O}_5$  und Chlor  $\text{Cl}_2$  auf:



Das hierbei entstandene Chlor hat eine reinigende Wirkung auf Wafer und Quarzglasrohr, da es flüchtige Metallhalogenide bildet [21]. Das  $\text{P}_2\text{O}_5$  setzt sich im weiteren Verlauf auf der Waferoberfläche ab und reagiert unter zusätzlicher Sauerstoffzugabe zu Siliziumdioxid  $\text{SiO}_2$  und darin gelöstem Phosphor:



Während des sogenannten Eintreibeschritts (engl. Drive-In), kann der atomare Phosphor bei den hohen herrschenden Temperaturen in den Siliziumwafer eindiffundieren und die Emitterschicht ausbilden. Hierbei sind Temperatur und Dauer des Drive-In-Schritts maßgeblich für die Tiefe des Emitterprofils verantwortlich. Die abgeschiedene Phosphorsilikatglasschicht agiert als Gettersenke für Metalle und kann den Wafer so zusätzlich reinigen [22].

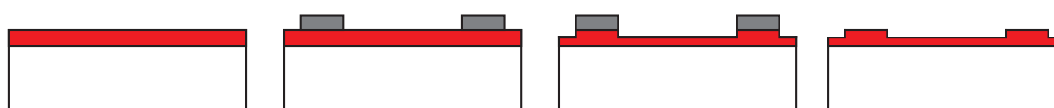
### 1.1.4 Kantenisolation und selektives Rückätzen der Emitterstruktur

Der Emitter wurde in der vorangegangenen Diffusion an allen Oberflächen des Wafers ins Substrat eingebracht. Im verwendeten Herstellungsprozess ist der Emitter nur auf der Vorderseite der Solarzelle erwünscht. Daher wird er auf der Rückseite beziehungsweise den Kanten mit einer alkalischen Ätzlösung nasschemisch entfernt, um später über die Kanten der Solarzelle auftretende Kurzschlusspfade zur rückseitigen Metallisierung zu unterbinden [23].

Die Grundüberlegung zur Nutzung einer selektiven Emitterstruktur ist folgende: Es wird eine hochdotierte Phosphorschicht benötigt, um einen möglichst geringen

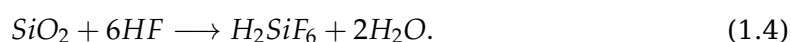
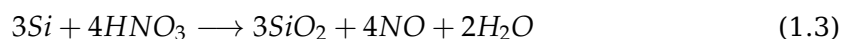
Kontaktwiderstand mit der Vorderseitenmetallisierung zu gewährleisten. Gleichzeitig sollte die Emitterschicht möglichst gering dotiert sein, um die Rekombination der Ladungsträger in ihr zu verringern. Eine selektive Emitterstruktur bietet beide Vorteile. Der Bereich unterhalb der Vorderseitenmetallisierung ist stark dotiert, um einen geringen Kontaktwiderstand zwischen der Metallisierung und dem Halbleitersubstrat zu gewährleisten. Der restliche Bereich ist schwach dotiert, um dort die Rekombinationsverluste gering zu halten.

Für die Herstellung von selektiven Emitterstrukturen gibt es zahlreiche Verfahren. Hier soll ausschließlich auf das nasschemische Rückätzverfahren [24] eingegangen werden, da es zur Herstellung der Solarzellen in dieser Dissertation verwendet wurde. Weitere Verfahren zur Herstellung selektiver Emitterstrukturen werden in [25, 26] beschrieben. Der Rückätzprozess ist in Abbildung 1.1 dargestellt. Der Schichtwiderstand



**Abb. 1.1:** Prozessschritte zur Herstellung einer selektiven Emitterstruktur mithilfe eines nasschemischen Rückätzverfahrens. Von links nach rechts: Si-Wafer (weiß) mit Emitterstruktur (rot), Aufbringung einer Schutzmaskierung (grau), Rückätzen des Emitters, Entfernen der aufgebrauchten Ätzmaske.

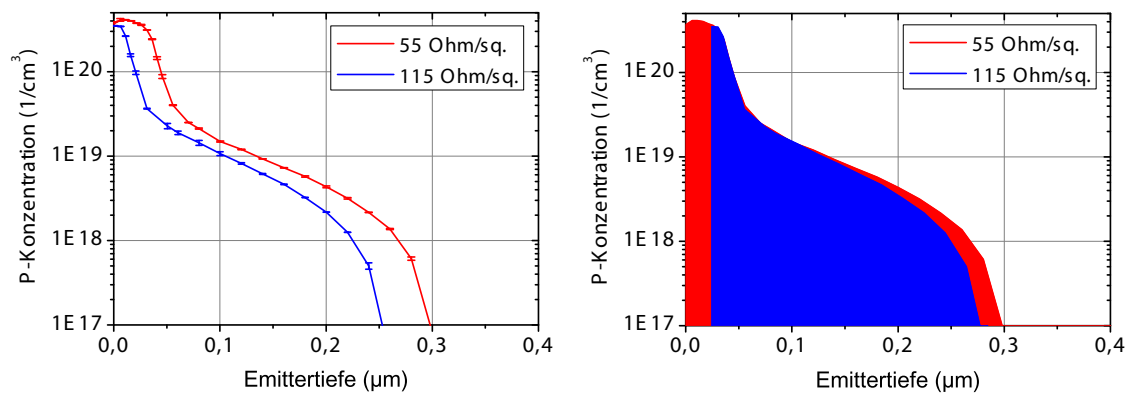
des Emitters im Rahmen des verwendeten Herstellungsprozesses ist dabei durch die Kontaktierbarkeit mittels einer silberhaltigen Siebdruckpaste auf einen Bereich von  $50\text{-}60\ \Omega/\text{sq}$  festgelegt. Der homogene Emitter wird partiell mit Schutzlack oder Wachs maskiert. Hierfür eignen sich besonders Inkjet- oder Siebdruckverfahren [27]. Anschließend wird die Emitterstruktur in einer wässrigen Lösung aus  $\text{HF}_{\text{aq}}$  und Salpetersäure ( $\text{HNO}_3$ ), unter Bildung einer porösen Siliziumschicht, zurückgeätzt [28]. Dabei löst die Flusssäure an den unmaskierten Stellen das sich von der Emittendiffusion noch auf dem Wafer befindliche Phosphorsilikatglas (PSG) auf, bis die Emitterschicht freiliegt. Anschließend wird die dotierte Siliziumoberfläche geätzt. Hierdurch entsteht eine poröse Siliziumschicht. Vereinfacht kann die Reaktion wie folgt beschrieben werden:



Da sich bei der Reaktion allerdings auch Produkte wie Kieselsäure oder Intermediate wie Stickoxide bilden und zusätzlich Wasserstoff entsteht, ist davon auszugehen, dass Intermediate zusätzliche Reaktionen auslösen. Für eine ausführlichere Einsicht in die Thematik der Rückätzlösung sei auf [29, 30] verwiesen.

Im folgenden Prozessschritt wird die aufgebrauchte Wachsschicht in einem leicht basischen Medium gelöst. Das durch den Rückätzprozess entstandene poröse Silizium kann in diesem Medium ebenfalls in Lösung gehen.

Zum tieferen Verständnis der Bildung einer selektiven Emitterstruktur durch Rückätzen sind in Abbildung 1.2 links zwei Emitterprofile dargestellt, die mittels ECV-Verfahren (engl. Electrochemical Capacitance Voltage) [31] bestimmt wurden. Hierbei handelt es sich um eine elektrochemische Kapazitäts-Spannungs-Messung der Probe,



**Abb. 1.2:** Gemessene ECV-Profile zweier Emitters. Links: In Rot der ursprüngliche Emitters (55 Ω/sq) und in Blau der zurückgeätzte Emitters mit einem Schichtwiderstand von 115 Ω/sq. Rechts: Nachbearbeitete Emittersprofile. Im vorderen roten Bereich wird der zurückgeätzte Teil sichtbar.

die sich in einer Elektrolytlösung befindet. Mithilfe dieser Messmethode kann die aktive Ladungsträgerkonzentration an der Grenzschicht des Substrats ermittelt werden. Dieser Vorgang wird nach einem Ätzschritt der Probe wiederholt. So entsteht ein tiefenabhängiges Profil der aktiven Ladungsträgerkonzentration im Substrat.

Beide Profile stammen aus der gleichen Emittersdiffusion (rotes Profil). Einer der Emitters (blaues Profil) wurde mit dem oben beschriebenen Verfahren zurückgeätzt. Hierdurch wurde der Schichtwiderstand von 55 Ω/sq auf 115 Ω/sq erhöht. Der Emitterschichtwiderstand der Proben wurde vor der ECV-Messung mithilfe einer Vierpunktmessung bestimmt. Die Abnahme des hochdotierten Bereichs, der auch als Plateau oder engl. „Dead Layer“ bezeichnet wird, ist deutlich sichtbar. Die zurückgeätzte Emittersstruktur wird durch Verschieben in x-Richtung an das bestehende 55 Ω/sq-Emittersprofil angepasst (rechtes Schaubild). Etwa 25 nm des Profils wurden durch den Rückätzprozess entfernt. Durch die horizontale Verschiebung wird deutlich, dass beide Kurven eine ähnliche Form besitzen. Durch Integration der Kurve kann mithilfe der Ladungsträgerbeweglichkeit der Emitterschichtwiderstand der Proben berechnet werden.

### 1.1.5 Abscheidung der Antireflexionsbeschichtung

Nach der Emittersdiffusion und der Bildung eines selektiven Emitters wird auf die texturierte Waferoberfläche eine circa 75 nm dünne Schicht aus amorphem Siliziumnitrid (SiN<sub>x</sub>:H) mittels plasmaunterstütztem CVD-Verfahren (engl. Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition, PECVD) abgeschieden.

Bei ca. 450 °C wird ein Niederdruckplasma aus den Prozessgasen Silan (SiH<sub>4</sub>) und Ammoniak (NH<sub>3</sub>) gezündet. Die Moleküle dissoziieren, und es bildet sich auf der Waferoberfläche eine amorphe wasserstoffhaltige Siliziumnitridschicht. Die SiN<sub>x</sub>:H-Schicht erfüllt mehrere Aufgaben:

Sie passiviert die texturierte Oberfläche, da sie durch feste positive Ladungen ein elektrostatisches Feld aufbaut [32]. Durch diesen Feldeffekt verdrängt sie die positiv geladenen Minoritäten im Emitters von der Oberfläche.

Zusätzlich können über das Mischverhältnis SiH<sub>4</sub>/NH<sub>3</sub> der Brechungsindex variiert

und durch die Dicke der  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schicht die Einkopplungseigenschaften des auf die Zelle einfallenden Lichts optimiert werden [33]. Hierbei werden die Reflexionseigenschaften so angepasst, dass möglichst wenig Licht reflektiert wird. Über die Beziehung der Brechungsindizes  $n_i$  kann der optimale Brechungsindex bestimmt werden [34]:

$$n_{\text{Luft}} n_{\text{Si}} = n_{\text{SiN}_x\text{:H}}^2 \quad (1.5)$$

Zu beachten ist hier, dass  $n$  generell keine Konstante ist, sondern über die Dispersionsrelation von der Wellenlänge  $n(\lambda)$  abhängt. Für die Optimierung der Antireflexionsschicht in einem Modul muss die Gleichung auf die optischen Eigenschaften der EVA-Folie und des Modulglases angepasst werden.

Zur Optimierung der Schichtdicke  $d_{\text{SiN}_x\text{:H}}$  wird die Wellenlänge mit dem maximalen Photonenfluss  $\lambda_{\text{max}}$  des Sonnenspektrums ermittelt. Das Kriterium für eine Lambda-Viertel-Platte lautet:

$$d_{\text{SiN}_x\text{:H}} = \frac{\lambda_{\text{max}}}{4 n_{\text{SiN}_x\text{:H}}} \quad (1.6)$$

Zu beachten ist hier, dass das senkrecht einfallende Licht bei einem texturierten Substrat nicht senkrecht auf die Oberfläche auftrifft.

Der bei der Abscheidung der  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schicht eingebaute Wasserstoff hat weitreichende Funktionen. Bei einem folgenden Hochtemperaturschritt zum Sintern und Legieren der Metallkontakte diffundiert der Wasserstoff in den Wafer. Er sättigt freie Bindungen ab und passiviert zusätzlich Fremdatome, sowohl an der Waferoberfläche als auch im Wafervolumen selbst.

### 1.1.6 Metallisierung der Solarzelle und Kontaktbildung

Das gebräuchlichste Metallisierungsverfahren für kristalline Si-Solarzellen ist der Siebdruck. Hierbei wird eine metallhaltige Paste mit einer Rakel durch ein strukturiertes Sieb gepresst. Nach dem ersten Metallisierungsschritt der Oberfläche wird die Paste in einem Ofen getrocknet, der Wafer gewendet und die zweite Oberfläche bedruckt.

Für die Metallisierung der phosphordotierten Vorderseite werden Siebdruckpasten verwendet, die neben Silberpartikeln auch bleihaltige Glasfritte und organische Bestandteile (v.a. Lösungsmittel, Stabilisatoren, etc.) enthalten. Auf die Vorderseite, die der Sonne zugewandt ist, wird eine Gitterstruktur gedruckt. Diese sollte möglichst wenig Abschattung generieren, aber gleichzeitig eine hohe Leitfähigkeit aufweisen. Die Kontaktbildung der metallischen Vorderseitenpaste mit der Emitterstruktur erfolgt partiell. Durch einen Hochtemperaturschritt bei ca. 800-850 °C (engl. Co-Firing) wird die  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schicht durch die sich in der Ag-Paste befindliche Glasfritte konsumiert [35]. Ist die  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schicht durchdrungen, beginnt Silizium sich in den jetzt flüssigen Silber/Bleipartikeln zu lösen. Auf den in  $\langle 111 \rangle$ -Richtung orientierten Oberflächen bilden sich hierdurch invertierte Pyramiden aus. Fällt die Temperatur wieder ab, so kristallisiert das Silber in den invertierten Pyramiden. Des Weiteren verbinden sich die vor dem Hochtemperaturschritt separierten Silberpartikel und sorgen somit für eine ausreichende Leitfähigkeit der gefeuerten Ag-Paste [36]. Es wurde außerdem berichtet, dass sich zusätzlich oder ausschließlich Tunnelkontakte über kleine Kolloide in der Glasfritte ausbilden können [37, 38].

Zum Aufbringen der Silberpaste gibt es unterschiedliche Verfahren. Als Standardverfahren ist der einfache Siebdruck (engl. Single Print) zu nennen [39], bei dem in einem Schritt die Vorderseitenmetallisierung gedruckt wird. Des Weiteren wird zwischen Dualdruck- (engl. Dual Print) [40] und Doppeldruck-Verfahren (engl. Double Print) unterschieden [41, 42, 43]. Der Dualdruck zeichnet sich durch die Verwendung zweier unterschiedlicher Pasten aus. Hierbei wird meist eine Paste verwendet, die den Kontakt zum Emitter herstellt. Die zweite Paste wird benutzt, um die metallisierten Bereiche zu verbinden. Beim Doppeldruck-Verfahren wird auf die im ersten Druckschritt hergestellte Metallisierung erneut gedruckt. Hierdurch kann die Breite der Metallisierung verringert und die aufgebrauchte Pastenmenge erhöht werden. Die Qualität des Drucks wird durch die Emulsion, die Drahtdicke und den Drahtabstand des Siebs maßgeblich beeinflusst [44, 45].

Alternative Metallisierungsverfahren bieten die Möglichkeit, feinere Strukturen auf die Vorderseite einer Solarzelle aufzubringen. Besonders sogenannte Seed-and-Plate-Prozesse bergen großes Potential, da mit ihnen die benötigte Metallmenge für die Vorderseitenmetallisierung exakt dosiert werden kann und nicht durch eine Siebgeometrie beschränkt ist. Der sogenannte Seed-and-Plate-Prozess ist ein zweistufiges Metallisierungsverfahren, bei dem zunächst eine dünne Saatschicht (engl. Seed Layer), die selbst keine hohe elektrische Leitfähigkeit besitzt, den Kontakt zur Emitteroberfläche herstellt. Die Saatschicht wird anschließend durch einen nasschemischen Plattierprozess (engl. Plating) verstärkt. Für diese Art von Verfahren eignen sich silberhaltige Saatschicht-Pasten und -Tinten, die anschließend durch Ag-Plattieren verstärkt werden. Zum Aufbringen der Saatschicht-Pasten und -Tinten werden Siebdruck- [46], Tintenstahldruck- [47] oder auch Aerosoldruckverfahren [48] verwendet.

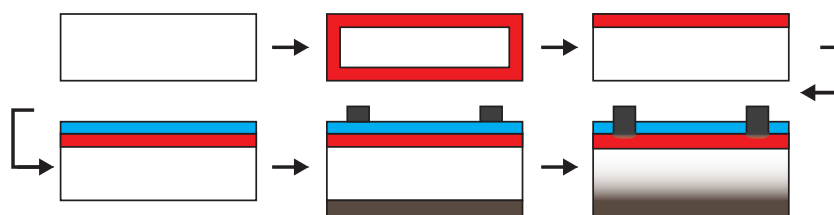
Eine weitere Möglichkeit zur Vorderseitenmetallisierung bieten direkte Plattieransätze (engl. Direct Plating), bei denen die Siliziumnitridschicht lokal geöffnet wird. Dies kann mithilfe nasschemischer Ätzverfahren oder eines Lasers bewerkstelligt werden [49]. Da anschließend die Emitterstruktur freiliegt, kann direkt auf den Emitter plattiert werden.

Für die Metallisierung der Rückseite werden üblicherweise aluminiumhaltige Pasten verwendet. Die mit organischen Bestandteilen, Glasfritte und Lösungsmitteln versetzten Pasten werden vollflächig, mittels Siebdruckverfahren, auf die Oberfläche aufgebracht [50]. Aufgrund seiner Valenz eignet sich Aluminium besonders gut zur Kontaktierung der Rückseite. Durch den Hochtemperaturschritt bei 800-850 °C entsteht an der Grenzfläche zwischen Wafer und Metallisierung eine Schmelze aus Silizium und Aluminium. Diese bildet beim Abkühlen eine stark p-dotierte Schicht, das BSF (engl. Back Surface Field), aus. Während der Abkühlphase rekristallisiert das Si epitaktisch an der Grenzfläche des Si-Wafers und kann Al-Atome in sein Gitter einbauen. Wird in der Abkühlphase die eutektische Temperatur von 577 °C erreicht, kristallisiert die verbleibende Schmelze. Das so entstandene Feld wirkt auf die Minoritäten (Elektronen) abstoßend und agiert als homogene Passivierungsschicht der Rückseite [51, 52].

### **1.1.7 Zusammenfassung des Fertigungsprozesses**

Schematisch ist der Fertigungsprozess einer Solarzelle nach heutigem Industriestandard in Abbildung 1.3 illustriert. Der Prozess läuft von links nach rechts. Ausgangs-

punkt ist der texturierte Wafer (im Schaubild plan). Der Wafer erhält einen vollflächigen Emitter auf allen Oberflächen des Wafers. Dieser wird anschließend auf der Rückseite und an den Rändern entfernt. Wahlweise kann eine selektive Emitterstruktur gebildet werden (im Schaubild nicht aufgeführt). Eine Siliziumnitridschicht wird einseitig abgeschieden. Vorder- und Rückseite des Wafers werden metallisiert. Es folgt ein Hochtemperaturschritt, der den Kontakt der Front- und Rückseitenelektrode zum Halbleiter herstellt.



**Abb. 1.3:** Prozessschritte zur Herstellung einer Solarzelle. Von links nach rechts: Kristalliner texturierter Si-Wafer, Emitterdiffusion, Kantenisolation, Abscheidung einer  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schicht, Metallisierung der Front- und Rückseite, Kontaktierungsprozess durch Co-Feuern.

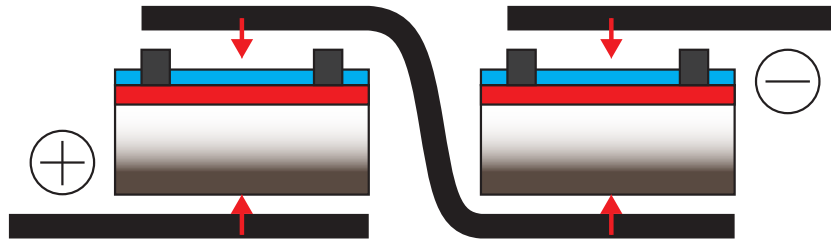
## 1.2 Optimierung der Modulleistung

Die Modulleistung wird sowohl über die Leistung der Solarzelle als auch über die Verschaltung der Solarzellen im Modul bestimmt. Im Folgenden wird veranschaulicht, wie Solarzellen in einem Modul verschaltet werden und welche Effekte bei der Optimierung der Modulleistung bezüglich des Zelldesigns berücksichtigt werden müssen.

### 1.2.1 Verschaltung von Solarzellen im Modul

In einem Solarmodul werden die einzelnen Solarzellen mithilfe metallischer Leiterbahnen miteinander verbunden. Dieser Vorgang wird als Verschaltung bezeichnet. Hierzu werden zinnbeschichtete Kupferbänder (engl. Ribbons) verwendet, die mit den metallisierten Oberflächen der Solarzellen folgendermaßen verbunden werden: Ein Ende des Ribbons verbindet die Vorderseite der ersten Zelle mit der Rückseite der benachbarten Zelle. Wird dieser Vorgang wiederholt, können mehrere Zellen in Reihe miteinander verschalten werden, ein sogenannter Zell-String entsteht. Anschaulich ist dies in Abbildung 1.4 dargestellt. Die Ribbons besitzen im Schaubild keinen direkten Kontakt zu den Solarzellen. Um einen Kontakt zwischen Ribbon und Solarzelle herzustellen, werden die Kontaktbereiche verlötet oder verklebt [53]. Für die Rückseite der Solarzelle stellt sich der Lötprozess als Herausforderung dar. Eine vollständig mit Aluminiumpartikeln bedruckte Rückseite kann nicht verlötet werden, da die Aluminiumpartikel stark oxidiert sind. Die Oxidschicht agiert als Isolator und behindert den Verbindungsprozess. Die Rückseite wird deshalb nicht vollflächig mit Aluminiumpartikeln bedruckt.

Es wird ein zweistufiger Druckprozess für die Rückseitenmetallisierung verwendet. In einem ersten Schritt wird eine silberhaltige Paste, die auch einen geringen Anteil Aluminium enthält, partiell auf die Rückseite gedruckt und anschließend getrocknet.



**Abb. 1.4:** Verschaltung von Solarzellen zu einem Zell-String. Die zinnbeschichteten Kupferbänder (schwarz) liegen noch nicht direkt auf den Solarzellen auf. Die Ribbons werden anschließend mit der Front- und Rückseite der Solarzelle verlötet oder verklebt.

Die so entstandenen Bereiche werden als AgAl-Pads oder Rückseitenpads bezeichnet. Anschließend folgt der Druckschritt mit Aluminiumpaste. Das hierbei verwendete Sieb hat Aussparungen, damit die AgAl-Pads nicht überdruckt werden. Die AgAl-Pads fungieren aufgrund des hohen Silberanteils als Lötflächen für die Rückseitenkontaktierung.

In einem alternativen Verfahren kann mithilfe einer Ultraschallsonotrode Zinn direkt auf die siebgedruckte Aluminiumschicht aufgebracht werden. Durch die erzeugten Ultraschallschwingungen wird die Oxidschicht partiell aufgerissen. Zeitgleich wird Zinn oder eine zinnhaltige Legierung unter Wärmezufuhr auf die Aluminiumpartikel abgeschieden. Das Zinn diffundiert und kann mit den Aluminiumpartikeln an der Grenzfläche eine Legierung ausbilden [54]. Die so entstandene Schicht kann somit als Pad für den Verschaltungsprozess verwendet werden. Bei diesem Verfahren ist besonders hervorzuheben, dass Silber durch das günstigere Metall Zinn ersetzt wird. Bedingt durch das vollflächige BSF findet zusätzlich eine Reduzierung der Ladungsträgerrekombination an der Rückseite statt [55].

Eine weitere Möglichkeit der Kontaktbildung bietet die chemische Reduktion der oxidierten Aluminiumpartikel mit sogenannten Flussmitteln. Nach der Reduktion sollte möglichst zeitnah der Lötprozess vollzogen werden, um eine anschließende Reoxidation der Aluminiumpartikel zu vermeiden. Alternativ kann der Prozess unter Schutzatmosphäre durchgeführt werden oder eine Schutzschicht aufgebracht werden, die die Oxidation des Aluminiums verhindert. Da die siebgedruckten Al-Partikel jedoch eine große Oberfläche aufweisen und es sich um eine stark exotherme Reaktion handelt, wird dieses Verfahren nur bei aufgedampften oder gesputterten, glatten Aluminiumschichten verwendet [56].

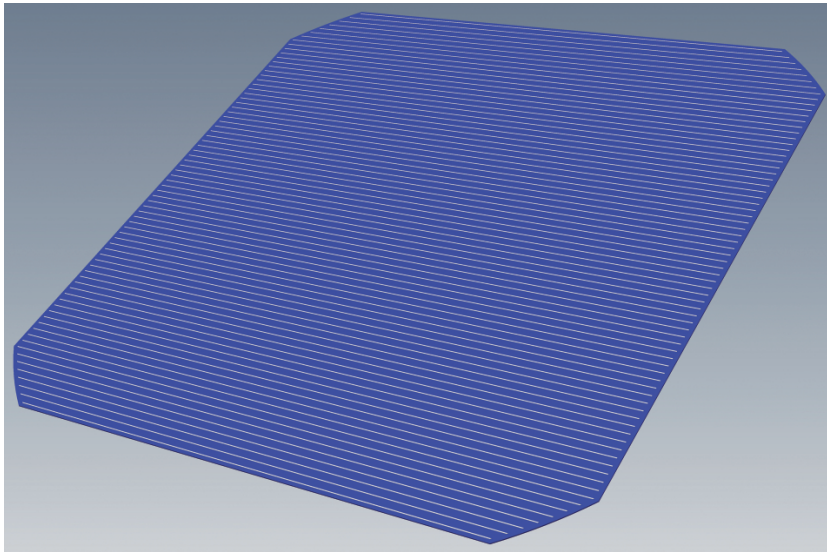
### 1.2.2 Variation der Busbaranzahl

Der heutige Zellstandard sieht bei einer Waferlänge von sechs Zoll vor, jeweils drei Ribbons für die Verschaltung der Solarzellen im Modul zu verwenden. Es wurde gezeigt, dass diese Verschaltungsmethode zu erheblichen Leistungsverlusten führt [57]. Eine Solarzelle oben beschriebenen Ausmaßes generiert einen Strom von ca. 9 A. Dieser Strom kann ausschließlich über die drei Ribbons auf die in Reihe geschaltete Nachbarzelle abgeführt werden. Die Verlustleistung  $P_{\text{Verlust}}$  ist quadratisch proportional zum gesamten generierten Strom  $I_{\text{gesamt}}$  und proportional zum Gesamtwiderstand  $R_{\text{gesamt}}$ :

$$P_{\text{Verlust}} = R_{\text{gesamt}} I_{\text{gesamt}}^2 = R_{\text{gesamt}} (j A_{\text{gesamt}})^2. \quad (1.7)$$

Dies bedeutet, dass mit zunehmender Fläche  $A_{\text{gesamt}}$  der Solarzelle mit der Stromdichte  $j$  auch der Strom und damit die Verlustleistung zunimmt, wie Gleichung 1.7 zu entnehmen ist. Unter Verwendung möglichst großer Leitungsquerschnitte der Leiterbahnen kann der Gesamtwiderstand und damit der Leitungsverlust minimiert werden. Die Höhe der Ribbons ist limitiert, da sie für den Verschaltungsprozess ausreichend biegsam sein müssen.

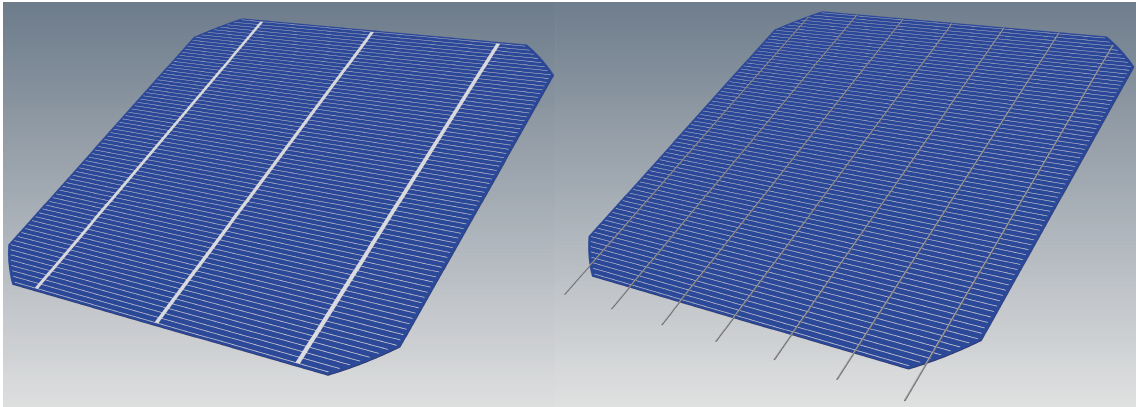
Durch eine Erhöhung der Ribbonanzahl könnte dieses Problem umgangen werden. Anstatt drei breite und hohe Ribbons zu verwenden, könnte eine große Anzahl leicht biegsamer Drähte verwendet werden, die insgesamt einen hohen Leitungsquerschnitt ausweisen und somit den Leistungsverlust reduzieren. Dies ist der Grundgedanke, der hinter dem Multi-Busbar-, oder auch Wire-Design steht. Durch die Verwendung vieler Cu-Drähte zur Zellverschaltung der Solarzellen muss das Metallisierungsschema auf Vorder- und Rückseite der Solarzelle dahingehend angepasst werden. Als Ausgangspunkt dient eine funktionsfähige Solarzelle, wie sie in Kapitel 1.1 beschrieben wurden. Die Vorderseitenmetallisierung besteht aus parallel zueinander angeordneten Leiterbahnen. Diese Struktur wird auch als Fingergrid bezeichnet. Zur Beschreibung der Struktur der metallisierten Vorderseite wird im Folgenden der Begriff Grid oder Fingergrid verwendet. Schematisch ist solch eine Solarzelle in Abbildung 1.5 dargestellt. Deutlich sind die parallel angeordneten, metallisierten Leiterbahnen zu erkennen (weiß). Eine Leiterbahn wird auch als Finger bezeichnet.



**Abb. 1.5:** Schematische Darstellung einer Solarzelle mit Fingern als Vorderseitenmetallisierung. Die parallel angeordneten Leiterbahnen heben sich deutlich von der blauen Siliziumnitridschicht ab [58].

Der Abstand zwischen den Ag-Fingern hängt maßgeblich vom Schichtwiderstand des Emitters und der Fingerbreite ab und variiert üblicherweise zwischen 1,5 mm und 2,5 mm. Mit steigendem Schichtwiderstand des Emitters sollte der Fingerabstand verringert werden, um den Serienwiderstandsbeitrag nicht zu stark erhöhen. Dadurch erhöht sich die Anzahl der Finger.

Zur Herstellung einer 3-Busbar-Solarzelle müssen anschließend drei Sammelleitun-



**Abb. 1.6:** Schematische Darstellung einer 3-Busbar-Solarzelle (links) und einer auf der Vorderseite verschalteten Multi-Busbar-Solarzelle (rechts) [58].

gen, die Busbars, auf die Vorderseite aufgebracht werden. Sie verbinden die Finger miteinander und dienen als Lötkontakte für die Ribbons. In Abbildung 1.6 ist eine 3-Busbar-Solarzelle links im Bild mit durchgehenden Busbars dargestellt. Sie ist nicht verschaltet, es fehlen die Ribbons auf Vorder- und Rückseite.

Die gängige Breite eines Busbars liegt bei 1,2-1,5 mm und ist maßgeblich den Fertigungstoleranzen beim Aufbringen des Ribbons und den Adhäsionseigenschaften der Lötstellen geschuldet. Typischerweise wird ein im Querschnitt rechteckiges Ribbon verwendet, auch wenn eine geneigte beziehungsweise texturierte Oberfläche (Pyramiden o.ä.) vorteilhaft wäre, wie im Folgenden noch erläutert wird. In der Anwendung stellt es sich jedoch als schwierig heraus, die Form eines strukturierten Ribbons nach dem Lötprozess beizubehalten.

In Abbildung 1.6 befindet sich auf der rechten Seite eine sogenannten Multi-Busbar- oder Wire-Solarzelle. Sie unterscheidet sich von der 3-Busbar-Solarzelle durch eine erhöhte Ribbonanzahl und durch die veränderte Ribbonform. Anstatt rechteckiger Ribbons werden runde Drähte verwendet. Die Anzahl der benötigten Drähte korreliert stark mit deren Durchmesser. Dies wird in Kapitel 2 ausführlich behandelt. Ausgehend von Abbildung 1.6 können bereits jetzt wichtige Aussagen über beide Zelldesigns getroffen werden:

- Durch die unterschiedliche Anzahl von Ribbons und Drähten weisen die beiden Zelldesigns eine unterschiedliche Abschattung auf.
- Die benötigte Metallmenge zur Vorderseitenmetallisierung einer 3-Busbar-Solarzelle ist im Vergleich zu einer Multi-Busbar-Solarzelle größer, da zu den Fingern zusätzlich noch Busbars aufgebracht werden müssen.
- Die optischen Eigenschaften eines runden Drahts unterscheiden sich von denen eines rechteckigen Ribbons.
- Die Verteilung des Stromflusses auf den Solarzellen unterscheidet sich.
- Die effektive Fingerlänge der beiden Zellkonzepte unterscheidet sich.
- Durch die unterschiedliche Verschaltung und Abschattung der Zellen unterscheidet sich die Zelleistung.

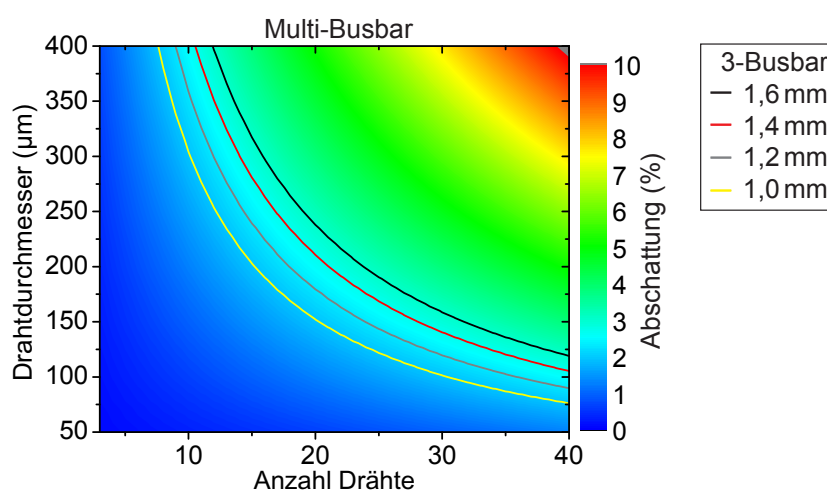
Dies sind die grundsätzlichen Überlegungen, die dazu führten, das Multi-Busbar-Zellkonzept genauer zu evaluieren. Hierzu wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Simulationsprogramm geschrieben, mit dem durch Vorgabe von Parametern wie Drahtanzahl, Drahtdurchmesser, uvm. das Zelldesign und die Verschaltung der Solarzelle für den Einsatz im Modul optimiert wurden.

### 1.2.3 Geometrische Überlegungen zum Draht- und Ribbondesign

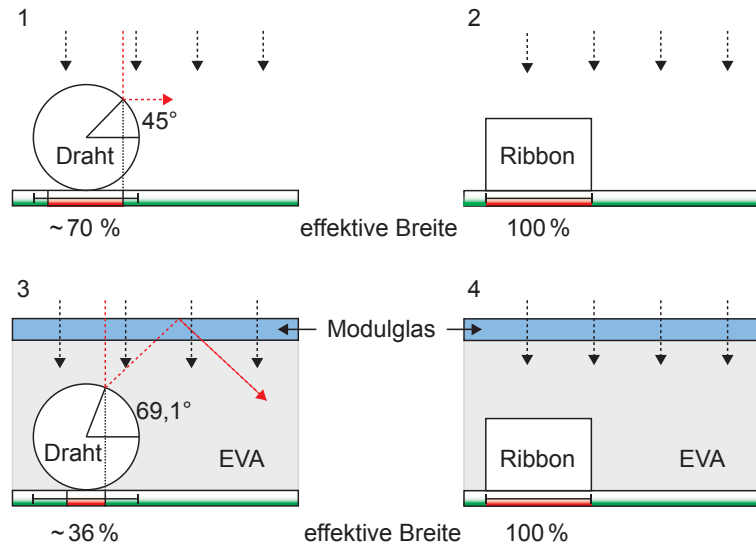
Die Abschattung der Drähte einer Multi-Busbar-Solarzelle wurde unter Vernachlässigung der Reflexion an Drähten für eine quadratische  $(156 \text{ mm})^2$  Solarzellenfläche bestimmt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 1.7 illustriert.

Der Drahtdurchmesser ist über die Anzahl der Drähte aufgetragen, die Abschattung der Solarzelle ist farblich gekennzeichnet. Zusätzlich ist die Abschattung einer 3-Busbar-Solarzelle in das Schaubild integriert. Die schwarze Kurve beschreibt eine 3-Busbar-Solarzelle mit 1,6 mm breiten Busbars. 1,4 mm breite Busbars sind in Rot, 1,2 mm breite Busbars in Grau und 1 mm breite Busbars in Gelb dargestellt. Über dieses Schaubild kann abgeschätzt werden, welche Kombination aus Drahtdurchmesser und Drahtanzahl eine geringere Abschattung gewährleistet als eine 3-Busbar-Solarzelle mit gegebener Busbarbreite. In der Rechnung wurde die Abschattung eines Drahts oder Ribbons auf 100 % gesetzt. Allerdings ist davon auszugehen, dass speziell bei einem runden Draht, aber auch an der abgerundeten Kante eines Ribbons, zumindest ein Teil des Lichts in Richtung der Solarzelle reflektiert wird. Daher erscheint es sinnvoll, eine effektive Breite des Drahts/Ribbons zu definieren, die ein Maß für die wahre Abschattung der Struktur darstellt. Hierzu werden zunächst materialunabhängige geometrische Überlegungen vorgestellt, die einen ersten Rückschluss auf die effektive Breite zulassen.

Untersucht wurden die Reflexionseigenschaften eines rechteckigen Busbars und eines runden Drahtes auf Zell- und Modulebene. In Abbildung 1.8 sind die Lichtlaufwege im Falle eines runden Drahts (links) und eines rechteckigen Ribbons (rechts) sowohl



**Abb. 1.7:** Abschattung der Drähte/Ribbons einer Multi-Busbar-/3-Busbar-Solarzelle, ohne Fingergrid, bei Variation der Draht-/Busbarbreite und Drahtanzahl. Viele Kombinationen aus Drahtdicke und Drahtanzahl ergeben eine geringere Abschattung als die einer 3-Busbar-Solarzelle.



**Abb. 1.8:** Darstellung eines runden Drahts und eines rechteckigen Ribbons auf Zell- und Modulebene. Der rot gestrichelte Pfeil gibt den Grenzwinkel an. 1.) Licht wird teilweise am Draht reflektiert und kann so zur Zelloberfläche gelangen. 3.) Im Modul vergrößert sich dieser Effekt, die effektive Breite des Drahts verringert sich weiter. 2.,4) Ein rechteckiges Ribbon erzeugt diesen Effekt nicht.

ohne Modulglas (oben) als auch unter Modulglas mit EVA (Ethylenvinylacetat) [59] (unten) dargestellt. In der oberen Bildhälfte ist die verschaltete Zelle sichtbar, der Draht beziehungsweise das Ribbon liegt direkt auf der Zelloberfläche auf. Das Licht fällt senkrecht auf die Zelloberfläche. An der runden Struktur wird einfallendes Licht, welches einen Winkel größer  $90^\circ$  zwischen dem einfallenden und dem reflektierten Strahl bildet, direkt auf die Oberfläche der Solarzelle abgelenkt. Die effektive Breite des Drahts wird so auf ca. 70 % des wahren Drahtdurchmessers reduziert. Für ein rechteckiges Ribbon ändert sich die effektive Breite allerdings nicht. Für den Fall einer einlamierten Zelle, einer Zelle im Modul, muss beachtet werden, dass eine Glasschicht und eine Schicht aus EVA zwischen die Lichtquelle und die Solarzelle gebracht werden. Da der Brechungsindex von Modulglas [60] und EVA [61] ähnlich ist, wurde für die Berechnung ein einheitlich, konstanter Brechungsindex von  $n = 1,5$  gewählt. Damit verringert sich die effektive Breite weiter, da durch die zusätzliche Totalreflexion an der Glas-Luft-Grenzfläche das Licht wieder zur Zelloberfläche gelenkt wird. Die errechnete effektive Breite beträgt nur noch 36 % der wahren Drahtbreite. Für das rechteckige Ribbon verändert sich die effektive Breite auch im Modul nicht.

Es sei der Vollständigkeit halber erwähnt, dass es zusätzlich noch Lichtanteile gibt, die an der Grenzschicht partiell reflektiert und transmittiert werden und sich dadurch die effektive Breite des Drahts weiter verringern würde. Für Ag-plattierte Metallisierungen, die näherungsweise halbzyklindrische Formen aufweisen, konnte Blakers in Simulation und Experiment zeigen, dass die effektive Breite der Metallisierung der Zelle durch den Einbau in ein Modul stark verringert wird. Von einer Reduktion auf weniger als 40 % wurde berichtet [62]. Einen nicht zu unterschätzenden Anteil an der Reduzierung der Breite hat hier nicht nur die Form, sondern auch die Oberflächenbeschaffenheit und das Material der Metallisierung.

Da es sich hier um ein vereinfachtes Modell handelt, wird darauf verwiesen, welche

Gegebenheiten zusätzlich berücksichtigt werden sollten, um das Modell zu präzisieren.

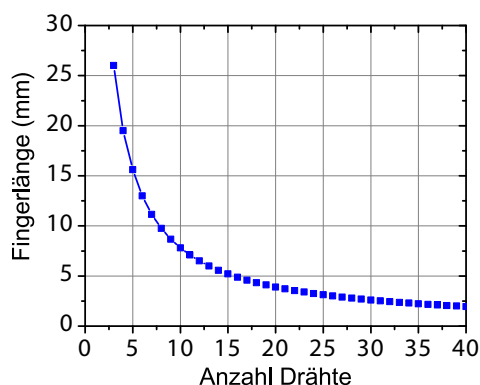
- Licht, welches auf die Zelloberfläche trifft, wird nicht vollständig absorbiert.
- Das Modulglas, das EVA und der Draht absorbieren einen Teil des Lichts.
- Es kann zu weiterer Reflexion an benachbarten Drähten kommen.
- Der Brechungsindex von EVA-Folie ( $n = 1,48$ ) und Modulglas ( $n = 1,52$ ) ist nicht exakt der gleiche. Beide Materialien haben ein unterschiedliches Dispersions- und Transmissionsverhalten [60, 59].

### 1.2.4 Verkürzung der effektiven Fingerlänge

Ein weiterer Vorteil des Multi-Busbar-Konzepts liegt in der Verkürzung der effektiven Fingerlänge. Die effektive Fingerlänge ist die maximale Länge, die der generierte Strom durch den metallisierten Finger zurücklegen muss, bis er in den Busbar oder den Draht abfließen kann. In Abbildung 1.9 ist die Abnahme der Fingerlänge mit zunehmender Drahtanzahl für eine Solarzelle mit einer Kantenlänge von 156 mm und einer Fingerlänge von 154 mm aufgetragen. Da der generierte Strom vom Emitter durch die Finger in die Busbars oder die Drähte fließt, verringert sich die Weglänge der Ladungsträger mit zunehmender Anzahl der Drähte. Bei einer 3-Busbar-Solarzelle wird ein signifikanter Anteil des Gesamtserienwiderstands durch die Fingerstruktur hervorgerufen. Daher führt eine Erhöhung der Busbar- oder Drahtanzahl zu einer Minimierung des Gesamtserienwiderstands. Für den flächengewichteten Serienwiderstandsbeitrag eines Fingers gilt folgende Proportionalität (siehe Tabelle 1.2):

$$r_{Finger} \propto L_F^2. \quad (1.8)$$

Dies bedeutet, dass eine Verdopplung der Drahtanzahl zu einer Halbierung der Fingerlänge  $L_F$  führt und damit zu einer Senkung des flächengewichteten Serienwiderstandsbeitrags des Fingers um den Faktor vier. Die damit hervorgerufene Absenkung des Gesamtserienwiderstands erhöht die Leistung der Solarzelle, da die Verlustleistung reduziert wird (siehe Gleichung 1.7).



**Abb. 1.9:** Effektive Fingerlänge eine sechs Zoll Solarzelle, aufgetragen über die Anzahl der Drähte. Mit zunehmender Drahtanzahl verringert sich die effektive Fingerlänge.

Alternativ besteht die Möglichkeit, bei gleichbleibendem Serienwiderstand die Metallmenge auf der Vorderseite zu reduzieren. Eine Verschmälerung der Fingerbreite infolge einer Pastenreduktion hätte zusätzlich den positiven Effekt, dass die Abschattung reduziert werden würde. Allerdings ist das klassische Siebdruckverfahren in Bezug auf Uniformität und aufgebrauchte Pastenmenge technisch limitiert. Werden sehr schmale Finger ( $< 50 \mu\text{m}$ ) gedruckt, so kommt es vermehrt zu unerwünschten Einschnürungen und Fingerunterbrechungen. Diese stellen für 3-Busbar-Solarzellen ein großes Problem dar, da sie den Serienwiderstand des Fingergrids negativ beeinflussen. Für eine Solarzelle mit großer Drahtanzahl führen Fingerunterbrechungen jedoch kaum zu einem Anstieg des Widerstands, da die effektive Fingerlänge gering ist. Anschaulich ist dies in Abbildung 1.10 dargestellt. Hier ist die Vorderseite einer 3-Busbar (oben) und einer Multi-Busbar-Solarzelle (unten) dargestellt. In Rot sind die Finger dargestellt, bei denen sich die effektive Fingerlänge durch eine Fingerunterbrechung erhöht hat.



**Abb. 1.10:** Aufsicht auf eine 3-Busbar und eine Multi-Busbar-Solarzelle mit 15 Drähten. Fingerunterbrechungen können bei 3-Busbar-Solarzellen den Serienwiderstand stark erhöhen (oben). Bei Multi-Busbar-Solarzellen ist dieser Effekt nicht ausgeprägt, da die effektive Fingerlänge gering ist (unten). In Rot jeweils die erhöhte effektive Fingerlänge.

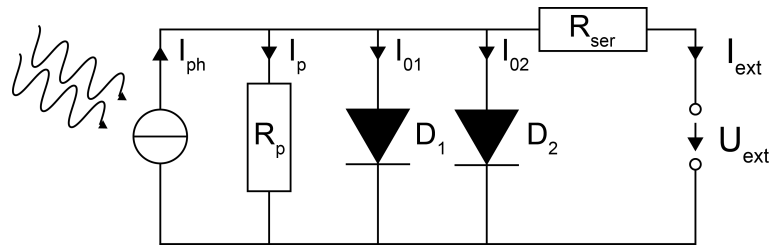
## 1.3 Aufbau des Simulationsprogramms

Ein auf dem Zweidiodenmodell basierendes Simulationsprogramm wurde erstellt, um die Aussagen aus Kapitel 1.2 genauer zu überprüfen. Als grafische Oberfläche diente hierfür das Programm Microsoft Excel 2010. Mithilfe von Makros auf Basis von Visual Basic wurden Automationsroutinen geschrieben, die eine Optimierung bestimmter Parameter ermöglichten. Der generelle Aufbau des Programms wird diskutiert und die für die Simulation benötigten Parameter werden beschrieben, um einen Einblick in den Aufbau des Programms zu erhalten.

### 1.3.1 Das Zweidiodenmodell

Das Zweidiodenmodell [63] wird für Solarzellensimulationen häufig verwendet, da es trotz seines einfachen Aufbaus die Diodenkennlinie einer realen Solarzelle abbilden kann. Es besteht aus zwei parallel geschalteten Dioden und einem dazu parallel geschalteten ohmschen Widerstand, dem sogenannten Parallelwiderstand. Die letzte Komponente besteht aus einem weiteren ohmschen Widerstand. Er ist mit den drei parallel geschalteten Komponenten in Reihe geschaltet und wird als Serienwiderstand bezeichnet. In Abbildung 1.11 ist das Schaltbild des Zweidiodenmodells dargestellt.

Auf der linken Seite des Schaltbilds ist die Gleichstromquelle eingezeichnet. Die



**Abb. 1.11:** Schaltbild des Zweidiodenmodells, von links nach rechts: Strom-/Spannungsquelle, Parallelwiderstand  $R_p$ , Diode 1  $D_1$ , Diode 2  $D_2$ , Serienwiderstand  $R_{ser}$ .

Voraussetzung dafür Strom und Spannung zu generieren, ist der Einfall von Photonen eines definierten Energiebereichs auf das Bauelement. Allerdings ist die Solarzelle im Rahmen dieses Modells keine perfekte Gleichstromquelle. Ein Teil des generierten Photostroms ( $I_{ph}$ ) geht in Form von Leckströmen an den internen Komponenten verloren und steht dem externen Stromkreis ( $I_{ext}$ ) nicht mehr zur Verfügung. Der in Reihe geschaltete und oftmals idealisiert als ohmsch angenommene Serienwiderstand sorgt für einen Spannungsabfall, sodass auch von der intern generierten Spannung unter Stromfluss ein Teil für den externen Stromkreis verloren geht. Schlussendlich kann am Ausgang (rechts) eine Spannung  $U_{ext}$ , beziehungsweise ein Strom  $I_{ext}$  abgegriffen werden, wobei Strom  $I_{ext}$  und Spannung  $U_{ext}$  sich entsprechend des Innenwiderstands des Verbrauchers einstellen.

Anschaulich kann das Aufteilen der Solarzelle in zwei Dioden wie folgt erklärt werden: Die erste Diode beschreibt die Rekombination an den Oberflächen, im Emitter, am BSF und in der Basis der Solarzelle. Die zweite Diode charakterisiert die Rekombination in der Raumladungszone des pn-Übergangs. Hierbei wird angenommen, dass sich ein punktförmiges Rekombinationszentrum in der Mitte der Bandlücke befindet [64]. Der Parallelwiderstand beschreibt Leckströme an der Zellkante sowie punktuelle lokale Kurzschlüsse (engl. Shunts) des pn-Übergangs. Auch der Serienwiderstand setzt sich aus mehreren Komponenten zusammen, die im nächsten Abschnitt detailliert diskutiert werden. In Gleichung 1.9 ist die Abhängigkeit des Gesamtstroms  $I$  von der Spannung  $U$  mathematisch dargestellt, es handelt sich um die Kennlinie der Solarzelle nach dem Zweidiodenmodell:

$$I(U) = I_{01} \left( e^{\frac{q(U - IR_{ser})}{n_1 k_B T}} - 1 \right) + I_{02} \left( e^{\frac{q(U - IR_{ser})}{n_2 k_B T}} - 1 \right) + \frac{U - IR_{ser}}{R_p} - I_{ph}. \quad (1.9)$$

Der Bruch  $k_B T/q$  wird als Temperaturspannung  $U_T$  bezeichnet und setzt sich aus der Elementarladung  $q$ , der Boltzmann-Konstanten  $k_B$  und der absoluten Temperatur zusammen. Die Temperatur wird für die Simulation nach Standardbedingungen auf  $25^\circ\text{C}$  gesetzt. Für die Temperaturspannung  $U_T$  ergibt sich damit ein Wert von ca.  $25,7\text{ mV}$ . Bei  $n_1$  und  $n_2$  handelt es sich um die sogenannten Idealitätsfaktoren. Sie werden mit  $n_1 = 1$  und  $n_2 = 2$  angegeben, können aber, besonders bei starken Inhomogenitäten der Solarzelle, schnell abweichen [65]. Die rechte Seite der Gleichung besteht aus vier Summanden. Die ersten beiden Terme beschreiben die Ströme über die beiden Dioden. Der dritten Term gibt den Stromfluss über den Parallelwiderstand an. Im letzten Term wird der generierte Photostrom angegeben. Es sei bemerkt, dass die ersten drei Terme jeweils vom Serienwiderstand abhängen.

### 1.3.2 Grenzen des Zweidiodenmodells

Das Zweidiodenmodell eignet sich durch seine Einfachheit besonders gut, um die Diodenkennlinie einer Solarzelle zuverlässig mit überschaubarem Aufwand zu beschreiben. Allerdings kann es, wie jedes Modell, auch an seine Grenzen gebracht werden. Auf diese soll nun eingegangen werden.

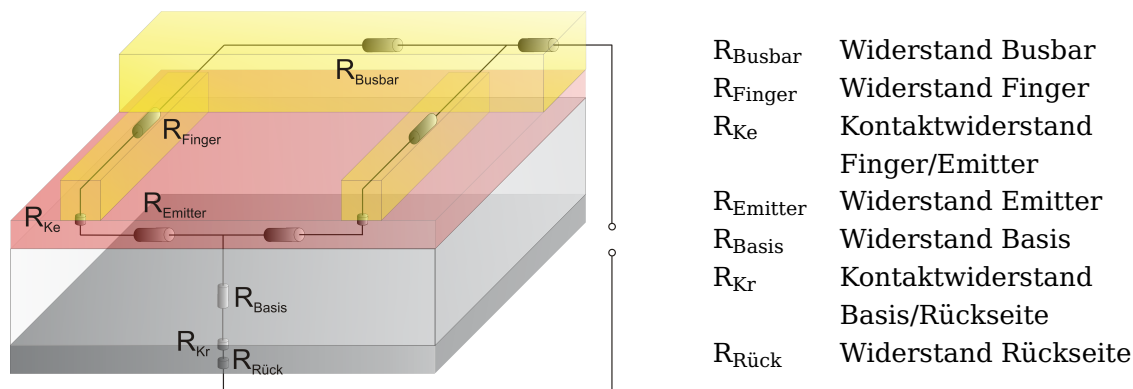
Ein Grundgedanke des eindimensionalen Zweidiodenmodells ist, dass sich die Solarzelle als Parallelschaltung vieler gleichartiger, parallelgeschalteter kleinerer Einheiten beschreiben lässt. Ist dies nicht gegeben, weil es zu lateralen Inhomogenitäten kommt, so treten zweidimensionale Effekte auf. Sie lassen sich nicht mit dem eindimensionalen Zweidiodenmodell in Einklang bringen. Hier wären sämtliche Prozessinhomogenitäten zu nennen, die das Modell nur als gemittelte Werte erfassen kann. Beispielsweise können lokal auftretende Leckströme, Inhomogenitäten in der Metallisierung der Solarzelle, inhomogene Emitterstrukturen, verteilter Serienwiderstand oder ein partiell fehlendes BSF nicht durch das Zweidiodenmodell erfasst werden. Hierdurch kann es zu starken Abweichungen der Diodenparameter kommen, die mit dem Zweidiodenmodell nicht mehr beschrieben werden können [66]. Insbesondere kann ein hoher verteilter Serienwiderstand die Werte der Idealitätsfaktoren und des Parallelwiderstands  $R_p$  stark beeinflussen [67], [68].

Um solche Phänomene in das Modell zu integrieren, müsste das Zweidiodenmodell zu einem Diodennetzwerk erweitert werden. Die oben beschriebenen Phänomene könnten auf diese Weise effizient dargestellt werden [69]. Dies beschränkt die Simulation mit dem Zweidiodenmodell auf Zellkonzepte und auch Materialien, die sich auf eine Dimension reduzieren lassen. Es werden gemittelte Parameter verwendet. In den folgenden Simulationen wird davon ausgegangen, dass die Referenz-Solarzelle keine starken Inhomogenitäten aufweist. Eine Simulation des quasi-eindimensionalen beidseitig metallisierten Solarzellenkonzepts mit ganzflächiger Rückseitenmetallisierung, wie es im Rahmen dieser Arbeit verwendet wird, liefert somit akzeptable Ergebnisse. Für Simulationen zweidimensionaler Zellkonzepte wie PERC/PERL-Solarzellen (engl. Passivated Emitter and Rear Contacts / Passivated Emitter and Rear Locally-diffused) mit lokalen Rückseitenkontakten oder IBC-Solarzellen (engl. Interdigitated Back Contact), bei denen die sonnenzugewandte Seite nicht metallisiert wird, kann das Zweidiodenmodell nicht verwendet werden.

### 1.3.3 Komponenten des Serienwiderstands

Die Voraussetzung für eine aussagekräftige Simulation mit dem Zweidiodenmodell besteht in der exakten Bestimmung des Gesamtserienwiderstands der Solarzelle. In Abbildung 1.12 ist der Querschnitt einer Solarzelle mit den einzelnen Komponenten, die zum Gesamtserienwiderstand beitragen, dargestellt. Da es sich um eine Reihenschaltung handelt, werden alle Beiträge des Gesamtserienwiderstands, gewichtet zur Fläche, aufaddiert. Somit besteht der flächengewichtete Serienwiderstand  $r_{\text{ser}}$  einer Solarzelle aus den Beiträgen vom Busbar  $r_{\text{Busbar}}$ , den Fingern  $r_{\text{Finger}}$ , dem Kontakt zwischen Finger und Emitter  $r_{\text{Ke}}$ , dem Emitter  $r_{\text{Emitter}}$ , der Basis  $r_{\text{Basis}}$ , dem Kontakt zwischen Basis und Rückseite  $r_{\text{Kr}}$  und der Rückseite der Solarzelle  $r_{\text{Rück}}$ :

$$r_{\text{ser}} = r_{\text{Busbar}} + r_{\text{Finger}} + r_{\text{Ke}} + r_{\text{Emitter}} + r_{\text{Basis}} + r_{\text{Kr}} + r_{\text{Rück}} \quad (1.10)$$



**Abb. 1.12:** Links: Schematische Darstellung einer Solarzelle. In der Solarzelle sind die in Reihe geschalteten Serienwiderstände dargestellt. Rechts: Einzelne Komponenten des Gesamtserienwiderstands einer Solarzelle.

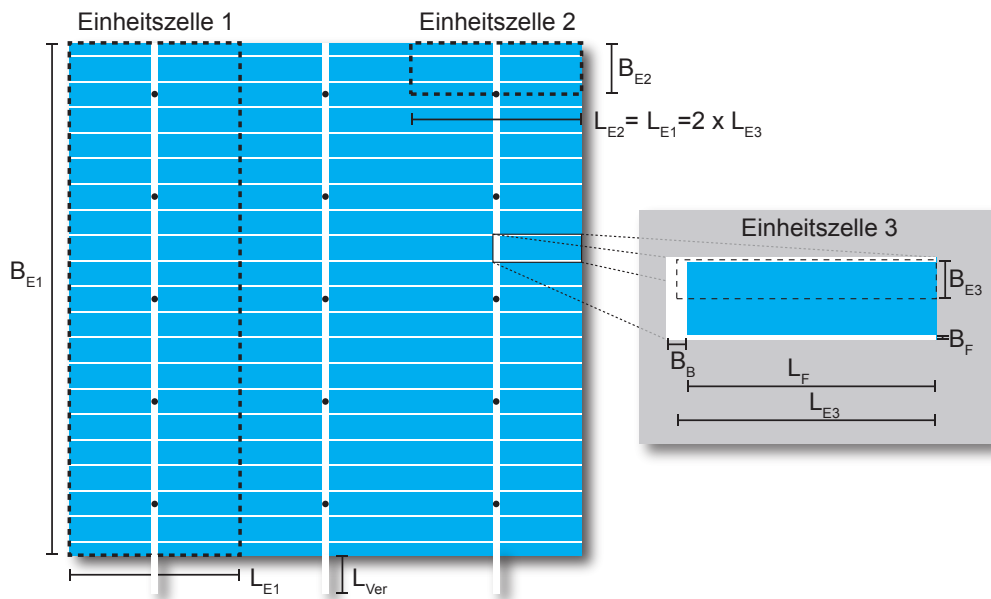
Die Solarzelle liegt bei der Bestimmung der Diodenkennlinie (Abkürzung:  $I(U)$ -Messung) auf einer temperierten Auflage, die mit einer Vakuuvorrichtung versehen ist und somit einen vollflächigen Kontakt zur Rückseite der Solarzelle herstellt. Auf der Vorderseite werden die Busbars mit einer hohen Anzahl an Messspitzen, den sogenannten Pins, kontaktiert. Hierdurch wird der Serienwiderstand der Solarzelle besonders niedrig gehalten, da der Strom nicht durch den gesamten Busbar bis zur Zellkante fließen muss. Die Messung spiegelt die wahre Zelleistung im Modul nicht wieder. Die Solarzelle erzielt mit dieser Messmethode einen besonders hohen Wirkungsgrad. Ein weiterer Nachteil der Messung besteht darin, dass die Solarzelle im Modul durch eine EVA-Folie und eine Glasplatte bedeckt wird. Somit ändert sich das Spektrum des einfallenden Lichts, da beide Materialien besonders im ultravioletten Bereich des Lichts starke Absorption aufweisen. Dieser Effekt wird bei einer  $I(U)$ -Messung der Solarzelle nicht berücksichtigt, sofern nicht zusätzlich bestimmte UV-Filter eingesetzt werden, um das Spektrum anzupassen.

Der Widerstand zwischen der ganzflächig metallisierten Rückseite und der Basis  $R_{\text{Rück}}$  ist gering und kann vernachlässigt werden, da das Aluminium der Rückseite mit dem Silizium der Basis eine vollflächige Legierung bildet [70]. Für die Simulation wird angenommen, dass der Photonenfluss auf der gesamten Zellfläche konstant ist. Dies hat zur Folge, dass die Stromdichte  $j$  über den pn-Übergang in der Solarzelle konstant ist. Außerdem wird in der Simulation zusätzlich davon ausgegangen, dass die Ladungsträger auf dem kürzesten sich bietenden Weg abfließen. Dies ist nur bedingt richtig, da die generierten Ladungsträger in der Basis diffundieren. Für das verwendete Zellkonzept kann diese Näherung aufgrund des geringen Widerstands in der Basis durchaus getroffen werden.

Eine weitere Näherung besagt, dass sich die Ladungsträger im Emitter senkrecht auf die metallisierten Finger zubewegen. Diese Näherung ist etwas kritischer zu bewerten. Besonders bei hohen Kontaktwiderständen, inhomogenen Verteilungen der Vorderseitenmetallisierung oder Schwankungen des Emitterschichtwiderstands kann diese Näherung nicht ausnahmslos akzeptiert werden [71, 72]. Darum werden Simulationen in solch kritischen Bereichen nicht durchgeführt und es wird davon ausgegangen, dass keine Inhomogenitäten der einzelnen Komponenten vorliegen. Für die Simulation wird die Solarzelle mit den getätigten Näherungen unter den oben beschriebenen Bedingungen als eindimensionales Bauteil aufgefasst.

### 1.3.4 Bestimmung des Serienwiderstands über die Einheitszelle

Für die theoretische Beschreibung der einzelnen Komponenten des Serienwiderstands wird die vollflächige Solarzelle auf ihre Einheitszellen reduziert. Eine Einheitszelle ist eine symmetrische Einheit auf der Solarzelle. Durch Spiegelung muss sie den gesamten Bereich der Solarzelle abbilden können. Da die benachbarten Einheitszellen parallelgeschaltet sind, leisten sie keinen zusätzlichen Beitrag zum Gesamtserienwiderstand. Die Einheitszellen einer quadratischen Solarzellenvorderseite sind in Abbildung 1.13 veranschaulicht.



**Abb. 1.13:** Schematische Abbildung einer Solarzellenvorderseite. Die im Schaubild verwendeten Bezeichnungen werden für die Bestimmung der einzelnen Widerstandskomponenten verwendet.

Die Vorderseite einer Solarzelle kann in drei Einheitszellen aufgeteilt werden. Die erste Einheitszelle hat als Symmetrieachse den Busbar. Sie wird verwendet, um den Widerstand im Ribbon zu bestimmen. In der zweiten Einheitszelle wird ebenfalls der Busbar als Symmetrieachse benutzt. Die Einheitszelle wird benötigt, um den Widerstand in den Busbars für die Messung der Diodenkennlinie zu bestimmen. Die dritte Einheitszelle beschreibt den Widerstand des Emitters und der Finger. Der Widerstand wird mit der Fläche der Einheitszelle multipliziert, um den Serienwiderstand gewichtet anzugeben. Im Folgenden soll anhand des Serienwiderstandsbeitrags des Emitters gezeigt werden, wie aus der Verlustleistung der flächengewichtete Serienwiderstand  $R_{ser}$  des Emitters bestimmt wird. Ausgangspunkt ist die Verlustleistung  $P_{Verlust}$ , die über den Serienwiderstand  $R_{ser}$  und den generierten Strom in der Einheitszelle  $I_E$  definiert ist:

$$P_{Verlust} = R_{ser} I_E^2. \quad (1.11)$$

Da die Annahme getroffen wurde, dass der generierte Strom auf der Zelle homogen verteilt ist, folgt direkt, dass die Stromdichte  $j$  über den pn-Übergang konstant sein muss. Zu beachten ist hierbei, dass unter dem metallisierten Finger und dem Busbar

kein Strom generiert wird, da dieser Bereich abgeschattet ist. Die Fläche der Einheitszelle wird mit  $A_{E3}$  beschrieben. Es folgt damit für den gesamten generierten Strom in der Einheitszelle:

$$I_E = j A_{Emitter} = j L_F x. \quad (1.12)$$

Hierbei ist  $x$  die Weglänge, die die Ladung im Emitter zurücklegt, wenn sie genau in der Mitte zwischen zwei Fingern generiert wurde. Der Schichtwiderstand des Emitters  $R_{sh}$ , senkrecht zur Fingerrichtung, ist wie folgt definiert:

$$R_{sh} = L_F \frac{dR_{Emitter}}{dx}. \quad (1.13)$$

Somit sind alle benötigten Terme zur Bestimmung der Verlustleistung vorhanden. Durch Einsetzen von Gleichung 1.12 und 1.13 in Gleichung 1.11 folgt:

$$dP_{Verlust} = I_E^2 dR_{Emitter} = (j L_F x)^2 \frac{R_{sh}}{L_F} dx. \quad (1.14)$$

Anschließend wird über die gesamte Weglänge senkrecht zum Finger integriert:

$$P_{Verlust} = j^2 L_F R_{sh} \int_0^{B_{E3} - \frac{B_F}{2}} x^2 dx = j^2 L_F R_{sh} \frac{1}{3} \left( B_{E3} - \frac{B_F}{2} \right)^3. \quad (1.15)$$

Gleichung 1.12 wird wieder nach  $R_{ser}$  aufgelöst:

$$R_{ser} = \frac{P_{Verlust}}{I_E^2} = \frac{1}{3} \frac{j^2 L_F R_{sh} \left( B_{E3} - \frac{B_F}{2} \right)^3}{\left( j L_F \left( B_{E3} - \frac{B_F}{2} \right) \right)^2}. \quad (1.16)$$

Anschließend wird der Term mit dem gesamten Flächeninhalt der Einheitszelle multipliziert, um den flächengewichteten Serienwiderstand des Emitters  $r_{Emitter}$  zu erhalten:

$$r_{Emitter} = R_{ser} A_E = \frac{1}{3} R_{sh} \frac{L_{E3}}{L_F} B_{E3} \left( B_{E3} - \frac{B_F}{2} \right). \quad (1.17)$$

Die benötigten Variablen für die Berechnung der einzelnen Komponenten des Serienwiderstands sind in Tabelle 1.1 aufgelistet. Für die anderen Komponenten des gesamten Serienwiderstands ist in gleicher Weise vorzugehen. Die einzelnen Komponenten sind in Tabelle 1.2 aufgeführt. Eine detaillierte Herleitung der verwendeten Gleichungen wurde in [73] durchgeführt.

**Tabelle 1.1:** Verwendete Variablen, die zur Bestimmung des flächenabhängigen Serienwiderstands einer Solarzelle benötigt werden.

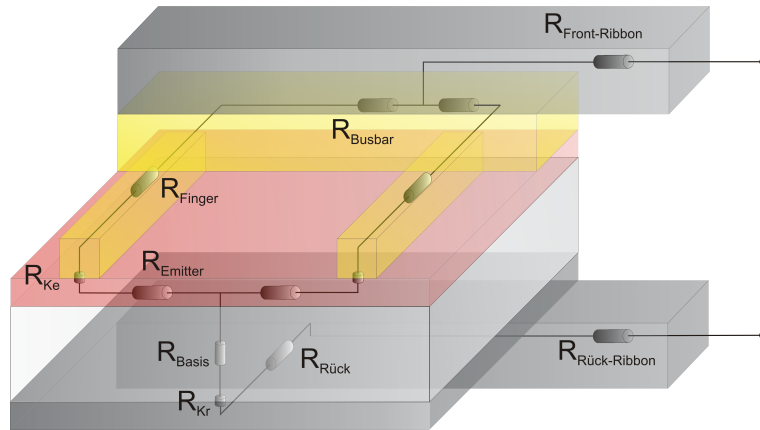
Komponente	Name	Symbol	Einheit
Busbar	Leitfähigkeit	$\sigma_{Bus}$	$\frac{1}{\Omega m}$
	Busbarquerschnitt	$A_{Bus}$	$m^2$
Finger	Leitfähigkeit	$\sigma_F$	$\frac{1}{\Omega m}$
	Fingerquerschnitt	$A_F$	$m^2$
Kontakt Emitter	spez. Kontaktwiderstand	$\rho_c$	$\Omega m^2$
Emitter	Schichtwiderstand	$R_{sh}$	$\Omega/sq$
Basis	spez. Widerstand	$\rho_B$	$\Omega m$
	Dicke Basis	$d_B$	$m$
Rückseite	spez. Widerstand	$\rho_{Rück}$	$\Omega m$
	Dicke Rückseite	$d_{Rück}$	$m$
Ribbon	Leitfähigkeit	$\sigma_{Ribbon}$	$\frac{1}{\Omega m}$
	Ribbonquerschnitt	$A_{Ribbon}$	$m^2$
	Kontaktpunkte	$N_K$	
	Verlängerung	$L_{Ver}$	$m$

**Tabelle 1.2:** Komponenten des Serienwiderstands einer Solarzelle, die vollflächigen Kontakt zur Auflage hat und mit Messspitzen auf den Busbars kontaktiert wird.

Komponente	Einheitszelle	Flächengewichteter Serienwiderstand in ( $\Omega cm^2$ )
Busbar	$L_{E2} B_{E2}$	$\frac{1}{3} \frac{1}{\sigma_{Bus}} B_{E2}^2 \frac{L_{E2}}{A_{Bus}}$
Finger	$L_{E3} B_{E3}$	$\frac{2}{3} \frac{1}{\sigma_F} L_F L_{E3} \frac{B_{E1}}{A_F}$
Kontakt Emitter	$L_{E3} B_{E3}$	$\frac{1}{2} \rho_C \frac{L_F B_F}{L_{E3} B_{E3}}$
Emitter	$L_{E3} B_{E3}$	$\frac{1}{3} R_{sh} \frac{L_{E3}}{L_F} B_{E3} \left( B_{E3} - \frac{B_F}{2} \right)$
Basis	$B_{E1} B_{E1}$	$\rho_B d_B$
Rückseite	$B_{E1} B_{E1}$	$\rho_{Rück} d_{Rück}$

### 1.3.5 Erweiterung des Modells auf eine verschaltete Solarzelle

Für die Berechnung des Gesamtserienwiderstands einer verschalteten Solarzelle ist es erforderlich, die benötigten Ribbons auf Vorder- und Rückseite zu berücksichtigen. In Abbildung 1.14 ist eine Skizze einer verschalteten Solarzelle illustriert.



**Abb. 1.14:** Auf Vorder- und Rückseite verschaltete Solarzelle, zusätzlich werden die Serienwiderstandsbeiträge des Vorder-  $R_{\text{Front-Ribbon}}$  und Rückseitenribbons  $R_{\text{Rück-Ribbon}}$  addiert.

Der flächengewichtete Gesamtserienwiderstand wird nun um die Beiträge des Vorderseiten- und des Rückseitenribbons  $R_{\text{Front-Ribbon}}$  und  $R_{\text{Rück-Ribbon}}$  erweitert und lautet somit:

$$r_{\text{ser}} = r_{\text{Front-Ribbon}} + r_{\text{Busbar}} + r_{\text{Finger}} + r_{\text{Ke}} + r_{\text{Emitter}} + r_{\text{Basis}} + r_{\text{Kr}} + r_{\text{Rück}} + r_{\text{Rück-Ribbon}}. \quad (1.18)$$

Für die Vorderseitensimulation wird angenommen, dass das Ribbon den Kontakt zum Busbar durch eine definierte Anzahl von Kontaktpunkten  $N_K$  bildet. Da der Kontakt zwischen Ribbon und Busbar durch eine Lötverbindung hergestellt wird, ist der Kontaktwiderstand gering und wird in der Simulation vernachlässigt. Für den spezifischen Kontaktwiderstand zwischen Busbar und Ribbon wurden Werte zwischen  $20\text{-}70 \mu\Omega\text{cm}^2$  ermittelt [74]. Die Vernachlässigung des Kontaktwiderstands zwischen Busbar und Ribbon ist somit gerechtfertigt. Die Beiträge zur eindimensionalen Berechnung der verschalteten Rückseite sind in Tabelle 1.3 dargestellt. Die benötigten Variablen sind in Tabelle 1.1 aufgelistet.

Hier soll explizit darauf hingewiesen werden, dass eindimensionale Berechnungen der verschalteten Rückseite im Simulationsprogramm nicht verwendet werden. Die Abweichung zwischen ein- und dreidimensionaler Berechnung ist besonders für geringe Draht- und Ribbonquerschnitte problematisch. In Kapitel 2.2 werden dreidimensionale Simulationen des Rückseitenwiderstands mit eindimensionalen Simulationen verglichen, um dies zu belegen. Es treten Abweichungen über 100 % auf, wenn die Ribbonhöhe kleiner  $60 \mu\text{m}$  ist. Bei einer Höhe von  $100 \mu\text{m}$  beträgt die Abweichung mehr als 60 % und bei  $250 \mu\text{m}$  werden Abweichungen bis zu 25 % zwischen der ein- und der dreidimensionalen Simulation ermittelt.

**Tabelle 1.3:** Zusatzkomponenten zur Berechnung des flächengewichteten Serienwiderstandsbeitrags der verschalteten Solarzelle.

Komponente	Einheitszelle	Flächengewichteter Serienwiderstand in ( $\Omega\text{cm}^2$ )
Frontribbon	$B_{E1} L_{E2}$	$\frac{2}{3} \frac{1}{\sigma_{\text{Ribbon}}} \frac{L_{E3} L_{E1}^2}{A_{\text{Ribbon}}} \left(1 + \frac{1}{2 N_K}\right)$
Verlängerung	$B_{E1} L_{E2}$	$\frac{1}{\sigma_{\text{Ribbon}}} \frac{L_{\text{Ver}}}{A_{\text{Ribbon}}} L_{E2} B_{E1}$
Rückribbon	$B_{E1} L_{E2}$	$\frac{1}{3} \frac{1}{\sigma_{\text{Ribbon}}} \frac{1}{A_{\text{Ribbon}}} B_{E1}^2 L_{E2}$
Al-Rückseite	$B_{E1} L_{E2}$	$\frac{1}{12} \frac{\rho_{\text{Rück}}}{d_{\text{Rück}}} L_{E2}^2$

Befinden sich auf der Rückseite, analog zu den Busbars auf der Vorderseite, durchgehende Pads, kann die Simulation auf eine Dimension reduziert werden, da die Ladungsträger von der metallischen Rückseite senkrecht auf das Ribbon fließen. Dies ist allerdings nur unter speziellen Zusatzannahmen sinnvoll. Der Widerstand in der aluminiumhaltigen Rückseite sollte im Vergleich zum Ribbon hoch sein. Wäre dies nicht der Fall, würde der Strom nicht mehr senkrecht auf das Ribbon zufließen, sondern auch eine Komponente parallel zum Ribbon aufweisen. Da aus Kosten- und Effizienzgründen dazu übergegangen wurde, anstelle eines durchgehenden Rückseitenpads mehrere kleinflächige Rückseitenpads zu drucken, ist es notwendig, für die Berechnung des Rückseitenwiderstands einen anderen Ansatz zu wählen. Solche Strukturen können nicht mehr eindimensional bestimmt werden. Deshalb wurden für die Berechnung der verschalteten Rückseite die Komponenten  $R_{\text{Rück}}$  und  $R_{\text{Rück-Ribbon}}$  zusammengefasst und separat berechnet.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der flächengewichtete Serienwiderstandsbeitrag der verschalteten Rückseite mithilfe der Finite-Elemente-Software FlexPDE 6 bestimmt [75]. Zu Beginn wurde experimentell der spezifische Widerstand einer siebgedruckten Aluminiumrückseite und von verzinnnten Kupfer-Ribbons und -Drähten bestimmt. Anschließend wurde mithilfe des Simulationsprogramms der Serienwiderstandsbeitrag bei Variation der Dicke der siebgedruckten Aluminiumschicht, der Dimension der Ribbons und Drähte sowie der Anzahl der Drähte bestimmt. Die ermittelten flächengewichteten Serienwiderstände wurden dann als Stützstellen im Programm zur Bestimmung des Serienwiderstands der Solarzelle verwendet, um den Anteil des Serienwiderstands der Rückseite zu berücksichtigen.

### 1.3.6 Auswertungsalgorithmus des Zweidiodenmodells

Die Gleichung des Zweidiodenmodells 1.9 kann mit der internen Spannung  $U_{int}$  parametrisiert werden, die an den internen Komponenten abfällt:

$$U_{int} = U_{ext} - R_{ser} I_{ext}. \quad (1.19)$$

Diese ist per Definition serienwiderstandsfrei. Mit dieser Parametrisierung verändert sich die Gleichung des Zweidiodenmodells zu:

$$I(U_{int}) = I_{01} \left( \frac{qU_{int}}{e n_1 k_B T} - 1 \right) + I_{02} \left( \frac{qU_{int}}{e n_2 k_B T} - 1 \right) + \frac{U_{int}}{R_p} + I_{ph}. \quad (1.20)$$

Als Ergebnis wird ein vom Serienwiderstand unbelasteter Strom  $I(U_{int})$  ermittelt. Der Term

$$U - IR_{ser} \quad (1.21)$$

wurde somit substituiert. Im nächsten Schritt wird diesem Strom wieder eine serienwiderstandsbehaftete Spannung  $U_{extern}$  zugeordnet, indem der Gesamtserienwiderstand  $R_{ser}$  mit einbezogen wird:

$$U_{ext} = U_{int} + I(U_{int})R_{ser}. \quad (1.22)$$

Der in den externen Stromkreis abgegebene Strom  $I_{ext}(U_{int})$  wird nun unter Vorgabe einer internen Spannung berechnet. Daraus wird in einem weiteren Schritt der Spannungsabfall über dem Serienwiderstand beziehungsweise die externe Spannung  $U_{ext}$  berechnet. Somit ergibt sich durch Variation der internen Spannung der Zusammenhang  $I_{ext}(U_{int})$ , ohne dass die transitive Gleichung des Zweidiodenmodells 1.9 numerisch gelöst werden muss.

## 1.4 Verwendung einer Referenz-Solarzelle

Für eine möglichst realistische Simulation wurden die benötigten Parameter für das Zweidiodenmodell mithilfe einer Referenz-Solarzelle bestimmt. Bei dieser Referenzzelle handelt es sich um eine monokristalline, alkalisch, texturierte, quadratische, 156 mm lange, 3-Busbar-Solarzelle mit siebgedruckter Ag-Vorder- und Al-Rückseite, selektiver Emitterstruktur und einer PECVD-SiN<sub>x</sub>:H-Antireflexionsschicht [76]. Die Geometrie der Vorder- und Rückseitenmetallisierung wurde ermittelt und die benötigten Parameter in das Simulationsprogramm integriert. Hierbei wurden die Parameter  $j_{01}$ ,  $j_{02}$ ,  $R_p$ ,  $I_{ph-Abs}$  so angepasst, dass sie mit den am ISE-CalLab [77] gemessenen  $I(U)$ -Parametern der Referenzzelle möglichst genau übereinstimmen. Die ermittelten Werte mit Fehlerangabe sind in Tabelle 1.4 aufgelistet.

**Tabelle 1.4:** Ermittelte Parameter die für die Beschreibung der Referenz-Solarzelle verwendet wurden.

Komponente	Name	Parameter
Rückseite	Dicke Schichtwiderstand	$(30 \pm 1) \mu\text{m}$ $(6,3 \pm 0,3) \text{ m}\Omega/\text{sq.}$
Basis	Dicke spezifischer Widerstand	$(200 \pm 10) \mu\text{m}$ $(2 \pm 0,1) \Omega\text{cm}$
Emitter	mittlerer Schichtwiderstand	$(74 \pm 3) \Omega/\text{sq.}$
Vorderseite	Fingerbreite Linienwiderstand Fingerabstand spezifischer Kontaktwiderstand Busbarbreite	$(90 \pm 5) \mu\text{m}$ $(0,22 \pm 0,05) \Omega/\text{cm}$ $(2,1 \pm 0,05) \text{ mm}$ $(1,5 \pm 0,2) \text{ m}\Omega\text{cm}^2$ $(1,5 \pm 0,05) \text{ mm}$

Die verwendeten Abweichungen der Parameter wurden anhand der Messmethode abgeschätzt. Aus der vom ISE-Callab angegebenen Diodenkennlinie wurden die benötigten Parameter für das Zweidiodenmodell bestimmt.

Unter der Annahme, dass  $n_1 = 1$ ,  $n_2 = 2$  ist, werden folgende Parameter ermittelt:

- $j_{01} = 580 \text{ fA/cm}^2$
- $j_{02} = 17 \text{ nA/cm}^2$
- $R_P = 10000 \Omega\text{cm}^2$
- $I_{\text{ph-Abs}} = 40,5 \text{ mA/cm}^2$ , der Photostrom ohne Abschattung. Unter der Annahme, dass an der Vorderseitenmetallisierung kein Licht reflektiert wird.

Die durch das ISE-Callab ermittelten Diodenparameter und die durch das Simulationsprogramm ermittelten Werte sind in Tabelle 1.5 dargestellt. Bei einem Fehler von 5 % für die ermittelten Parameter ( $j_{01}$ ,  $j_{02}$ ,  $R_P$ ,  $I_{\text{ph-Abs}}$ ) des Zweidiodenmodells und unter Verwendung der angegebenen Abweichungen aus Tabelle 1.4, wird eine Abweichung des Wirkungsgrads von  $0,24 \%_{\text{abs}}$  ermittelt. Dies entspricht einem Fehler von  $1,25 \%_{\text{rel}}$ .

**Tabelle 1.5:** Ermittelte Diodenparameter vom ISE-Callab und der Simulation.

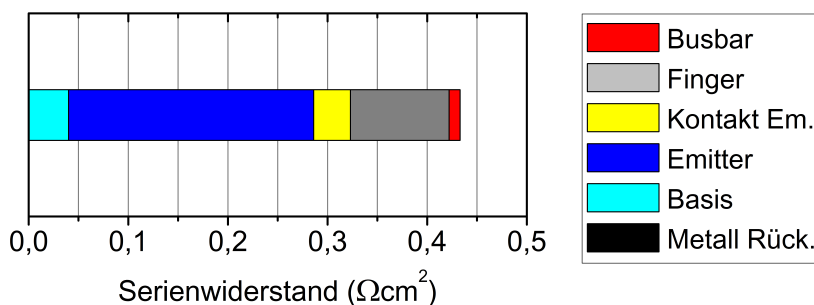
Komponente	$j_{\text{sc}}$ in ( $\text{mA/cm}^2$ )	$V_{\text{oc}}$ in (mV)	FF in (%)	$\eta$ in (%)
Referenz	37,63	638,7	79,78	19,17
Simulation	37,65	638,4	79,71	19,16

Minimale Abweichungen in der Kurzschlussstromdichte von  $0,02 \text{ mA/cm}^2$  und der offenen Klemmenspannung von  $0,3 \text{ mV}$  wurden ermittelt. Die Füllfaktordifferenz liegt bei  $0,07 \%_{\text{abs}}$ . Der Wirkungsgrad ist um  $0,01 \%_{\text{abs}}$  reduziert. Der aus der Simulation bestimmte Gesamtserienwiderstand der Zelle beträgt  $0,433 \Omega\text{cm}^2$ . In Tabelle 1.6 sind alle simulierten Beiträge des Serienwiderstands separat aufgeführt.

**Tabelle 1.6:** Serienwiderstandsbeiträge, die aus der Zweiodenmodell-Simulation ermittelt wurden.

Met. Rückseite ( $\mu\Omega\text{cm}^2$ )	Basis in ( $\Omega\text{cm}^2$ )	Emitter in ( $\Omega\text{cm}^2$ )	Kontakt Em. in ( $\Omega\text{cm}^2$ )	Finger in ( $\Omega\text{cm}^2$ )	Busbar in ( $\Omega\text{cm}^2$ )	Gesamt in ( $\Omega\text{cm}^2$ )
3,6	0,040	0,246	0,037	0,099	0,011	0,443

In Abbildung 1.15 sind die einzelnen Komponenten des Gesamtserienwiderstands grafisch dargestellt.



**Abb. 1.15:** Grafisch dargestellte Zusammensetzung des Gesamtserienwiderstands einer 3-Busbar-Solarzelle.

Den größten Beitrag zum Gesamtserienwiderstand liefert der Emitter mit 55 %. Der Beitrag der metallischen Rückseite ist so gering, dass er im Schaubild nicht sichtbar ist. Mit den Parametern aus der Referenzzelle ist es nun möglich, eine Multi-Busbar-Solarzelle zu beschreiben, da für das Zellkonzept ausschließlich die Verschaltung der Solarzelle ermittelt wird und das Zelldesign bis auf die Busbars erhalten bleibt.

## 1.5 Weitere Näherungen und Annahmen

Der Vollständigkeit halber und zur besseren Nachvollziehbarkeit der Simulation werden nun weitere getätigte Näherungen aufgelistet. Einige der Näherungen und Annahmen für die Simulation wurden bereits erläutert und werden deshalb nicht mehr aufgeführt:

- Der Emitterschichtwiderstand des selektiven Emitters wird gemittelt. Zur Bestimmung des gemittelten Schichtwiderstands werden beide Emitteranteile längenabhängig gemäß ihrer Flächenanteile addiert.
- Die Metallisierung der Vorderseite hat eine Abschattung von 100%. Hierdurch wird vernachlässigt, dass Licht, welches an der Metallisierung reflektiert wird, auf die Zelle treffen könnte.
- Der Querschnitt der Siebdruck-Metallisierung wird im Programm durch Gaussprofile erzeugt. Der gemessene Linienwiderstand eines Siebdruckfingers ist somit ein Mittelwert.

## 1.6 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die Grundlagen für das Verständnis des Aufbaus und der Herstellung einer Solarzelle dargelegt.

Der Herstellungsprozess von kristallinen Si-Solarzellen wurde veranschaulicht und es wurde dargestellt, wie Solarzellen in ein Modul integriert werden. Das Konzept der Multi-Busbar-Solarzelle wurde vorgestellt und die Unterschiede zu einer 3-Busbar-Solarzelle beschrieben. Besonders unter Verwendung einer hohen Anzahl von Drähten kann die Multi-Busbar-Solarzelle ihre effektive Fingerlänge stark reduzieren. Durch runde Drähte wird die effektive Abschattung der Multi-Busbar-Solarzelle verringert.

Das Zweiodiodenmodell, welches als Grundgerüst für das beschriebene Simulationsprogramm dient, wurde vorgestellt. Eine Erweiterung der Simulation für verschaltete Solarzellen unter Berücksichtigung weiterer Serienwiderstandskomponenten durch Ribbons oder Drähte wurde erläutert.

Weiterhin wurde auf Stärken und Schwächen des Zweiodiodenmodells eingegangen mit Augenmerk darauf, dass es sich um eine eindimensionale Simulation handelt. Ein Lösungsansatz für das Zweiodiodenmodell, der es ermöglicht, auf eine iterative Lösung der Gleichung zu verzichten, wurde vorgestellt. Die Zusammensetzung der Serienwiderstandsbeiträge einer Solarzelle und die Herleitung einzelner Komponenten sowie das Erlangen der benötigten Parameter über die Verwendung einer Referenz-Solarzelle wurden erläutert. Abschließend wurde darauf eingegangen, warum eine Referenz-Solarzelle für die Simulation benötigt wird und es wurde beschrieben, welche Parameter sich daraus für die Simulation ableiten lassen.



## 2 Simulation von Multi-Busbar- und 3-Busbar-Solarzellen

Das im vorherigen Kapitel beschriebene Simulationsprogramm wird nun zur Optimierung der 3-Busbar- und der Multi-Busbar-Solarzellen auf Zell- und Modulebene verwendet. Ausgehend von der 3-Busbar-Referenzzelle wird eine Optimierung von Drahtdurchmesser und -anzahl für die Multi-Busbar-Solarzelle auf Zell- und Modulebene durchgeführt.

Die Optimierung der verschalteten Zellrückseite wird separat für beide Zelldesigns getätigt. Hierbei wird auf die Variationen der Ribbon- und Drahtdicke, die Anzahl der Rückseitenpads, deren Geometrie und die Dicke der Al-Siebdruckschicht eingegangen.

Es werden alternative Techniken zur Vorderseiten- und Rückseitenmetallisierung evaluiert. Das Siebdruckverfahren wird mit dem Seed-and-Plate-Verfahren verglichen, um das Einsparpotential für die benötigte Metallmenge zur Vorderseitenmetallisierung darzustellen. Plattierte Vorderseitenmetallisierungen auf Silber- und Nickelbasis werden für beide Zellkonzepte evaluiert. Hierfür wird eine Optimierung der vollständig verschalteten Solarzellen durchgeführt, und die erhaltenen Ergebnisse werden miteinander verglichen.

### 2.1 Bestimmung der Diodenkennlinie einer Solarzelle

Zur Ermittlung der optimalen Anzahl von Drähten für eine Multi-Busbar-Solarzelle sollten vor der Simulation die Anfangsbedingungen für die Optimierung geklärt werden. Wie im vorherigen Kapitel schon angedeutet, ist die Messmethode zur Bestimmung der Zelleistung ausschlaggebend. Üblicherweise wird die Leistung einer 3-Busbar-Solarzelle unter folgenden Bedingungen bestimmt:

- Die Zelle liegt auf einer Metallplatte mit Temperaturregelung und Vakuumsaugung. Die Zelltemperatur wird konstant auf 25 °C gehalten. Die Spannung wird direkt an der Rückseite der Solarzelle abgegriffen.
- Die Busbars werden mit einer hohen Anzahl von Messspitzen auf der Vorderseite kontaktiert, um einen möglichst geringen Serienwiderstandsbeitrag der Busbars zu gewährleisten. Die Spannung wird direkt auf dem Busbar abgegriffen.
- Der Messaufbau erzeugt keine zusätzliche Abschattung auf der Zelloberfläche.

Durch diese Messmethode wird der Serienwiderstand der Solarzelle auf ein Minimum reduziert. Hierdurch wird zwar die maximale Zelleistung ermittelt, jedoch bilden die ermittelten Parameter nicht das Verhalten der Solarzelle im Modul ab.

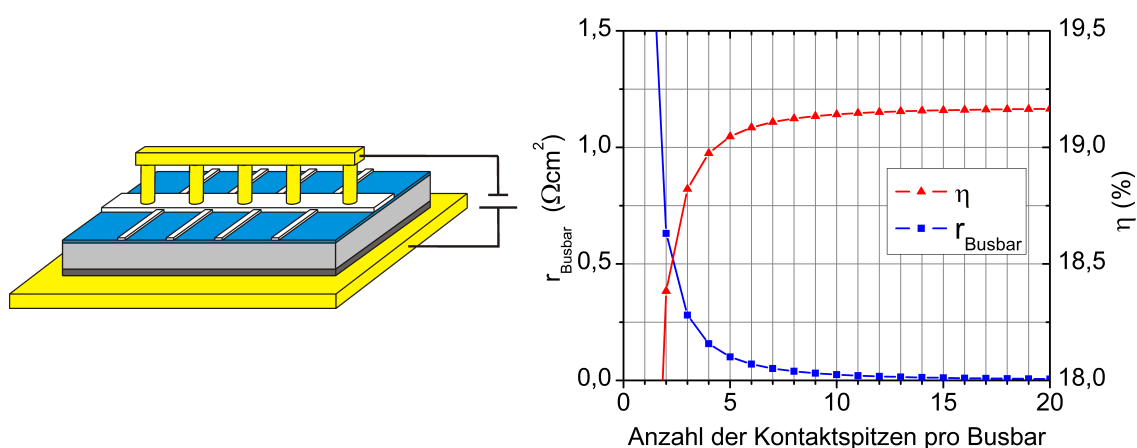
Diese Problematik könnte leicht umgangen werden, indem zusätzlich Serienwiderstände definierter Größe in Reihe zu der Solarzelle geschaltet und die Spannung hinter diesen Widerständen abgegriffen wird. Über die Güte des Lötprozesses und der

Verschaltung lässt sich auf Zellebene noch keine Aussage treffen.

Ein wichtiges Kriterium zum Vergleich von Simulationen von 3-Busbar-Solarzellen liegt in der Angabe der Anzahl der Kontaktpitzen. Sie kontaktieren den Busbar und haben maßgeblichen Einfluss auf den Serienwiderstandsbeitrag, da der gesamte generierte Strom über sie abfließt.

### 2.1.1 Analyse der Kontaktpitzenanzahl

Zum besseren Verständnis der Messmethodik befindet sich in Abbildung 2.1 auf der linken Seite der schematische Aufbau für die Messung einer 3-Busbar-Solarzelle. Im rechten Schaubild wird der Zusammenhang zwischen dem Serienwiderstandsbeitrag des Busbars (blau) und dessen Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Kontaktpitzenanzahl (rot) auf dem Busbar dargestellt. Die Berechnung wurde mithilfe des im vorherigen Kapitel beschriebenen Simulationsprogramms durchgeführt. Eine Erhöhung der Kontaktpitzenanzahl führt zu einer Absenkung des Serienwiderstands im Busbar. Deutlich ist zu erkennen, dass eine gewisse Anzahl von Kontaktpitzen nötig ist, um den Serienwiderstandsbeitrag möglichst gering zu halten. Ähnlich verhält es sich mit dem Wirkungsgrad der Solarzelle. Eine Erhöhung der Kontaktpitzenanzahl von zwei auf fünf ändert den Wirkungsgrad signifikant. Ab einer Kontaktpitzenanzahl von circa zehn geht die Kurve zunehmend in Sättigung. Die Veränderung im Serienwiderstand ist folglich vernachlässigbar. In den nachfolgenden Simulationen wird die Kontaktpitzenanzahl immer auf 15 Kontaktpitzen pro Busbar gesetzt, um einen möglichst hohen Wirkungsgrad zu simulieren und den Einfluss des Busbars gering zu halten.



**Abb. 2.1:** Links: Schematischer Messaufbau für die Bestimmung der Diodenkennlinie einer 3-Busbar-Solarzelle. Rechts: Abhängigkeit des Wirkungsgrads und des flächengewichteten Serienwiderstands des Busbars einer 6 Zoll 3-Busbar-Solarzelle unter Variation der Anzahl der Kontaktpitzen.

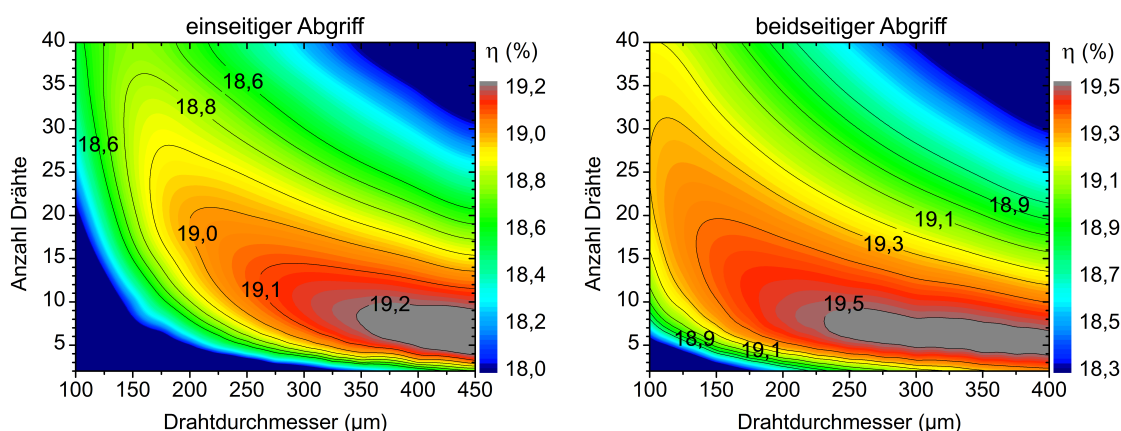
### 2.1.2 Optimierung der Drahtanzahl

Im Experiment kann der Strom einer Multi-Busbar-Solarzelle nicht direkt von der Vorderseite abgegriffen werden, ohne dabei zusätzliche Abschattung zu generieren. Jeder Finger müsste, in Abhängigkeit von der gewählten Drahtanzahl, mehrfach von Kontaktspitzen kontaktiert werden. Diese Messmethode würde allerdings, wie bei einem 3-Busbar-Messaufbau, die Zelleistung überbewerten. Deshalb muss für die Bestimmung der Diodenkennlinie einer Multi-Busbar-Solarzelle ein anderer Ansatz als bei der Messung einer 3-Busbar-Solarzelle gewählt werden.

In der Simulation wird der generierte Strom der Vorderseite über äquidistant verteilte, runde Drähte definierter Breite abgeleitet. Die Spannung wird an der Position gemessen, an der der Draht die Zellkante der Vorderseite erreicht. Dies würde im Realfall bedeuten, dass die Vorderseite der Multi-Busbar-Zelle mit Drähten verlötet werden müsste. Was für die Simulation kein großes Problem darstellt, ist in der Realität nicht leicht zu verwirklichen, da eine Solarzelle aus prozesstechnischen Gründen nicht einseitig verlötet werden sollte. Der einseitige Lötprozess würde zu einer starken Verbiegung der Solarzelle führen. Die weitere Prozessierung würde somit erheblich erschwert werden, da zusätzlich die verlöteten Drähte mitgeführt werden müssten. In Kapitel 4 werden deshalb unterschiedliche Aufbauten zur Messung der Diodenkennlinie einer Multi-Busbar-Solarzelle evaluiert.

Für die Simulation wird der Strom an der Zellkante für jeden Draht abgegriffen. Als zusätzlicher Parameter wird für die Simulation die Leitfähigkeit des Kupferdrahts und -ribbons benötigt. Sie wurde mit ca.  $50 \times 10^6$  S/m bestimmt und liegt damit 15 % unter der Leitfähigkeit von kristallinem Kupfer [78]. Es wird zusätzlich angenommen, dass die Solarzelle vollflächigen Kontakt auf der Rückseite besitzt.

In Abbildung 2.2 werden die Ergebnisse zweier möglicher Messmethoden zur Bestimmung des Wirkungsgrads einer Multi-Busbar-Solarzelle vorgestellt. Auf der x-Achse wird der Durchmesser der runden Kupferdrähte aufgetragen. Auf der y-Achse ist die Anzahl der Drähte abgebildet. Der Wirkungsgrad der Solarzelle ist farblich gekennzeichnet. Das linke Schaubild zeigt eine Simulation, bei der der Strom auf einer Seite der Zelle abgegriffen wird. Der maximal erreichbare Wirkungsgrad liegt bei 19,2 %. Der optimale Drahtdurchmesser liegt zwischen 350-450  $\mu\text{m}$ , bei einer Drahtanzahl von



**Abb. 2.2:** Simulation des optimalen Wirkungsgrads unter Variation der Drahtdicke und Drahtanzahl für eine Multi-Busbar-Solarzelle, die vollflächig auf der Rückseite kontaktiert ist. Der Strom wird links einseitig und rechts beidseitig von der Vorderseite abgegriffen.

4-9. Im rechten Schaubild wird der Strom von beiden Seiten abgegriffen. Hierdurch halbiert sich die effektive Länge des Drahts, der Serienwiderstandsbeitrag der Drähte sinkt und damit steigt der Wirkungsgrad der gemessenen Solarzelle. Er liegt  $0,3\%_{\text{abs}}$  über der einseitigen Messung bei  $19,5\%$ . Aus den Schaubildern wird erkenntlich, dass die optimale Drahtanzahl für solch eine Messung zwischen 4-9 Drähten liegt. Die Drahtdicke liegt bei  $230\text{-}450\ \mu\text{m}$ .

Das linke Schaubild zeigt eine realistischere Betrachtung der Zelleistung, da im verschalteten Zustand der Strom nur von einer Seite der Solarzelle abfließen kann.

Die Drähte im Modul werden von der Vorderseite auf die Rückseite der Nachbarzelle gelegt, um eine Reihenschaltung der Solarzellen zu ermöglichen. Beide Solarzellentypen zeigen aber, da sie vollflächigen Kontakt zur Rückseite haben, nicht die Zelleistung, die sie im Modul, also im vollständig verschalteten Zustand aufweisen würden.

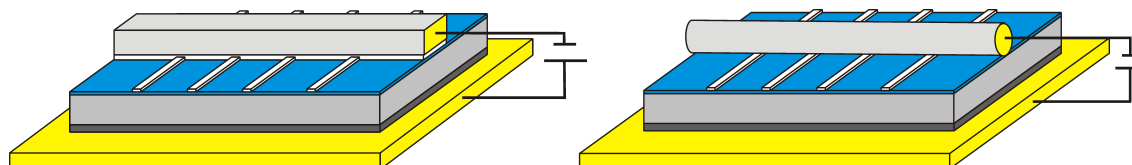
Ein direkter Vergleich von 3-Busbar- und Multi-Busbar-Design auf Zellebene stellt sich ebenfalls als kritisch heraus. Die 3-Busbar-Solarzelle hat durch die Messung mit einer Vielzahl von Kontaktspitzen auf den Busbars einen zu geringen Serienwiderstandsbeitrag der Vorderseite, wenn als Referenz der vollständig verschaltete Zustand angenommen wird. Die Simulation des einseitigen Stromabgriffs der Multi-Busbar-Solarzelle spiegelt hier einen deutlich realistischeren Fall wieder. Der Vergleich des maximalen Wirkungsgrads der drei Messmethoden zeigt, dass trotz der Vorderseitenverschaltung der Multi-Busbar-Solarzelle ein höherer Wirkungsgrad erzielt werden kann, wenn der Strom beidseitig abgegriffen wird. Die maximal erreichbaren Wirkungsgrade der drei Messmethoden sind in Tabelle 2.1 dargestellt.

**Tabelle 2.1:** Maximal erreichbarer Wirkungsgrad der drei Messmethoden für eine 3-Busbar- und eine Multi-Busbar-Solarzelle.

	3-Busbar	Multi-Busbar einseitig	Multi-Busbar beidseitig
$\eta_{\text{max}}$ in (%)	19,17	19,20	19,53

### 2.1.3 Simulation der Diodenkennlinie mit verschalteter Vorderseite

Sollen beide Zellkonzepte direkt verglichen werden, muss die 3-Busbar-Solarzelle mit Ribbons auf der Vorderseite simuliert werden. In Abbildung 2.3 sind beide Zelltypen mit verschalteter Vorderseite illustriert. Der Strom und die Spannung werden am Ende des Ribbons beziehungsweise der Drähte einseitig abgegriffen. Somit können nun

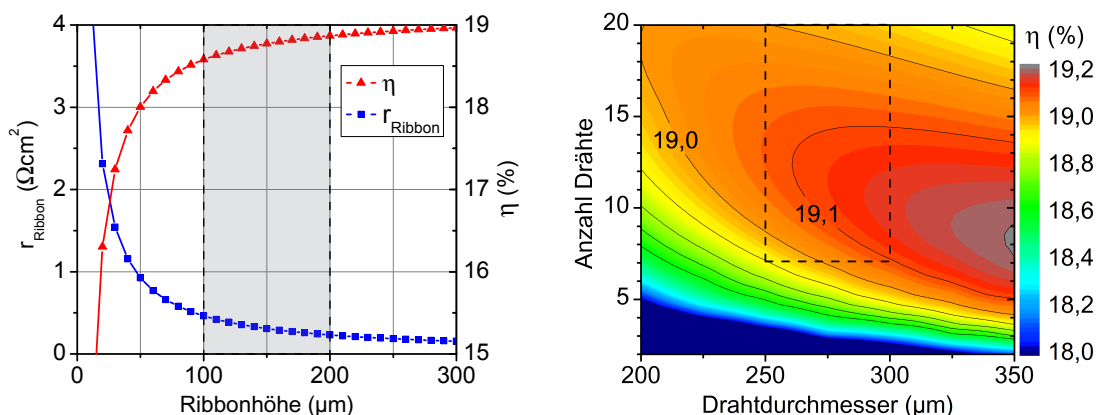


**Abb. 2.3:** Skizze einer verschalteten 3-Busbar-Solarzelle (links) und einer verschalteten Multi-Busbar-Solarzelle (rechts). Die Rückseite beider Zellen hat vollflächigen Kontakt zur Auflage, der Strom wird einseitig auf der Vorderseite abgegriffen.

beide Zelldesigns direkt miteinander verglichen werden. Da die Ribbonbreite nicht variiert werden sollte, um zusätzliche Abschattung auf der Vorderseite der Solarzelle zu vermeiden, kann ausschließlich die Höhe des Ribbons variiert werden. Durch die Vergrößerung der Ribbonhöhe der 3-Busbar-Solarzelle wird der Gesamtserienwiderstand des Systems verringert. Dies führt zu einer Erhöhung des Wirkungsgrads. Anschaulich ist dies in Abbildung 2.4 links dargestellt. Der Wirkungsgrad der 3-Busbar-Solarzelle (rot) geht in Sättigung, wenn der Serienwiderstandsbeitrag des Ribbons (blau) vernachlässigbar klein wird. Das rechte Schaubild zeigt einen vergrößerten Ausschnitt aus Abbildung 2.2 links. In Abbildung 2.4 sind in beiden Schaubildern definierte Bereiche durch gestrichelte Linien abgetrennt. Diese Flächen zeigen das für die Modulherstellung relevante Prozessfenster auf. Bei der Verschaltung einer 3-Busbar-Solarzelle ist darauf zu achten, dass die Dimension des Ribbons nicht zu groß ausfällt, da durch mangelnde Biegsamkeit des Ribbons Probleme bei der Verschaltung auftreten können. Es können während des Laminationsprozesses die Kantenbereiche der Solarzelle durch die fehlende Biegsamkeit der Ribbons einreißen oder sogar abbrechen. In gleicher Weise gilt dies für die Multi-Busbar-Solarzelle. Durch zu groß gewählte Drahtdurchmesser oder eine erhöhte Drahtanzahl können ähnliche Phänomene auftreten. Eine möglicher Ansatz zur Verwendung von dicken Ribbons oder Drähten könnte ein zusätzlicher Biegeschnitt der Ribbons oder Drähte bieten. Durch vorgebogene Drähte oder Ribbons müssten die Kantenbereiche der Zellen beim Verschaltungsprozess nicht mehr belastet werden. Dies ist jedoch prozesstechnisch schwer zu verwirklichen.

Für die 3-Busbar-Solarzelle ergibt sich damit eine maximale Ribbonhöhe von 200  $\mu\text{m}$ . Der maximale Drahtdurchmesser der Multi-Busbar-Solarzelle wird auf 300  $\mu\text{m}$  beschränkt. Die Angabe der maximalen Ribbonhöhe und des Drahtdurchmessers sind Erfahrungswerte. In einem Experiment mit 350  $\mu\text{m}$  dicken Drähten konnte das Brechen der Solarzelle beim Lötprozess beobachtet werden. Es scheint jedoch denkbar, dass eine Optimierung des Löt- und Laminationsprozesses die Nutzung von Ribbons oder Drähten mit größerem Querschnitt ermöglichen kann.

Eine Abschätzung des Ribbonquerschnitts nach unten ist für die 3-Busbar-Solarzelle unnützlich. Eine Erhöhung des Ribbons bei gleichbleibender Breite führt stets zu einem

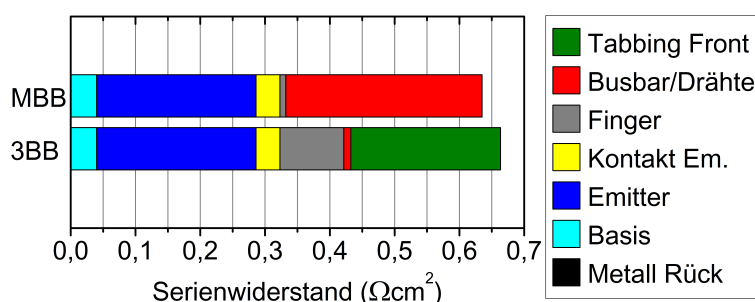


**Abb. 2.4:** Wirkungsgrad von Solarzellen, die auf der Vorderseite einseitig verschaltet sind. Links: Wirkungsgrad und Serienwiderstandsbeitrag des Ribbons aufgetragen über die Ribbonhöhe für eine 3-Busbar-Solarzelle. Mit zunehmender Ribbonhöhe steigt der Wirkungsgrad. Rechts: Wirkungsgradveränderung bei Variation von Drahtanzahl und -durchmesser für eine Multi-Busbar-Solarzelle.

Wirkungsgradgewinn, da der Gesamtserienwiderstand gesenkt und die Abschattung nicht beeinflusst wird.

Für die Multi-Busbar-Solarzelle muss die Anzahl der Drähte an den Drahtdurchmesser angepasst werden. Ein Bereich zwischen 7-20 Drähten erscheint bei Betrachtung von Abbildung 2.4 sinnvoll. Hier sei anzumerken, dass sich die Drahtanzahl im Modul erhöhen wird, da durch den zusätzlichen Serienwiderstandsbeitrag der Rückseite eine Erhöhung der Drahtanzahl den Gesamtserienwiderstand wieder verringern kann.

Für beide Zelldesigns sind die einzelnen Komponenten des Gesamtserienwiderstands in Abbildung 2.5 zusammengefasst. Die maximale Ribbonhöhe der 3-Busbar-Solarzelle (3BB) wurde auf 200  $\mu\text{m}$  festgelegt. Für die Multi-Busbar-Zelle (MBB) liegt die maximale Drahtdicke bei 300  $\mu\text{m}$ , die Drahtanzahl beträgt 10. Der Beitrag der Rückseite ist so gering, dass er im Schaubild nicht zu erkennen ist.



**Abb. 2.5:** Serienwiderstandsbeiträge beider Zelltypen (MBB = Multi-Busbar, 3BB = 3-Busbar) für den Fall, dass die Rückseite vollflächig kontaktiert ist und der Strom auf der Vorderseite einseitig abgegriffen wird. Die optimierte Drahtanzahl beträgt zehn, der Durchmesser liegt bei 300  $\mu\text{m}$ . Die optimale Höhe des Ribbons beträgt 200  $\mu\text{m}$ . Die Breite der Ribbons beträgt 1,5 mm.

Eine Betrachtung des Serienwiderstandsbeitrags des Fingers zeigt eine deutliche Abweichung zwischen beiden Zelldesigns. Der Fingerbeitrag für die Multi-Busbar-Zelle fällt deutlich geringer aus, da die Fingerlänge durch die 10 Drähte auf 7,7 mm verringert wurde. Die Fingerlänge der 3-Busbar-Solarzelle liegt hingegen bei 24,9 mm. Der Serienwiderstandsbeitrag der Drähte liegt bei 0,303  $\Omega\text{cm}^2$  und ist damit höher als der von Busbar und Ribbon (0,242  $\Omega\text{cm}^2$ ) zusammen. Die Kurzschlussstromdichte der Multi-Busbar-Solarzelle liegt mit 38,15  $\text{mA/cm}^2$  um 0,5  $\text{mA/cm}^2$  höher als die Kurzschlussstromdichte der 3-Busbar-Solarzelle mit 37,63  $\text{mA/cm}^2$ . Die Werte für den Gesamtserienwiderstand mit maximalem Wirkungsgrad sind in Tabelle 2.2 abgebildet. Die Beiträge für die Rückseite, die Basis, den Emitter und den Kontaktwiderstand des

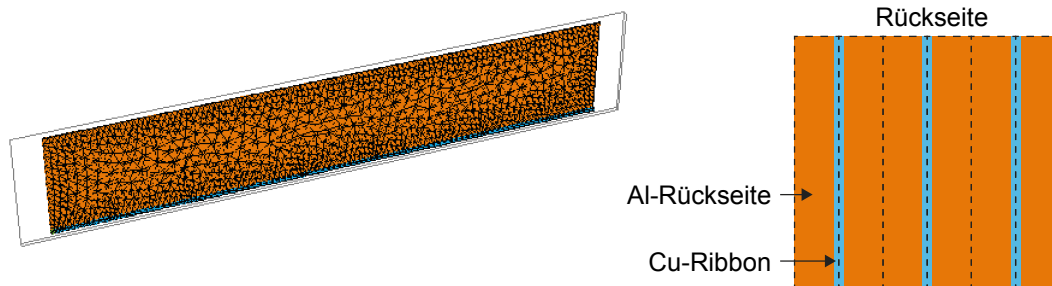
**Tabelle 2.2:** Einzelne Beiträge des flächengewichteten Gesamtserienwiderstands mit dem maximal zu erreichenden Wirkungsgrad der Solarzellen.

Zelltyp	Finger in ( $\Omega\text{cm}^2$ )	Draht/Busbar in ( $\Omega\text{cm}^2$ )	Tabbing in ( $\Omega\text{cm}^2$ )	Gesamt in ( $\Omega\text{cm}^2$ )	$\eta$ in (%)
Multi-Busbar	0,009	0,303	-	0,635	19,15
3-Busbar	0,099	0,011	0,231	0,664	18,87

Emitters werden hier nicht zusätzlich aufgeführt. Sie sind in Tabelle 1.6 aufgelistet und haben sich, da das gleiche Zelldesign verwendet wurde, nicht verändert. Insgesamt kann durch die Optimierung der Drahtdicke und Variation der Drahtanzahl für die einseitige Messung der Diodenkennlinie ein Wirkungsgradgewinn von 0,28 % für die Multi-Busbar-Solarzelle erzielt werden.

## 2.2 Optimierung des Rückseitendesigns

Für die Bestimmung des Serienwiderstandsbeitrags einer verschalteten Rückseite wurde mit dem Programm FlexPDE 6 ein dreidimensionales Knotennetz erstellt. Die Software verwendet die Finite-Elemente Methode. Hierfür wird im vordefinierten Volumen ein Knotennetz, auch Grid genannt, erzeugt. In Abbildung 2.6 links ist solch ein dreidimensionales Knotennetz zu sehen. Auf der rechten Seite ist die Al-Rückseite einer 3-Busbar-Solarzelle (orange) mit drei Ribbons (blau) dargestellt.



**Abb. 2.6:** Links: Dreidimensionales Knotennetz zur Berechnung des Serienwiderstandsbeitrags der verschalteten Rückseite für eine 3-Busbar-Solarzelle mit drei AgAl-Pads. Rechts: Al-Rückseite (orange) einer verschalteten 3-Busbar-Solarzelle mit Ribbons (blau).

Hierbei handelt es sich um die Einheitszelle der Rückseite einer 3-Busbar-Solarzelle. In Orange ist die Al-Siebdruckrückseite sichtbar und am unteren Bildrand ist in Blau das Cu-Ribbon dargestellt. In Schwarz ist das generierte Knotennetz erkennbar, das sich aus einer Vielzahl von Tetraedern verschiedener Größe zusammensetzt. Für jeden Knoten wird anschließend mithilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) die aufgestellte partielle Differentialgleichung gelöst [79]. Mithilfe der Ladungserhaltung folgt im Gleichgewichtszustand für die Stromdichte  $\vec{j}$ :

$$\nabla \vec{j} = 0. \quad (2.1)$$

Das ohmsche Gesetz besagt für die lokale Betrachtung:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}. \quad (2.2)$$

Die elektrische Feldstärke  $\vec{E}$  entspricht dem negativen Gradienten des Potentials  $\Phi$ . Hierbei ist  $\sigma$  die Leitfähigkeit.

$$\vec{E} = -\nabla\Phi. \quad (2.3)$$

Setzt man diese Gleichungen ineinander ein, so ergibt sich die für die Simulation verwendete Differentialgleichung:

$$\nabla(-\sigma \nabla\Phi) = 0. \quad (2.4)$$

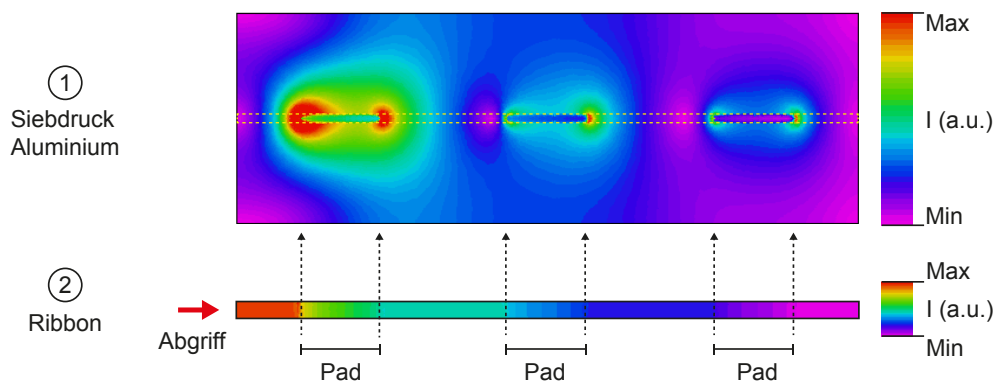
Für die Randbereiche des Volumens wurden folgende Bedingungen aufgestellt:

$$\begin{aligned}
 \Phi &= \Phi_K && \text{für die Fläche am Abgriff} \\
 \sigma \vec{n} \nabla \Phi &= j && \text{für die Grenzfläche zum Volumen der Solarzelle} \\
 \vec{n} \nabla \Phi &= 0 && \text{für alle restlichen Außenflächen}
 \end{aligned}$$

$\sigma$  ist die Leitfähigkeit,  $\Phi_K$  ist ein konstanter Wert und  $\vec{n}$  ist der Normalenvektor. Der maximal erlaubte relative Fehler für die Simulation wurde mit  $2 \times 10^{-4}$  festgelegt. Das maximal erlaubte Aspektverhältnis der Polygone wurde auf 10 gesetzt. Für die Simulation wurde angenommen, dass der generierte Strom nur über die AgAl-Pads in das Cu-Ribbon fließen kann. Zusätzlich wurde der Kontaktwiderstand zwischen Pad und Ribbon vernachlässigt.

Repräsentativ für die getätigten Simulationen zeigt Abbildung 2.7 eine zweidimensionale Projektion des Stromverlaufs auf der Rückseite einer 3-Busbar-Solarzelle. Das obere Schaubild zeigt zwei zusammengesetzte Einheitszellen. Der generierte Strom fließt durch die Al-Schicht in Richtung Pads. Bild 1 wird mit Bild 2 kombiniert, um den gesamten Stromverlauf zu betrachten. Bild 2 repräsentiert den Stromverlauf im Cu-Ribbon und wurde aus Anschauungsgründen verbreitert. In Bild 1 ist in gelb gestrichelter Umrandung die ursprüngliche Position und Dimension des Ribbons abgebildet. Der generierte Strom wird auf der linken Seite des Ribbons abgegriffen (roter Pfeil in Bild 2). Es zeigt sich in Bild 2, dass der Strom zwischen den Padbereichen konstant ist, da die Anfangsbedingung lautet, dass Strom nur über die Pads in das Ribbon abgeführt werden kann. Der Stromfluss im Siebdruckvolumen zeigt deutliche Abweichungen zwischen den drei Padbereichen. Ein Teil des generierten Stroms fließt nicht direkt auf das naheliegendste Pad zu, sondern wählt das benachbarte Pad. Dieser Effekt verstärkt sich zum Abgriffspunkt hin.

Anhand des Schaubilds wird ersichtlich, dass eine eindimensionale Betrachtung des Problems den Gesamtwiderstand überschätzen würde, insbesondere dann, wenn der Linienwiderstand des Cu-Ribbons groß ausfällt.



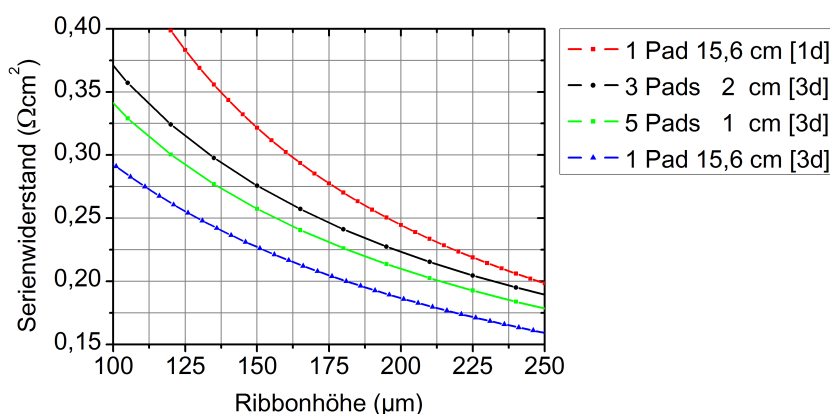
**Abb. 2.7:** Zweidimensionale Projektion des Stromverlaufs der Rückseite (doppelte Einheitszelle). 1. Stromfluss in der Al-Rückseite. 2. Stromfluss im Ribbon (Bild wurde aus Darstellungsgründen verbreitert). Die Position der Pads ist durch gestrichelte schwarze Linien veranschaulicht. In Bild 1 ist durch gelb gestrichelte Linien die Dimension und Position des Ribbons gekennzeichnet.

### 2.2.1 Untersuchung des Serienwiderstands einer verschalteten 3-Busbar-Solarzellenrückseite

Im Schaubild 2.8 werden die eindimensionale Simulation und die dreidimensionale Simulation dargestellt, um die Abweichungen zwischen den zwei Berechnungen zu veranschaulichen. Für die Simulation werden die in Kapitel 1.4 genannten Parameter verwendet. Die Schichtdicke der Al-Rückseite beträgt  $30\ \mu\text{m}$ . Hieraus ergibt sich ein Schichtwiderstand von  $6\ \text{m}\Omega/\text{sq}$ . Für eine 3-Busbar-Solarzelle wird der Serienwiderstandsbeitrag der verschalteten Rückseite über die Höhe des Ribbons aufgetragen. Das Pad ist  $156\ \text{mm}$  lang und  $1,5\ \text{mm}$  breit. Das Ribbon hat vollflächigen Kontakt zum Pad. Die eindimensionale Simulation nach Tabelle 1.3 ist in Rot abgebildet, die dreidimensionale Simulation in Blau. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Differenz zwischen den beiden Serienwiderständen mit abnehmender Ribbonhöhe ansteigt. Der direkte Vergleich beider Simulationen führt zu folgendem Ergebnis: Für den aufgetragenen Bereich liegt die Differenz bei einer Ribbonhöhe von  $250\ \mu\text{m}$  bei 25 %, bei  $200\ \mu\text{m}$  werden 31 % erreicht, bei  $150\ \mu\text{m}$  sind es bereits 42 %. Nicht mehr sichtbar sind die Bereiche  $100\ \mu\text{m}$  mit 63 % und  $50\ \mu\text{m}$  mit über 120 %. Dies bedeutet, dass besonders bei kleinen Ribbondurchmessern die mehrdimensionalen Effekte nicht mehr zu vernachlässigen sind.

Des Weiteren ist in dem Schaubild die Veränderung des Serienwiderstands durch die Variation der Padanzahl und -geometrie zu erkennen. Die schwarze Kurve beschreibt eine Geometrie mit drei AgAl-Pads der Breite  $1,5\ \text{mm}$  und der Länge  $2\ \text{cm}$ . Bei der grünen Kurve wurde die Padanzahl auf fünf erhöht und die Größe auf  $1,5\ \text{mm} \times 1\ \text{cm}$  reduziert. Die Pads sind äquidistant auf der Rückseite verteilt. Eine Abnahme des Serienwiderstands bei Erhöhung der Padanzahl ist sichtbar. Den niedrigsten Serienwiderstandsbeitrag besitzt das durchgehende Pad mit einer Größe von  $1,5\ \text{mm} \times 156\ \text{cm}$ .

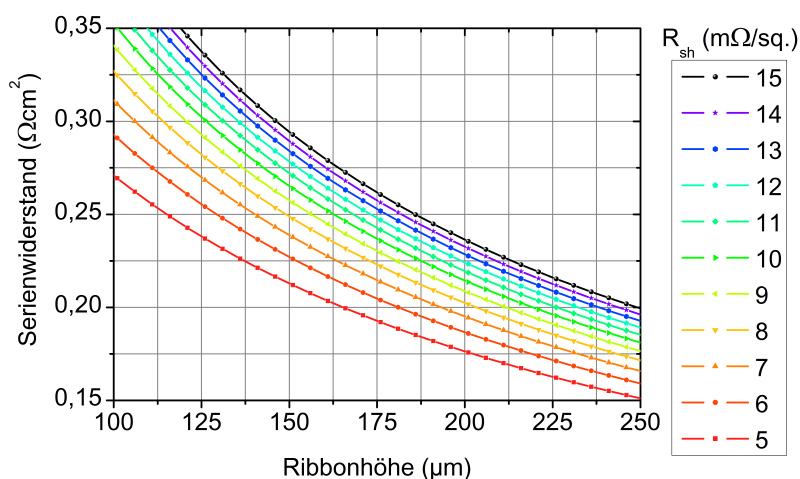
Nicht mit in die Betrachtung eingeflossen ist die Tatsache, dass die totale Padfläche zusätzlich eine Auswirkung auf die Gesamtspannung der Solarzelle hat, da die Padbereiche schlechtere Oberflächenpassivierungseigenschaften besitzen als die Bereiche, die mit Aluminiumpaste bedruckt werden. Dies liegt an der Zusammensetzung der Paste, da sich ein BSF durch den hohen Silberanteil von  $95\text{-}99\%_{\text{Gew}}$  praktisch



**Abb. 2.8:** Serienwiderstandsbeitrag einer verschalteten Al-Rückseite mit Schichtwiderstand  $6\ \text{m}\Omega/\text{sq}$  für eine 3-Busbar-Solarzelle mit unterschiedlichen Padgeometrien. In eckigen Klammern ist die Dimension der Simulation dargestellt

nicht ausbilden kann und es damit zu erhöhter Rekombination in diesem Bereich kommt [80]. Andererseits garantiert der hohe Silberanteil der Paste die Lötbarkeit der Padstruktur. Den größten Flächenanteil besitzt das durchgehende Pad mit einer Rückseitenbedeckung von 2,89 %. Die Struktur mit drei Pads pro Ribbon hat eine Bedeckung von 1,11 %. Mit fünf Rückseitenpads werden 0,93 % der Rückseitenfläche bedeckt. Im Schaubild ist zu erkennen, dass eine hohe Anzahl von kleindimensionierten Pads geringere Serienwiderstände zeigt und damit durch die geringere Padfläche den Spannungsverlust reduziert.

Nachdem die Padanzahl variiert wurde, soll nun der Einfluss der Al-Schichtdicke auf den Serienwiderstand untersucht werden. Hierfür wurde der Schichtwiderstand von  $5 \text{ m}\Omega/\text{sq}$  bis  $15 \text{ m}\Omega/\text{sq}$  variiert. Eine Schichtdicke von  $30 \mu\text{m}$  entspricht einem Schichtwiderstand von  $6 \text{ m}\Omega/\text{sq}$ . Bei einer Schichtdicke von ca.  $12 \mu\text{m}$  beträgt der Schichtwiderstand  $15 \text{ m}\Omega/\text{sq}$ . Es befindet sich ein durchgehendes Pad der Größe  $156 \text{ mm} \times 1,5 \text{ mm}$  auf der Rückseite. Der flächengewichtete Serienwiderstand der verschalteten Rückseite wird über die Höhe des Cu-Ribbons aufgetragen und in Abbildung 2.9 dargestellt. Durch eine Erhöhung der Al-Schichtdicke wird der Gesamtserienwiderstand der Rückseite bei gegebener Ribbonhöhe abgesenkt. Eine Analyse von Abbildung 2.9 zeigt, dass der limitierende Faktor für einen niedrigen Serienwiderstandsbeitrag der Rückseite eher in der Abmessung des Ribbons liegt. Wird als Ausgangspunkt in Schaubild 2.9 die Ribbonhöhe  $175 \mu\text{m}$  mit dem Schichtwiderstand  $5 \text{ m}\Omega/\text{sq}$  gewählt und der Schichtwiderstand um den Faktor drei vergrößert, zeigt sich, dass eine Erhöhung des Serienwiderstandsbeitrags von ca. 36 % eintritt. Wenn in Abbildung 2.9, ausgehend von einer Ribbonhöhe von  $250 \mu\text{m}$ , diese halbiert wird, ergibt sich eine Änderung über 50 %. Eine Änderung um den Faktor drei bewirkt eine Differenz von fast 90 %.



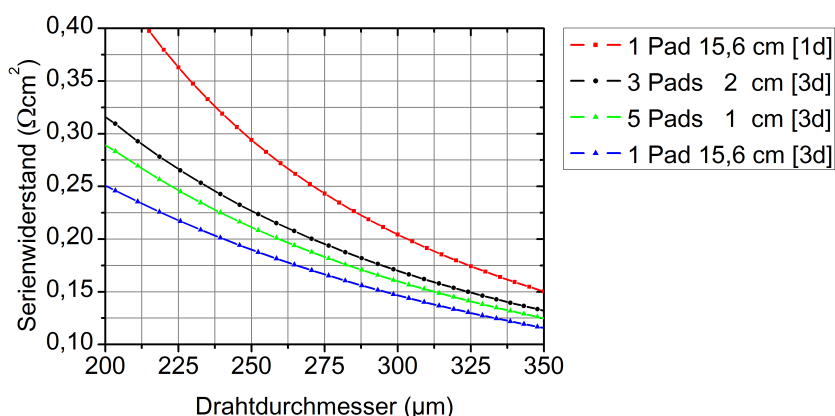
**Abb. 2.9:** Simulation des Rückseitenwiderstandsbeitrags bei Variation des Schichtwiderstands der Al-Rückseite und der Ribbonhöhe für eine 3-Busbar-Solarzelle mit durchgehendem Pad.

Zusammenfassend kann für das 3-Busbar-Zelldesign festgehalten werden, dass zum Erreichen eines niedrigen Serienwiderstandsbeitrags, bei möglichst hoher Zellspannung der verschalteten Rückseite, eine möglichst große Anzahl kleiner Pads, eine ausreichend leitfähige Al-Schicht und ein großer Ribbonquerschnitt benötigt wird. Ein großflächiges Pad erzielt zwar den geringsten Serienwiderstand, jedoch würde durch die große Padfläche die generierte Stromdichte und die Zellspannung der Solarzelle stark abgesenkt werden [81].

### 2.2.2 Untersuchung des Serienwiderstands einer verschalteten Multi-Busbar-Solarzellenrückseite

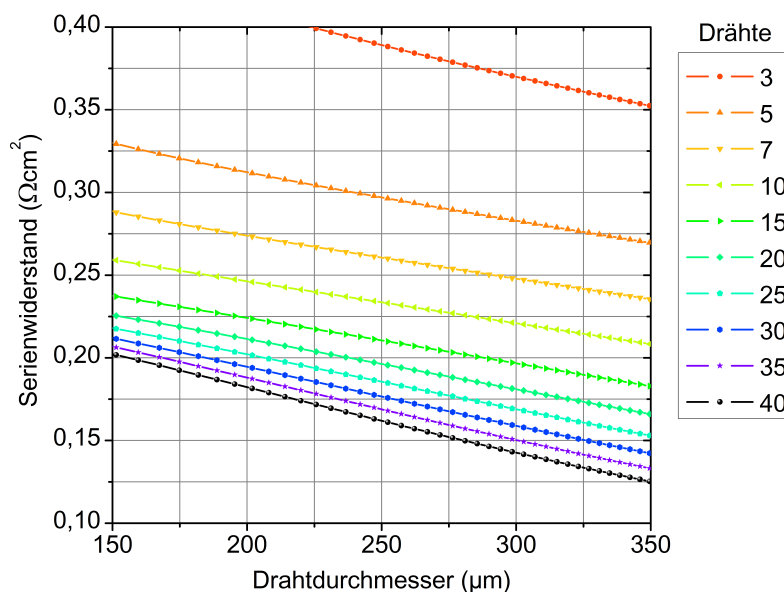
Die durchgeführten Untersuchungen aus Kapitel 2.2.1 sollen in gleicher Weise für das Multi-Busbar-Zelldesign durchgeführt werden. Repräsentativ hierfür wird eine Solarzelle mit 15 Drähten untersucht. Wie bei der 3-Busbar-Solarzelle soll zusätzlich demonstriert werden, dass eine eindimensionale Simulation den Serienwiderstandsbeitrag zu hoch berechnet.

In Abbildung 2.10 wird der Serienwiderstandsbeitrag der verschalteten Rückseite wie bei der 3-Busbar-Solarzelle über den Drahtdurchmesser für eine Verschaltung mit drei Pads, fünf Pads und einem durchgängigen Pad dargestellt. Die Padbreite wurde auf  $500\ \mu\text{m}$  reduziert, die Länge bleibt unverändert. Zusätzlich ist die eindimensionale Simulation in Rot für ein durchgängiges Pad aufgeführt. Es ergibt sich ein ähnlicher Verlauf wie in Abbildung 2.8. Mit sinkendem Drahtdurchmesser steigt der Serienwiderstand an. Die eindimensionale Simulation überschätzt den Serienwiderstandsbeitrag aus den selben Gründen wie oben bereits erläutert. Für die unterschiedlichen Padgeometrien ergibt sich das gleiche Bild. Bei Erhöhung der Padanzahl wird der Gesamtwiderstand der verschalteten Rückseite reduziert. Ein Vergleich des Serienwiderstands im relevanten Bereich (MBB:  $250\text{-}300\ \mu\text{m}$ , 3BB:  $150\text{-}200\ \mu\text{m}$ ) zeigt, dass der Gesamtserienwiderstand für die Multi-Busbar-Solarzelle geringer ausfällt. Für ein durchgängiges Pad wird ein Bereich von  $0,15\text{-}0,19\ \Omega\text{cm}^2$  ermittelt, der vergleichbare Widerstand der 3-Busbar-Solarzelle liegt mit  $0,18\text{-}0,29\ \Omega\text{cm}^2$  etwas höher.



**Abb. 2.10:** Serienwiderstandsbeitrag einer verschalteten Al-Rückseite mit Schichtwiderstand  $6\ \text{m}\Omega/\text{sq}$  für eine Multi-Busbar-Solarzelle mit 15 Drähten für unterschiedliche Padgeometrien bei Variation des Drahtdurchmessers. In eckigen Klammern ist die Dimension der Simulation dargestellt.

Da die Anzahl der Drähte variiert werden kann, wird in Schaubild 2.11 gezeigt, dass eine Vielzahl von Drahtkombinationen zu einem geringen Serienwiderstand führen kann. Zu bemerken ist hier, dass der Schichtwiderstand der Al-Rückseite auf  $10 \text{ m}\Omega/\text{sq}$  erhöht wurde, um eine eher dünne Al-Schicht zu simulieren. Sowohl mit einer hohen Anzahl dünner Drähte als auch mit einer vergleichsweise geringeren Anzahl dickerer Drähte werden Widerstandswerte erreicht, die unterhalb derer einer 3-Busbar-Solarzelle liegen.



**Abb. 2.11:** Simulation des Rückseitenwiderstandsbeitrags bei Variation von Drahtdurchmesser und Drahtanzahl für eine siebgedruckte Al-Rückseite mit durchgehendem Pad und einem Schichtwiderstand von  $10 \text{ m}\Omega/\text{sq}$

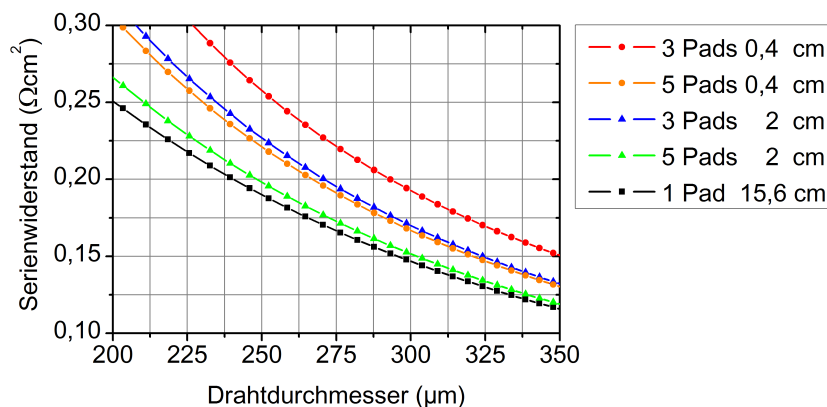
Wird der maximal tolerierbare Widerstand auf  $0,2 \text{ }\Omega\text{cm}^2$  gesetzt, kann dieser mit 40 dünnen Drähten mit  $150 \text{ }\mu\text{m}$  oder mit 15 jeweils  $300 \text{ }\mu\text{m}$  breiten Drähten erreicht werden. Entscheidend sind lediglich die Prozesstechnik sowie die mit AgAl-Pads metallisierte Rückseitenfläche, da ein zu hoher Strom- und Spannungsverlust, der durch die Pads hervorgerufen wird, vermieden werden sollte.

Wie bereits erwähnt hat die Fläche der AgAl-Pads einen Einfluss auf die Betriebsspannung und den generierten Strom der Solarzelle. Ob sie einen Einfluss auf den Serienwiderstand hat, wurde durch eine Variation des Flächeninhalts der Pads untersucht. Es wurde eine Drahtanzahl von 15 und ein Al-Schichtwiderstand von  $6 \text{ m}\Omega/\text{sq}$  gewählt. Zusätzlich wurde eine Variation der Padanzahl und der Padfläche durchgeführt. In Abbildung 2.12 sind die Ergebnisse der Simulation abgebildet. In Rot und Orange ist die Verschaltung mit den  $0,4 \text{ cm}$  langen Pads, in Blau und in Grün die Verschaltung mit den  $2 \text{ cm}$  langen Pads dargestellt. In Schwarz ist die Verschaltung mit dem niedrigsten Serienwiderstand, die ein durchgehendes Pad besitzt, abgebildet. Eine Verlängerung der Pads senkt den Gesamtwiderstand der verschalteten Rückseite. Hierbei erzielen drei Pads mit  $2 \text{ cm}$  Länge einen ähnliche Widerstandsbeitrag wie fünf Pads mit  $0,4 \text{ cm}$  Länge. Wird die Länge der Pads von  $2 \text{ cm}$  auf  $0,4 \text{ cm}$  reduziert, beträgt die Fläche der AgAl-Pads bei einer Padbreite von  $500 \text{ }\mu\text{m}$  bezogen auf die Gesamtfläche

der Rückseite bei drei Pads 0,4 % und bei fünf Pads 0,6 %.

Eine Untersuchung des Einflusses der Padbreite auf den Serienwiderstand ergab, dass eine Verringerung der Padbreite von 500  $\mu\text{m}$  auf 250  $\mu\text{m}$  praktisch keinen Einfluss auf den Serienwiderstand hat. Für ein Rückseitendesign mit drei Pads pro Draht konnte, bei einem Drahtdurchmesser von 200  $\mu\text{m}$ , eine Erhöhung des Serienwiderstands um 1,5  $\text{m}\Omega\text{cm}^2$  festgestellt werden. Dies entspricht einer Erhöhung um 0,43% und ist damit nahezu vernachlässigbar. Die Rekombination an der Rückseite könnte durch eine Verschmälerung der AgAl-Pads jedoch reduziert werden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden diese Graphen in Abbildung 2.12 nicht zusätzlich mit in das Schaubild integriert.

Zusammenfassend kann auch hier vermerkt werden, dass für einen geringen Serienwiderstandsbeitrag der Rückseite möglichst viele kleine Pads benötigt werden. Da die Breite der Pads kaum einen Einfluss auf den Serienwiderstand hat, sollte sie möglichst schmal gewählt werden, um die Gesamtpadfläche zu reduzieren. Eine Vielzahl von Drahtkombinationen führt zu geringen Serienwiderständen.



**Abb. 2.12:** Variation der Padfläche und -anzahl für eine Multi-Busbar-Solarzelle mit 15 Drähten und einem Al-Schichtwiderstand von 6  $\text{m}\Omega/\text{sq}$ . Die Größe der Rückseitenpads beeinflusst den Serienwiderstand deutlich.

## 2.3 Optimierung des Wirkungsgrads

Die im letzten Kapitel gewonnenen Erkenntnisse über die Serienwiderstandskomponenten der verschalteten Rückseite wurden, wie oben beschrieben, in das Zweidiodenmodell-Simulationsprogramm übertragen.

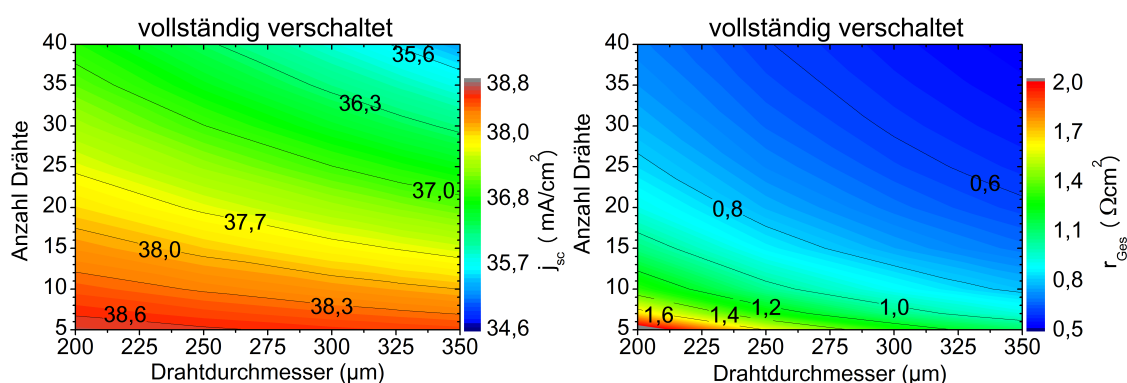
Im nächsten Schritt kann die vollständig verschaltete Solarzelle simuliert werden. Die Solarzelle ist auf der Vorder- und Rückseite, je nach Zelltyp, mit Kupferbändern oder Drähten verlötet. Mithilfe des Simulationsprogramms wird eine Variation der Drahtdicke in Abhängigkeit von der Drahtanzahl durchgeführt. Solarzellen sind im Modul nicht direkt nebeneinander angeordnet, da die Verbindungsdrähte beziehungsweise -ribbons von der Vorder- auf die Rückseite der benachbarten Zelle geführt werden. In der Simulation wird deshalb ein Abstand von 2 mm zwischen den Solarzellen angenommen. Die Diodenparameter der Referenzzelle aus Kapitel 1.4 werden verwendet, um beide Zelltypen mit Siebdruck-Vorderseitenmetallisierung zu simulieren. Mögliche

Absorptions- oder Reflexionseffekte des Modulglases, der EVA-Folie und der Rückseitenfolie werden vernachlässigt. Der Lichteinfall beschränkt sich auf die Zellfläche.

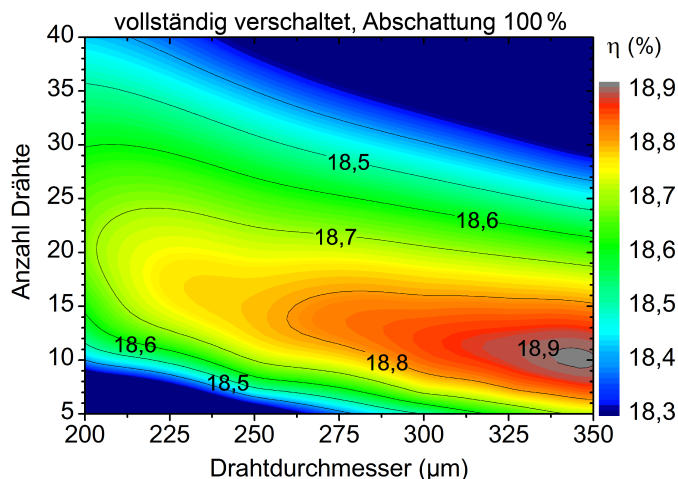
In Abbildung 2.13 sind sowohl die Kurzschlussstromdichte  $j_{sc}$  (links) als auch der flächengewichtete Gesamtserienwiderstand  $r_{Ges}$  (rechts), bei Variation der Drahtanzahl und der Drahtdicke, dargestellt. Das linke Schaubild zeigt, dass die Kurzschlussstromdichte mit zunehmender Drahtanzahl und -dicke abnimmt. Dies lässt sich damit erklären, dass eine höhere Drahtanzahl oder -dicke zu einer erhöhten Abschattung und damit zu einer Verringerung des generierten Stroms führt. Ähnlich hierzu verhält sich der Gesamtserienwiderstand der Solarzelle, der im rechten Schaubild dargestellt ist. Bei Vergrößerung des Drahtdurchmessers und der Drahtanzahl sinkt der Widerstand, da die gesamte Drahtquerschnittsfläche steigt. Zur Optimierung des Wirkungsgrads werden in der Simulation beide Parameter variiert. Eine hohe Abschattung führt zu einem geringen Serienwiderstand. Ein hoher Serienwiderstand führt zu hohen Strömen durch eine geringe Abschattung.

Der Wirkungsgrad des Gesamtsystems ist in Abbildung 2.14 zu sehen. Die Abhängigkeit der Drahtanzahl ist über den Drahtdurchmesser aufgetragen. Das Optimum des Wirkungsgrads wird bei einem hohen Drahtdurchmesser von 340-350  $\mu\text{m}$  und einer Drahtanzahl von 9-11 erreicht. Der maximal erreichbare Wirkungsgrad liegt bei 18,9%. Der Bereich um den maximalen Wirkungsgrad ist ausgedehnt. Es zeigt sich, dass eine Vielzahl von Drahtkombinationen hohe Wirkungsgrade erzielen kann. Eine Optimierung der 3-Busbar-Solarzelle wird hier nicht explizit aufgeführt, da eine Vergrößerung des Ribbonquerschnitts bei gleichbleibender Breite einen Anstieg des Wirkungsgrads zur Folge hat.

Ein Vergleich des Gesamtserienwiderstands der beiden vollständig verschalteten Solarzellentypen zeigt folgendes: Für beide Zelldesigns ergibt die Optimierung der Draht- und Ribbonquerschnitte den maximalen Wert der Ribbonhöhe beziehungsweise des Drahtdurchmessers. Für die 3-Busbar-Solarzelle beträgt er 200  $\mu\text{m}$ . Bei der Multi-Busbar-Solarzelle wurde der maximale Drahtdurchmesser auf 300  $\mu\text{m}$  festgelegt. Es wird ein maximaler Wirkungsgrad von 18,85 % für die verschaltete Multi-Busbar-Solarzelle erreicht. Die Drahtanzahl kann zwischen 11-13 Drähten variiert werden. Die einzelnen Beiträge zum Gesamtserienwiderstand sind in Abbildung 2.15 ange-



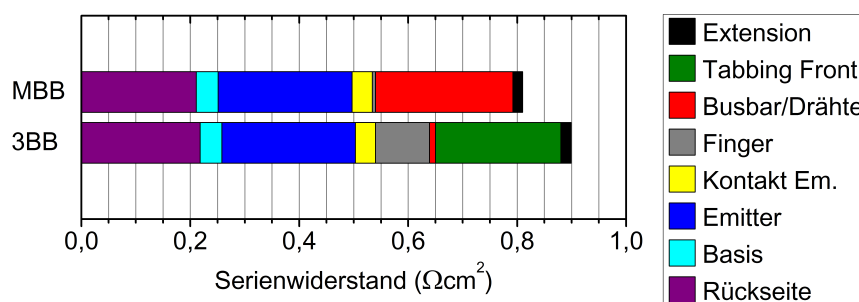
**Abb. 2.13:** Kurzschlussstromdichte (links) und flächengewichteter Gesamtserienwiderstand (rechts) bei Variation der Drahtanzahl und Drahtdicke. Hohe Ströme können nur bei einer niedrigen Drahtanzahl und geringem Drahtdurchmesser gewährleistet werden (links). Ein niedriger Gesamtserienwiderstand wird nur bei hoher Drahtanzahl und hohem Drahtdurchmesser erreicht (rechts).



**Abb. 2.14:** Wirkungsgrad einer auf Vorder- und Rückseite verschalteten Multi-Busbar-Solarzelle unter Variation der Drahtanzahl und des Drahtdurchmessers. Der Fingerabstand wurde konstant auf 2,1 mm gehalten. Die Abschattung der Drähte beträgt 100 %.

geben. Der optimierte Gesamtwiderstand der Multi-Busbar-Solarzelle ist niedriger als der einer 3-Busbar-Solarzelle. Einen entscheidenden Anteil hat hier der Serienwiderstandsbeitrag der Finger (in grau markiert), der bei der 3-Busbar-Solarzelle 16-fach höher ausfällt. Dies liegt wie bereits in Kapitel 1.2.4 begründet daran, dass die effektive Fingerlänge durch die große Anzahl an Drähten verringert wird. Bei einem maximal erlaubten Drahtdurchmesser von 300  $\mu\text{m}$  liegt die optimale Drahtanzahl für eine Multi-Busbar-Solarzelle bei zwölf. Die effektive Fingerlänge reduziert sich damit auf 6,42 mm, für die 3-Busbar-Solarzelle liegt sie bei 24,9 mm und ist damit fast vier Mal so groß.

Insgesamt ergibt sich hiermit für die Multi-Busbar-Solarzelle ein flächengewichteter Gesamtserienwiderstand von  $0,812 \Omega\text{cm}^2$  und für die 3-Busbar-Solarzelle von  $0,899 \Omega\text{cm}^2$ . In Tabelle 2.3 sind die Beiträge der einzelnen Komponenten dargestellt. Die Beiträge für Basis, Emitter und Kontaktwiderstand-Emitter wurden bereits in Tabelle 1.6 aufgeführt. Ein Teil dieser Ergebnisse wurde veröffentlicht [82].



**Abb. 2.15:** Flächengewichteter Gesamtserienwiderstand beider Zelldesigns unter vollständiger Verschaltung der Vorder- und Rückseite und zusätzlicher Verlängerung (Extension).

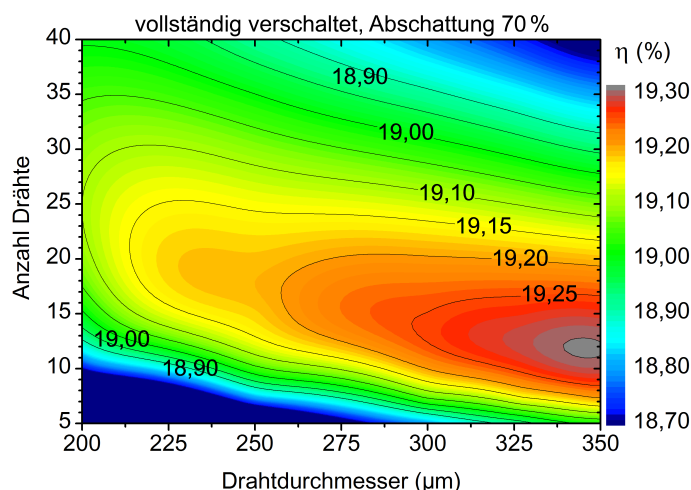
**Tabelle 2.3:** Einzelne Beiträge des Gesamtserienwiderstands mit maximal erreichbaren Wirkungsgraden für eine Multi-Busbar-Solarzelle mit zwölf Drähten und 300  $\mu\text{m}$  Drahtdurchmesser und für eine 3-Busbar-Solarzelle mit 200  $\mu\text{m}$  hohen Ribbons bei 100 % Abschattung der Drähte.

Zelltyp	Finger in ( $\Omega\text{cm}^2$ )	Draht/Busbar in ( $\Omega\text{cm}^2$ )	Tab. Front in ( $\Omega\text{cm}^2$ )	Rückseite in ( $\Omega\text{cm}^2$ )	Gesamt in ( $\Omega\text{cm}^2$ )	$\eta$ in (%)
Multi-Busbar	0,006	0,252	–	0,211	0,812	18,85
3-Busbar	0,099	0,011	0,231	0,218	0,899	18,58

### 2.3.1 Verringerung der effektiven Abschattung der Drähte

Die Simulation in Kapitel 2.3 wurde unter der Annahme getätigt, dass die Abschattung der Drähte 100 % beträgt. Dies ist natürlich nicht der Fall, wie in Kapitel 1.2.3 bereits erläutert wurde. Der real generierte Strom wäre in einem Modul niedriger, da in der Simulation die Absorption des Modulglases und der EVA-Folie nicht berücksichtigt wurde [83, 84]. Generell ist es kompliziert, einen definierten Wert für die Absorption in Glas und in EVA-Folie anzugeben, da es eine Vielfalt von Gläsern und Folien unterschiedlicher Güte und Dicke gibt. Um die Einkopplungseigenschaften zu verbessern, werden einige Modulgläser strukturiert oder spezielle Antireflexionsschichten aufgebracht, die somit die Einkopplungseigenschaften verändern. Es kann nicht von der Näherung ausgegangen werden, dass das Licht senkrecht auf die Zelloberfläche auftrifft. Für solche Effekte müsste mithilfe einer Strahlengang-Simulation (engl. Ray Tracer) die Einstrahlung ermittelt werden [85]. Ein weiterer Effekt, der nicht berücksichtigt wurde, ist die Tatsache, dass Photonen an der Rückseitenfolie im Modul reflektiert werden. Hierdurch entsteht die Möglichkeit, dass durch weitere Reflexion an der Luft-Glas-Grenzfläche diese Photonen auf die Zellfläche zurück reflektiert werden. In diesem Fall würde der Gesamtstrom steigen.

Es wird im Folgenden gezeigt, wie sich der Konturplot verschiebt, wenn angenommen wird, dass die effektive Drahtabschattung 70 % beträgt. Schaubild 2.16 zeigt, dass der Wirkungsgrad im Vergleich zu Abbildung 2.15 absolut steigt. Dies ist direkt auf den höheren Strom zurückzuführen, da sich die Abschattung aufgrund der getätigten Annahme verringert. Ein Vergleich des maximal erreichbaren Wirkungsgrads von Abbildung 2.14 mit Abbildung 2.16 zeigt, dass sich die Drahtanzahl durch eine Reduzierung der effektiven Abschattung der Drähte leicht erhöht. In der Simulation steigt die Anzahl von ca. 9-11 Drähte auf 11-13 Drähte. Die Drahtdicke bleibt maximal bei ca. 350  $\mu\text{m}$ . Ein Wirkungsgradgewinn von 0,4 %<sub>abs</sub> wird simuliert.



**Abb. 2.16:** Wirkungsgrad einer auf Vorder- und Rückseite verschalteten Multi-Busbar-Solarzelle unter Variation der Drahtanzahl und des Drahtdurchmessers. Der Fingerabstand wurde konstant auf 2,1 mm gehalten. Die Abschattung der Drähte beträgt 70 %.

### 2.3.2 Schlussfolgerungen aus den bisherigen Simulationen

Die Ergebnisse der Simulation veranschaulichen die Vorteile, die sich aus dem Multi-busbar-Design ergeben. Durch gezielte Anpassung der Drahtparameter kann das Zellkonzept höhere Wirkungsgrade als das 3-Busbar-Zelldesign erreichen. Dies liegt vorrangig daran, dass der Gesamtserienwiderstand verringert und die Abschattung reduziert wird. Ein weiterer positiv zu bewertender Effekt ist die Reflexion an runden Drähten, die zur Erhöhung des generierten Stroms beiträgt. Der Gesamtquerschnitt, also der Querschnitt aller Drähte, ist beim Multi-Busbar-Konzept im Vergleich zu den 3-Busbar-Solarzellen geringer. Es wurde ein Gesamtquerschnitt von  $0,85 \text{ mm}^2$  für zwölf Drähte mit einem Durchmesser von  $300 \mu\text{m}$ , im Vergleich zu einem Gesamtquerschnitt von  $0,9 \text{ mm}^2$  für eine 3-Busbar-Solarzelle mit  $200 \mu\text{m}$  hohen Ribbons, ermittelt. Entscheidend ist, dass der Serienwiderstandsbeitrag der Finger für eine Siebdruckmetallisierung geringer ausfällt. Dem maximalen Wirkungsgrad von 18,9 % für das Multi-Busbar-Design steht ein maximal erreichbarer Wirkungsgrad von 18,6 % für die 3-Busbar-Solarzelle gegenüber. Wird die effektive Abschattung der Drähte von 100 % auf 70 % gesenkt, kann ein maximaler Wirkungsgrad von 19,3 % erreicht werden.

## 2.4 Optimierung der Metallmenge für die Vorderseitenmetallisierung

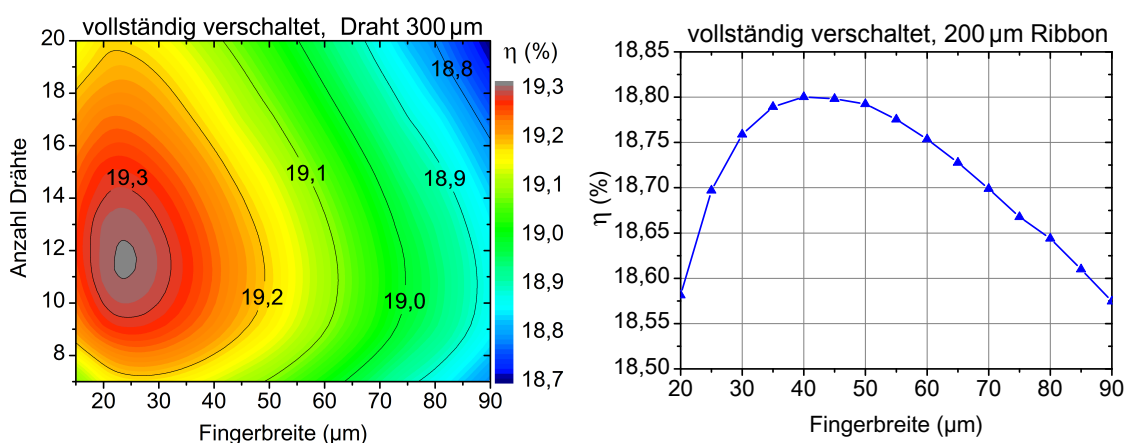
Da die Kosten für eine Vorderseitenmetallisierung basierend auf Silberpaste nicht unerheblich sind und eine Verringerung des Fingerquerschnitts aufgrund des geringen Serienwiderstandsbeitrags durchaus realisierbar ist, eröffnen sich für das Vorderseitenmetallisierungsschema des Multi-Busbar-Zellkonzepts neue Möglichkeiten. Eine Erhöhung der Zelleistung bei gleichzeitiger Verringerung der Metallmenge wäre deshalb wünschenswert. Ob dies mit dem Multi-Busbar-Konzept zu realisieren ist, soll im Folgenden analysiert werden.

### 2.4.1 Optimierung der Siebdruck-Vorderseitenmetallisierung

Wie im vorherigen Kapitel bereits erwähnt wurde, ist der Serienwiderstandsbeitrag des Fingers für eine Multi-Busbar-Solarzelle mit ausreichender Drahtanzahl gering. Es wurde gezeigt, dass bei einer Drahtanzahl von zwölf dieser Beitrag nur einem Sechzehntel des Beitrags einer 3-Busbar-Solarzelle entspricht. Es bietet sich somit die Möglichkeit, die Metallmenge zu reduzieren oder das Material, aus der die Vorderseitenmetallisierung besteht, zu substituieren.

Im Folgenden wird simuliert, welchen Einfluss die verwendete Metallmenge auf den Wirkungsgrad einer vollständig verschalteten Multi-Busbar-Solarzelle hat. Hierfür wird die Breite der Siebdruckfinger kontinuierlich verringert und eine Optimierung der Drahtanzahl durchgeführt. Der Fingerabstand wird konstant auf 2,1 mm gehalten. Anschließend werden die gewonnenen Ergebnisse mit denen einer 3-Busbar-Solarzelle verglichen, bei der ebenfalls die Fingerbreite variiert wurde.

Durch die Verkleinerung der Fingerbreite kommt es automatisch zu einer Verringerung der Metallmenge und der Abschattung der Zelloberfläche. Es wird ein reziprok proportionaler Zusammenhang zwischen Fingerbreite und Linienwiderstand des Fingers angenommen. Eine Halbierung der Fingerbreite hat damit eine Halbierung des Fingerquerschnitts zur Folge. Der Drahtdurchmesser wird konstant auf  $300\ \mu\text{m}$  gehalten. In Abbildung 2.17 werden die Ergebnisse der Simulationen präsentiert. Auf der linken Seite sind die Ergebnisse der Multi-Busbar-Simulation, rechts die simulierten Ergebnisse für eine 3-Busbar-Solarzelle illustriert. Der maximal erreichbare Wirkungsgrad für das Multi-Busbar-Design liegt um  $0,5\ \%\text{abs}$  höher als bei einer verschalteten 3-Busbar-Solarzelle. Die zugehörige Fingerbreite zeigt, dass das Maximum des Wirkungsgrads zwischen  $22\text{-}26\ \mu\text{m}$  bei der Multi-Busbar-Solarzelle und bei  $40\ \mu\text{m}$  bei der 3-Busbar-Solarzelle liegt. Dies ist direkt auf den geringeren Serienwiderstandsbeitrag der Finger zurückzuführen. Er liegt für die Multi-Busbar-Zelle bei einer Fingerbreite von  $25\ \mu\text{m}$  bei  $0,027\ \text{m}\Omega\text{cm}^2$ . Der Fingerbeitrag bei  $40\ \mu\text{m}$  für die 3-Busbar-Zelle liegt bei  $0,222\ \text{m}\Omega\text{cm}^2$  und ist damit, obwohl der Fingerquerschnitt fast doppelt so groß ist, um das Achtfache höher.



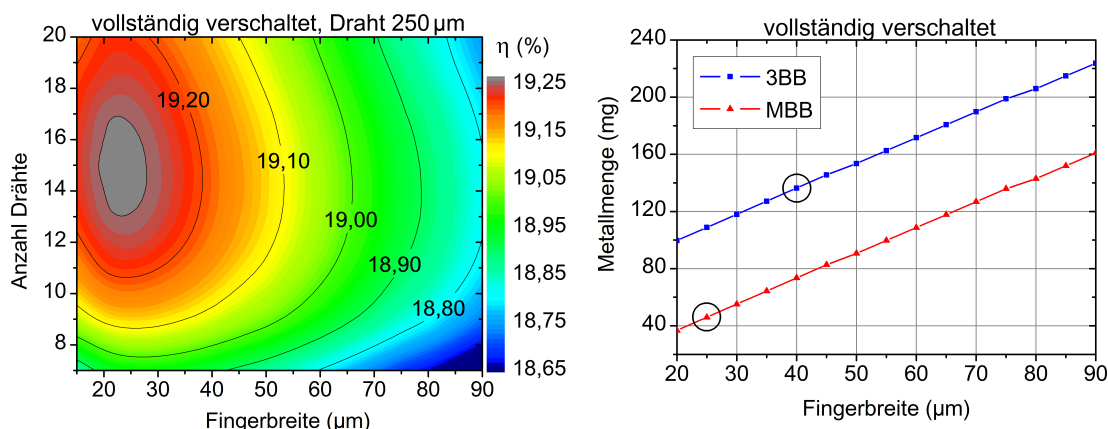
**Abb. 2.17:** Links: Wirkungsgrad einer verschalteten Multi-Busbar-Solarzelle bei Variation der Drahtanzahl und Fingerbreite (Drahtdicke  $300\ \mu\text{m}$ ). Der Fingerabstand wurde konstant auf  $2,1\ \text{mm}$  gehalten. Rechts: Wirkungsgrad einer verschalteten 3-Busbar-Solarzelle bei Variation der Fingerbreite (Ribbonhöhe  $200\ \mu\text{m}$ ). Die Fingerbreite ist für beide Zelltypen linear proportional zum Fingerquerschnitt. Der Fingerabstand wurde konstant auf  $2,1\ \text{mm}$  gehalten.

Selbst eine weitere Verringerung der Fingerbreite würde für das Multi-Busbar-Konzept nur zu geringen Einbußen im Wirkungsgrad führen. Damit ergäbe sich die Möglichkeit, ohne größere Wirkungsgradverluste die Pastenmenge weiter zu reduzieren.

Im Folgenden soll untersucht werden, wie sich die Verringerung der Fingerbreite auf ein Drahtdesign mit  $250\ \mu\text{m}$  breiten Drähten auswirkt. Hierzu wird wie bei obiger Simulation vorgegangen. Bei festem Fingerabstand wird die Fingerbreite und die Drahtanzahl variiert. Das Ergebnis der Simulation ist in Abbildung 2.18 dargestellt.

Das Optimum im Wirkungsgrad wird bei einer Fingerbreite um  $20\text{-}26\ \mu\text{m}$  erreicht, ist jedoch im Vergleich zur Simulation mit  $300\ \mu\text{m}$  breiten Drähten um  $0,08\ \%$  geringer. Die Drahtanzahl steigt von  $11\text{-}12$  Drähten auf  $14\text{-}16$  Drähte an. Der maximale Wirkungsgrad beträgt  $19,25\ \%$  bei  $15$  Drähten. In Abbildung 2.18 auf der rechten Seite ist die Simulation zur verwendeten Pastenmenge in Abhängigkeit von der Fingerbreite dargestellt. Zur Bestimmung der Pastenmenge wurde experimentell die Masse des Wafers vor dem Vorderseiten-Druckprozess und nach dem Feuerungsprozess bestimmt. Anschließend wurde der Linienwiderstand bestimmt und der Querschnitt ermittelt. Die aus diesem Experiment gewonnenen Daten wurden anschließend für die Simulation verwendet. Der optimale Wirkungsgrad wird bei einer verschalteten 3-Busbar-Solarzelle bei etwa  $140\ \text{mg}$  Silberpaste erreicht. Für die optimale Metallisierung der Multi-Busbar-Vorderseite genügen ca.  $45\ \text{mg}$  Silberpaste. Somit kann mit dem Multi-Busbar-Design, im Vergleich zum 3-Busbar-Design, eine Reduzierung der Pastenmenge um  $95\ \text{mg}$  bei einer Wirkungsgradsteigerung von  $0,5\ \%_{\text{abs}}$  erreicht werden.

Es soll allerdings noch bemerkt werden, dass dem Autor bis zu diesem Zeitpunkt keine Siebdruckverfahren geläufig sind, die es ermöglichen, Fingerbreiten von  $20\text{-}25\ \mu\text{m}$  reproduzierbar zu drucken. Über Fingerbreiten von ca.  $50\ \mu\text{m}$  mit Linienwiderständen von  $0,55\ \Omega/\text{cm}$  wurde im Jahre 2013 berichtet [86]. Wird anstatt des Siebdruck- ein Schablonendruckverfahren verwendet, können Breiten von  $50\ \mu\text{m}$  mit hohem Aspektverhältnis von  $0,5$  erreicht werden [87]. Mit einem geringeren Aspektverhältnis von



**Abb. 2.18:** Links: Wirkungsgrad einer verschalteten Multi-Busbar-Solarzelle bei Variation der Drahtanzahl und Fingerbreite (Drahtdicke  $250\ \mu\text{m}$ ). Rechts: Verwendete Metallmenge für die Vorderseitenmetallisierung (15 Drähte). In Schwarz umkreist: Metallmenge zum maximalen Wirkungsgrad beider Solarzellen-Typen. Die Fingerbreite ist für beide Zelltypen linear proportional zum Fingerquerschnitt.

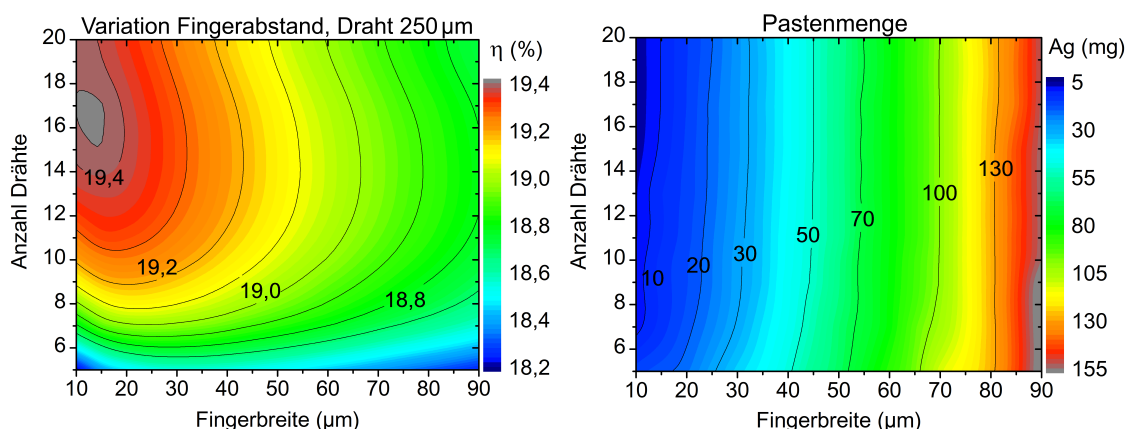
0,21 wurden Breiten von  $42\ \mu\text{m}$  gemessen [88]. Das Aspektverhältnis ist der Quotient aus Höhe zu Breite des Fingers. Eine Drucktechnik, mit der sich dünnere Finger mit hohem Aspektverhältnis drucken lassen, bieten sogenannte Dispenser-Druckverfahren. Hierbei wird eine silberhaltige Paste durch feine Öffnungen gepresst. Mit diesem Druckverfahren können Fingerbreiten von  $27\ \mu\text{m}$  mit einem Aspektverhältnis über 0,7 erreicht werden [89, 90, 91, 92, 93]. Für das Multi-Busbar-Konzept wäre aber selbst mit diesem Verfahren die aufgebrauchte Pastenmenge größer als benötigt.

### 2.4.2 Zusätzliche Variation des Fingerabstands

Im vorherigen Kapitel wurde gezeigt, wie durch die Verringerung der Fingerbreite eine Einsparung bei der benötigten Pastenmenge bei gleichzeitiger Erhöhung des Wirkungsgrads erfolgen kann. Es wurden die Annahmen getroffen, dass sich  $j_{01}$ , der Schichtwiderstand und die Fingerbreite nicht verändern. Um die Veränderung der Sättigungsstromdichte  $j_{01}$  in der Simulation zu berücksichtigen, muss diese von der metallisierten Fläche, dem Schichtwiderstand und der Oberflächenpassivierung abhängen. In [94] wurde  $j_{01}$  in Abhängigkeit dieser Parameter bestimmt. Die durchgeführte Simulation unterschätzt somit das Potential des Zelldesigns, da eine Reduzierung der metallisierten Fläche zu einer Erhöhung der offenen Klemmenspannung führen würde. Eine Halbierung der metallisierten Oberfläche von 8 % auf 4 % bei einem Schichtwiderstand von  $78\ \Omega/\text{sq}$  führt zu einer Erhöhung der offenen Klemmenspannung um circa 2 mV [94]. Wird der Spannungsunterschied für eine vollständig verschaltete Solarzelle simuliert, bewirkt die Spannungsdifferenz einen Wirkungsgrad-Unterschied kleiner 0,1 %. Im Rahmen dieser Ungenauigkeit kann eine zusätzliche Variation des Fingerabstands ohne die Berücksichtigung der Variation von  $j_{01}$  getätigt werden.

In der Simulation wurden Drahtanzahl, Fingerbreite und Fingerabstand variiert. Der indirekt proportionale Zusammenhang zwischen Fingerbreite und Linienwiderstand des Fingers wurde durch eine indirekt quadratische Proportionalität ersetzt. Dies bedeutet, dass bei Halbierung der Fingerlänge die Fingerquerschnittsfläche geviertelt wird. Die Ergebnisse der Simulation sind in Abbildung 2.19 dargestellt. In beiden Diagrammen wird die Drahtanzahl über die Fingerbreite aufgetragen. Links wird der Wirkungsgrad und rechts die benötigte Ag-Pastenmenge abgebildet. Im linken Schaubild ist deutlich die Tendenz zu erkennen, dass mit sinkender Fingerbreite der Wirkungsgrad steigt, wenn zusätzlich die Drahtanzahl erhöht wird. Mit sinkender Fingerbreite muss zusätzlich der Fingerabstand variiert werden. Bei einer Fingerbreite von  $90\ \mu\text{m}$  ist ein Fingerabstand von 2,1-2,2 mm ausreichend. Wird die Fingerbreite auf  $45\ \mu\text{m}$  reduziert, beträgt der Fingerabstand nur noch 1,45-1,7 mm. Bei einer Fingerbreite von  $15\ \mu\text{m}$  liegt der Fingerabstand nur noch bei 0,5-0,95 mm, wobei der geringere Wert den Fingerabstand für fünf Drähte repräsentiert und der obere Wert den Fingerabstand für 20 Drähte angibt. Der maximal erreichbare Wirkungsgrad beträgt 19,42 % und wird bei einer Fingerbreite von  $10\ \mu\text{m}$  mit einer Drahtanzahl von 17 erreicht.

Für die benötigte Metallmenge der Vorderseitenmetallisierung ist ein deutlicher Abfall hin zu geringeren Fingerbreiten sichtbar. Da die Bedingung getroffen wurde, dass der Fingerquerschnitt mit linearer Reduzierung der Fingerbreite quadratisch abnimmt, ist zu erkennen, dass der Zusammenhang zwischen Metallmenge und Fingerbreite nicht mehr wie in Abbildung 2.18 rechts linear ist. Für den maximalen Wirkungsgrad



**Abb. 2.19:** Links: Wirkungsgrad einer verschalteten Multi-Busbar-Solarzelle bei Variation der Drahtanzahl und Fingerbreite unter Optimierung des Fingerabstands (Drahtdicke  $250\ \mu\text{m}$ ). Rechts: Verwendete Ag-Metallmenge für die Vorderseitenmetallisierung in Abhängigkeit von der Fingerbreite und Drahtanzahl bei Optimierung des Fingerabstands. Die Fingerbreite ist quadratisch proportional zum Fingerquerschnitt. Die benötigte Metallmenge wird über die Fingerbreite vorgegeben.

von 19,42 % wird nur noch eine Metallmenge von 5,7 mg benötigt.

Es sei hier nochmals darauf verwiesen, dass angenommen wurde, dass es sich um einen homogen gedruckten Finger handelt, der keine Höhenvariation aufweist. Dies ist in der Realität nicht der Fall, und deshalb kann diese Simulation nicht für momentan bestehende Drucktechniken verwendet werden. Sie zeigt allerdings das Potential des Multi-Busbar-Designs bezüglich der Einsparmöglichkeiten für die Vorderseitenmetallisierung.

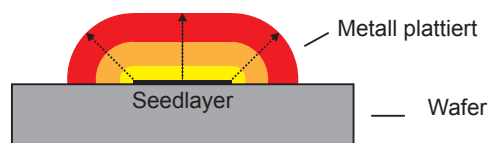
## 2.5 Optimierung des Metallbedarfs einer plattierten Vorderseite

Alternative Metallisierungsverfahren, die es ermöglichen, geringere Metallmengen für die Vorderseitenmetallisierung zu nutzen, scheinen für das Multi-Busbar-Design ideal geeignet zu sein. Eine Möglichkeit, genau definierte Mengen Metall auf die Vorderseite aufzubringen, ist durch das sogenannte Plattierverfahren gegeben. Dieses Verfahren wurde bereits in Abschnitt 1.1.6 beschrieben und wird nun für die 3-Busbar- und die Multi-Busbar-Solarzelle evaluiert.

### 2.5.1 Silber-Vorderseitenmetallisierung

Im Simulationsprogramm werden zuerst die Parameter für die Metallisierung angepasst. Der spezifische Kontaktwiderstand zwischen Vorderseitenmetallisierung und Emitter ist gering ( $1,5\ \text{m}\Omega\text{cm}^2$ ). Die elektrische Leitfähigkeit der Kontaktschicht, die auch als Seedlayer bezeichnet wird, ist vernachlässigbar gering und wird in der Simulation durch Null genähert. Das Aufbringen einer metallischen Schicht auf die Saatschicht erfolgt omnidirektional. Die Schicht wächst somit an den Kanten der Saatschicht genau so schnell auf wie in der Mitte. Zur besseren Veranschaulichung

des Aufwuchsprozesses sei auf Abbildung 2.20 verwiesen, in der das Wachstum einer plattierten Silberschicht dargestellt ist.



**Abb. 2.20:** Querschnitt einer plattierten Saatschicht auf grauem Substrat. Das Wachstum eines plattierten Fingers ist hier dargestellt. In Schwarz ist die Saatschicht abgebildet, auf die plattiert wird. Schematisch farblich gekennzeichnet: Gelb - Anfangsphase; Rot - Endphase. Die Schicht wächst homogen omnidirektional auf.

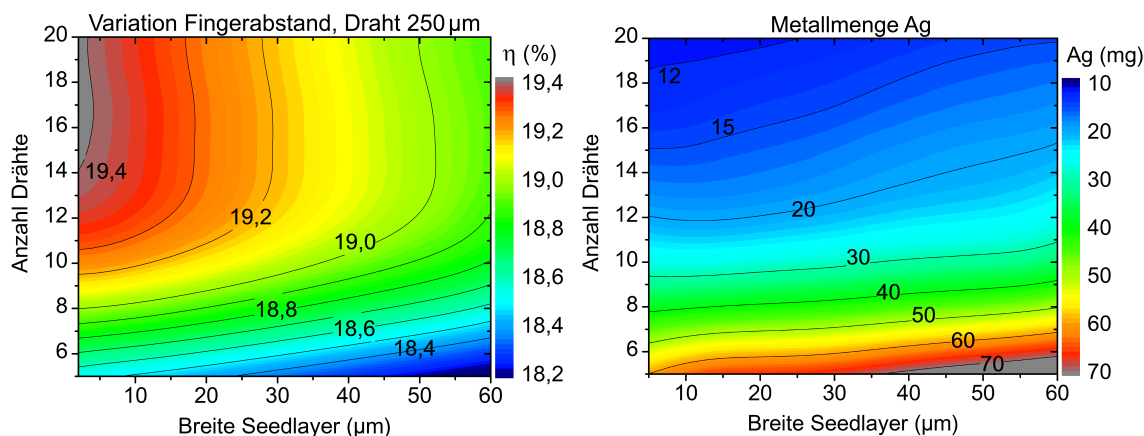
Es wird, wie in Abbildung 2.19 dargestellt, eine Variation der Drahtanzahl und Fingerbreite bei Optimierung des Fingerabstands und der abgeschiedenen Metallmenge für eine vollständig verschaltete Multi-Busbar-Solarzelle durchgeführt. Die Drahtdicke beträgt  $250\ \mu\text{m}$ . Für die erste Simulation wird als Vorderseitenmetall Silber gewählt. Die experimentell ermittelte Leitfähigkeit einer plattierten Ag-Schicht beträgt ca.  $30\text{-}40 \times 10^6\ \text{S/m}$ . Dies entspricht etwa 50-66% der Leitfähigkeit von kristallinem Silber und ist ein gängiger Wert für eine Plattierlösung, die ausschließlich nicht-cyanidische Komponenten aufweist. In der Simulation wird die Leitfähigkeit auf  $30 \times 10^6\ \text{S/m}$  festgelegt. Es soll damit demonstriert werden, dass bereits eine geringe Ag-Leitfähigkeit ausreicht, um hohe Wirkungsgrade mit dem Multi-Busbar-Konzept zu erzielen.

Werden Plattierbäder verwendet, die Silbercyanide enthalten, kann die Leitfähigkeit auf  $45,5 \times 10^6\ \text{S/m}$  erhöht werden [95]. Somit könnte der Silberverbrauch weiter reduziert und der Wirkungsgrad aufgrund der geringeren Abschattung erhöht werden. Im linken Schaubild in Abbildung 2.21 ist die Anzahl der Drähte über die Breite der Saatschicht und den Wirkungsgrad aufgetragen. Die höchsten Wirkungsgrade werden bei einer Saatschichtbreite von einem Mikrometer erreicht. Das Optimum des Wirkungsgrads liegt bei 17 jeweils  $250\ \mu\text{m}$  dicken Drähten und beträgt 19,42 %.

Im rechten Schaubild ist die plattierte Silbermenge dargestellt. Bei Betrachtung der Metallmenge bei konstanter Drahtanzahl zeigt sich, dass die Metallmenge praktisch unabhängig von der Breite der Saatschicht ist. Das bedeutet, dass bei zusätzlicher Optimierung des Fingerabstands die plattierte Metallmenge ausschließlich über die Anzahl der Drähte beeinflusst wird. Der Vergleich des Schaubildes 2.19 rechts mit Schaubild 2.21 rechts zeigt die Unterschiede zwischen den zwei Metallisierungsverfahren auf. Der Metallverbrauch wird beim Siebdruckverfahren über die Breite der Finger bestimmt.

Die Drahtanzahl beeinflusst aufgrund des geringen Linienwiderstands der Finger ausschließlich den Wirkungsgrad. Bei Plattierverfahren ist die verwendete Metallmenge praktisch unabhängig von der Fingerbreite. Der Wirkungsgrad und die benötigte Metallmenge werden über die Anzahl der Drähte definiert. Der Vergleich der benötigten Metallmenge im Optimum (Fingerbreite  $10\ \mu\text{m}$ ) beider Graphen zeigt, dass beim Siebdruckverfahren nur  $10\ \text{mg}$  Silberpaste benötigt werden. Die benötigte Metallmenge beim Ag-Plattieren liegt hingegen bei  $12\ \text{mg}$  Silber. Sie kann unter Verwendung zusätzlicher Drähte weiter reduziert werden.

Die momentane Realisierbarkeit beider Metallisierungs-Techniken zeigt, dass im



**Abb. 2.21:** Links: Wirkungsgrad einer verschalteten Multi-Busbar-Solarzelle mit plattiertem Ag-Vordergrid bei Variation der Drahtanzahl und Fingerbreite unter Optimierung des Fingerabstands und der Metallmenge. Die Dicke des Drahts beträgt 250 µm. Rechts: Silberverbrauch der Vorderseitenmetallisierung. Die benötigte Metallmenge wird über die Drahtanzahl vorgegeben.

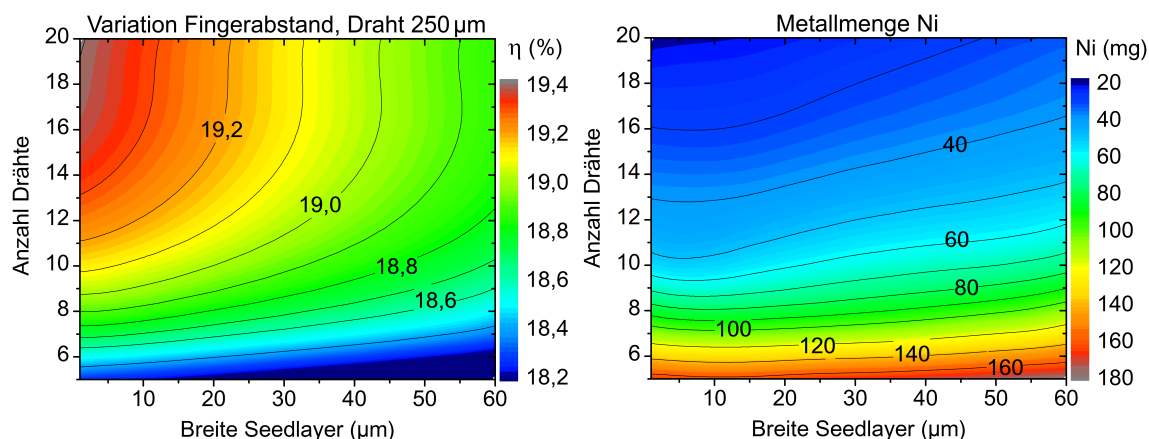
Labor mit Siebdruckverfahren Fingerbreiten von ca. 40 µm erreicht werden können. Mit Seed-and-Plate-Verfahren können Saatschichten mit einer Breite von 35-45 µm hergestellt werden. Die benötigte Silbermenge des Siebdrucks liegt damit laut Simulation bei ca. 50 mg. Die Silbermenge für eine plattierte Vorderseite beträgt lediglich 13-15 mg. Die Saatschicht enthält zusätzlich metallische Anteile. Diese müssen bei einem Vergleich der Metallisierungstechniken berücksichtigt werden. Teile dieser Untersuchungen wurden in [96] veröffentlicht.

In Schaubild 2.21 rechts sind leichte Krümmungen im Bereich zwischen 11-20 Drähten sichtbar. Diese Krümmungen entstehen durch die Diskretisierung der Metallmenge und des Fingerabstands im Simulationsprogramm. In der Simulation wurde eine Schrittweite von 50 µm für den Fingerabstand gewählt. Die Schrittweite für die Metallisierungshöhe betrug 100 µm. Durch die Interpolation der erhaltenen Simulationswerte entstehen damit leichte Verkrümmungen der Kurven. Der Wirkungsgrad wird hierdurch jedoch kaum beeinflusst. Eine Variation des Fingerabstands und der Fingerhöhe führt im Optimum zu einer Veränderung der benötigten Metallmenge von 3 mg. Die Änderung des Wirkungsgrads beträgt 0,005 %<sub>abs</sub>. Bei einer Saatschichtbreite von 60 µm und fünf Drähten beträgt die Abweichung der Metallmenge 4 mg. Die Abweichung im Wirkungsgrad beträgt 0,004 %<sub>abs</sub>. Dieser Fehler muss in der Simulation berücksichtigt werden.

## 2.5.2 Nickel-Vorderseitenmetallisierung

Im nächsten Schritt soll eine Vorderseitenmetallisierung auf Nickelbasis untersucht werden. Hierzu wird angenommen, dass die Leitfähigkeit der Schicht  $7 \times 10^6$  S/m beträgt. Dies entspricht 50 % der Leitfähigkeit von kristallinem Nickel. Die Ergebnisse der Simulation sind in Abbildung 2.22 zu sehen. Da der Kontaktwiderstand zwischen Nickel und Silizium gering ist, wird ein Wert von 0,1 mΩcm<sup>2</sup> vorgegeben. Die Kontakteigenschaften von Ni/Si-Schichtsystemen werden in Kapitel 3.3.3 ausführlich diskutiert, deshalb soll hier nicht weiter auf die gewählten Werte eingegangen werden.

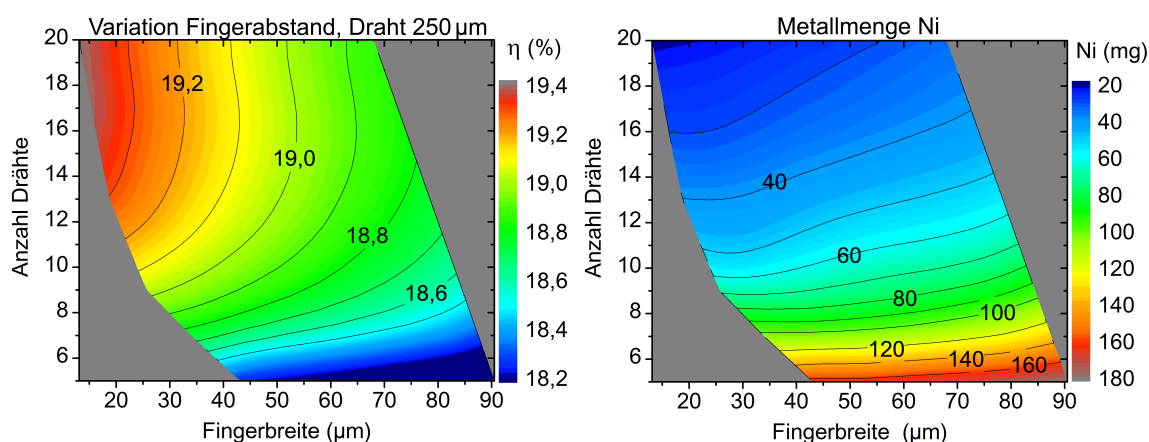
Der Wirkungsgradverlauf ähnelt der Darstellung in Schaubild 2.21 links. Der maxi-



**Abb. 2.22:** Links: Wirkungsgrad einer verschalteten Multi-Busbar-Solarzelle mit plattiertem Ni-Grid bei Variation der Drahtanzahl und Fingerbreite unter Optimierung des Fingerabstands und der Metallmenge. Die Dicke des Drahts beträgt 250 μm. Rechts: Nickelverbrauch der Vorderseitenmetallisierung.

mal erreichbare Wirkungsgrad liegt bei 19,39 % und wird bei einer Drahtanzahl von 20 erreicht. Zum Erreichen des maximalen Wirkungsgrads muss die Drahtanzahl im Vergleich zu einer Ag-Metallisierung erhöht werden. Dies korreliert mit der geringeren Leitfähigkeit des Nickels. Die benötigte Nickelmenge liegt bei 22 mg im Vergleich zu 12 mg für die Ag-Metallisierung mit 17 Drähten. Auch hier ist schlüssig, dass bei geringerer Leitfähigkeit mehr Metall benötigt wird, beziehungsweise zusätzlich die Drahtanzahl erhöht werden muss.

In Abbildung 2.23 wurde auf der x-Achse anstatt der Saatschichtbreite die Breite des Fingers aufgetragen, um darzustellen, welchen Einfluss die Änderung der Metallisierung auf das Zelldesign hat. Durch die Änderung verschiebt sich der Konturplot und es entstehen freie Bereiche im Schaubild, die grau gekennzeichnet sind. Durch die Verschiebung des Konturplots kann die optimale Fingerbreite leicht abgelesen werden. Der Grenzbereich zwischen dem grauen Polygon in der linken unteren Ecke des Schaubilds und dem Konturplot beschreibt die optimale Fingerbreite zu gegebener

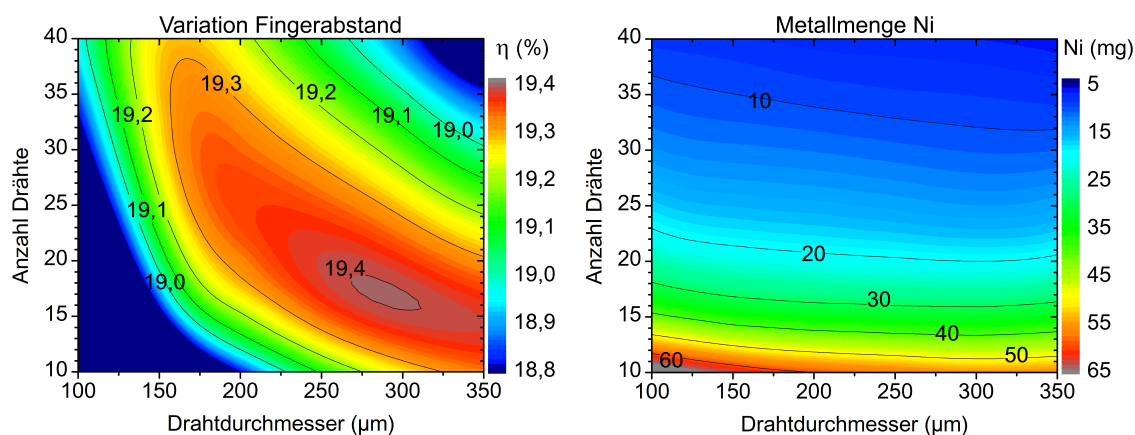


**Abb. 2.23:** Links: Wirkungsgrad einer verschalteten Multi-Busbar-Solarzelle bei Variation der Drahtanzahl und Fingerbreite unter Optimierung des Fingerabstands und der Metallmenge (Drahtdicke 250 μm). Rechts: benötigte Menge Nickel.

Drahtanzahl. Die Saatschicht hat am Übergangsbereich eine Breite von  $1\ \mu\text{m}$ . Für fünf Drähte bedeutet dies, dass der Finger eine Breite von  $43,1\ \mu\text{m}$  und damit eine Höhe von  $21,05\ \mu\text{m}$  aufweist. Die dafür benötigte Metallmenge beträgt  $170\ \text{mg}$ . Für den höchsten erreichbaren Wirkungsgrad wird eine Fingerbreite von  $13,1\ \mu\text{m}$  benötigt. Dies entspricht einer Fingerhöhe von  $6,55\ \mu\text{m}$ . Es werden nur noch  $22\ \text{mg}$  Nickel für die Vorderseitenmetallisierung benötigt. Der Fingerabstand liegt bei  $0,95\ \text{mm}$ .

Für eine Seed-and-Plate-Metallisierung liegt der höchste Wirkungsgrad immer bei der geringsten Saatschichtbreite, wenn der Kontaktwiderstand ausreichend gering ist. Mit zunehmender Drahtanzahl sinkt wie bereits gezeigt die benötigte Metallmenge.

Es wurde noch keine Optimierung der Drahtdicke durchgeführt. Die Ergebnisse der Simulation werden in Abbildung 2.24 präsentiert. In Abbildung 2.24 links, ist die Anzahl der Drähte über den Drahtdurchmesser und den Wirkungsgrad aufgetragen. Für jeden Parameter wurde eine Optimierung der benötigten Nickelmenge und des Fingerabstands durchgeführt. Das simulierte Wirkungsgradmaximum liegt hier bei einer Drahtdicke von  $270\text{-}310\ \mu\text{m}$  für 16 bis 18 Drähte und beträgt  $19,40\%$ . Der optimale Fingerabstand liegt bei  $0,95\ \text{mm}$ . Die benötigte Nickelmenge ist im rechten Schaubild dargestellt und beträgt im optimalen Bereich  $20\text{-}30\ \text{mg}$ . Auch hier ist die Tendenz erkennbar, dass mit steigender Drahtanzahl die Metallmenge sinkt. Der Einfluss des Drahtdurchmessers spielt für die verwendete Metallmenge eine untergeordnete Rolle. Die Linien gleichen Metallverbrauchs für eine gegebene Drahtanzahl können näherungsweise als konstant angenommen werden, da sie fast parallel zur x-Achse verlaufen. Die maximalen Abweichungen, verursacht durch die Diskretisierung von Fingerabstand und Fingerhöhe, belaufen sich auf  $5\ \text{mg}$  Nickel bei einer maximalen Abweichung des Wirkungsgrads von  $0,006\%$ .



**Abb. 2.24:** Links: Wirkungsgrad einer verschalteten Multi-Busbar-Solarzelle bei Variation der Drahtanzahl, -dicke und Fingerbreite unter Optimierung des Fingerabstands und der Metallmenge. Rechts: benötigte Menge Nickel.

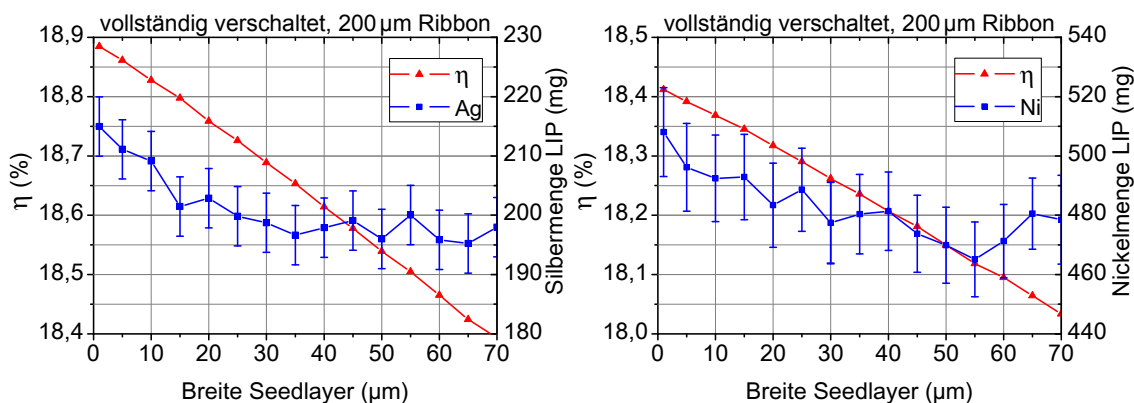
### 2.5.3 Plattierte Vorderseitenmetallisierungen für 3-Busbar-Solarzellen

Zum Vergleich der beiden Zelldesigns wird nun eine Optimierung einer verschalteten 3-Busbar-Solarzelle durchgeführt. Auch hier soll eine Evaluation für die Metalle Silber und Nickel durchgeführt werden. Anschließend werden die vollständig verschalteten

und plattierten 3-Busbar-Solarzellen mit den Multi-Busbar-Solarzellen verglichen. Die Leitfähigkeit der plattierten Silberschicht liegt wie bei der Multi-Busbar-Solarzelle bei  $30 \times 10^6$  S/m. Auch hier wird eine Variation der Saatschichtbreite sowie eine Metallmengenoptimierung unter optimiertem Fingerabstand durchgeführt. Die Höhe des Ribbons wird nicht variiert, da bereits gezeigt wurde, dass der maximale Wirkungsgrad bei maximaler Ribbonhöhe erreicht wird. Die Solarzelle ist auf Vorder- und Rückseite mit einem  $200 \mu\text{m}$  hohen Ribbon vollflächig verschaltet. Die Ergebnisse der Simulation sind in Abbildung 2.25 vorgestellt. Bei Betrachtung des Wirkungsgrads in Abhängigkeit von der Saatschichtbreite ergibt sich ein ähnlicher Verlauf wie für eine Multi-Busbar-Solarzelle. Mit abnehmender Breite der Saatschicht steigt der Wirkungsgrad bis zu maximal 18,9%. Der optimale Fingerabstand liegt bei 1,15 mm. Es fällt bei der Betrachtung auf, dass die Kurve Abweichungen vom erwarteten Trend zeigt. Dies ist durch die gewählte Diskretisierung des Fingerabstands, der in  $50 \mu\text{m}$  Schritten variiert wurde, sowie durch die Schrittweite für die Höhe der Metallisierung, die in  $100 \mu\text{m}$  gewählt wurde, zu erklären.

Eine Verringerung des Fingerabstands um  $50 \mu\text{m}$  bei einer Saatschichtbreite von  $1 \mu\text{m}$  bewirkt eine Zunahme der Silbermenge um 6 mg, da sich die Anzahl der benötigten Finger erhöht (von 125 auf 130 Finger). Eine zusätzliche Höhenvariation des Fingers um  $100 \mu\text{m}$  führt zu einer Massenzunahme um weitere 2 mg. Diese Ungenauigkeit von  $\pm 8$  mg muss in der Simulation berücksichtigt werden. Der Wirkungsgrad wird durch die Änderung kaum beeinflusst, er sinkt um  $0,004\%_{\text{abs}}$ . Bei einer Saatschichtbreite von  $70 \mu\text{m}$  beträgt die Abweichung 7 mg. Die Fehler sind im Schaubild integriert.

Ein Vergleich der maximal erreichbaren Wirkungsgrade von Multi-Busbar- und 3-Busbar-Design zeigt eine Differenz von  $0,5\%_{\text{abs}}$ . Ein Vergleich der benötigten Silbermenge ergibt deutliche Unterschiede. Die Multi-Busbar-Solarzelle benötigt lediglich 12 mg Silber zum Erreichen des optimalen Wirkungsgrads. Für die Metallisierung der 3-Busbar-Solarzelle werden hingegen 215 mg Silber benötigt. Mit geringer leitfähigem Nickel wird für die Multi-Busbar-Solarzelle eine Nickelmenge von 22 mg bei 20 Drähten benötigt. Für eine Vorderseitenmetallisierung aus Nickel sind die Ergebnisse in Abbildung 2.25 auf der rechten Seite dargestellt. Da die Leitfähigkeit des Nickels

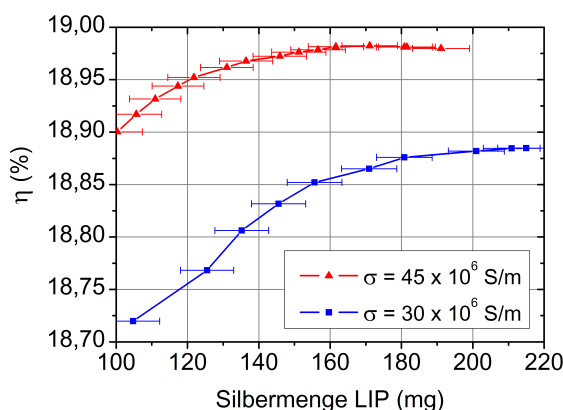


**Abb. 2.25:** Optimierter Wirkungsgrad und Metallmenge einer vollständig verschalteten 3-Busbar-Solarzelle mit (links) Silber- und (rechts) Nickel-Vorderseitenmetallisierung bei Variation des Fingerabstands und Optimierung der Metallmenge. Die Höhe des Ribbons beträgt  $200 \mu\text{m}$ .

bei  $7 \times 10^6$  S/m liegt, ist die benötigte Metallmenge deutlich höher als bei einer Ag-Metallisierung. Der hohe Metallverbrauch führt zu einer Verbreiterung der Finger. Dies wirkt sich negativ auf den Gesamtstrom und den Wirkungsgrad aus. Die benötigte Nickelmenge liegt bei über 500 mg und ist damit aus produktionstechnischer Sicht kaum zu ermöglichen, da sich die Plattierdauer bei gleicher Abscheiderate im Vergleich zu Silber mehr als verdoppeln würde. Der maximal erreichbare Wirkungsgrad ist im Vergleich zur Ag-plattierten Solarzelle um  $0,5\%_{\text{abs}}$  reduziert.

Da die Solarzelle auf den maximalen Wirkungsgrad optimiert wurde, ist die benötigte Metallmenge hoch. Im Folgenden soll veranschaulicht werden, wie die Reduzierung der Metallmenge den Wirkungsgrad einer 3-Busbar-Solarzelle beeinflusst. Dies geschieht für zwei verschiedene Leitfähigkeiten, wobei die Leitfähigkeit von  $30 \times 10^6$  S/m eher eine untere Abschätzung für eine plattierte Silberschicht darstellt. Eine Leitfähigkeit von  $45 \times 10^6$  S/m kann durch einen optimierten Plattierprozess erreicht werden. Die Ergebnisse der Simulation sind in Abbildung 2.26 zu sehen. Beide Kurven zeigen einen ähnlichen Verlauf. Mit abnehmender Metallmenge sinkt der Wirkungsgrad. Wird die Metallmenge in der blauen Kurve um 50 mg reduziert, fällt der Wirkungsgrad um weniger als  $0,05\%_{\text{abs}}$ . Die rote Kurve zeigt deutlich, dass mit zunehmender Leitfähigkeit der Vorderseitenmetallisierung nicht nur der Wirkungsgrad steigt. Auch die benötigte Metallmenge wird reduziert. Das Optimum liegt bei einem Wirkungsgrad von  $18,98\%$  und einem Metallverbrauch von 170 mg Silber. Wird die Metallmenge um 50 mg auf 120 mg reduziert, liegt der Wirkungsgrad bei  $18,95\%$ . Hieraus wird deutlich, dass eine reine Optimierung auf den Wirkungsgrad nicht unbedingt auch das Optimum für die Produktion der Solarzelle darstellt, da die Kosten für die Metallisierung auch berücksichtigt werden sollten.

Ein weiteres, bisher nicht angesprochenes Hindernis stellt die Verlötung einer nickelbasierten Metallisierung dar. Oxidierte Nickelschichten lassen sich nicht verlöten. Der Lötprozess müsste damit unter Schutzatmosphäre vollzogen und zusätzlich das entstandene Oxid entfernt werden [97]. Alternativ könnte eine Anti-Oxidationsschicht auf die abgeschiedene Metallschicht aufgebracht werden. Hierfür eignen sich Metalle wie Zinn oder Silber [98, 99], auch organische Komponenten können verwendet werden [100].



**Abb. 2.26:** Wirkungsgrad einer plattierten, vollständig verschalteten, 3-Busbar-Solarzelle bei Variation der Metallmenge. Die Saatschichtbreite beträgt  $1 \mu\text{m}$ . Die Leitfähigkeit entspricht  $45 \times 10^6$  S/m für die rote Kurve und  $30 \times 10^6$  S/m für die blaue Kurve.

## 2.6 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde mithilfe des Simulationsprogramms eine Optimierung der Multi-Busbar- und der 3-Busbar-Solarzelle durchgeführt.

Es wurde gezeigt, wie die Messspitzenanzahl bei der Bestimmung der Diodenkennlinie einer Solarzelle ihren Wirkungsgrad beeinflusst. Es wurde ersichtlich, dass durch eine beidseitige Kontaktierung des Messdrahts bei der Bestimmung der Diodenkennlinie einer Multi-Busbar-Solarzelle ein höherer Wirkungsgrad erzielt wird.

Die Simulation der vollständig verschalteten Solarzellen zeigte, dass eine dreidimensionale Berechnung der Rückseitenverschaltung zur exakten Bestimmung des Serienwiderstands notwendig ist. Der geringste Serienwiderstandsbeitrag einer verschalteten Rückseite wurde für durchgehende Pads ermittelt. Unter Berücksichtigung der negativen Effekte von silberhaltigen Rückseitenpads auf die Zelleistung, sollte die Padfläche minimiert werden. Es konnte demonstriert werden, dass eine große Anzahl kleinflächiger Rückseitenpads ähnlich niedrige Serienwiderstandsbeiträge aufweist wie ein durchgehendes Pad.

Die Möglichkeit zur signifikanten Reduzierung der benötigten Metallmenge für die Vorderseitenmetallisierung einer Multi-Busbar-Solarzelle wurde durch die Simulation belegt. Es wurde demonstriert, dass ein siebgedrucktes Grid einer komplett verschalteten Multi-Busbar-Solarzelle mit 6 mg Ag-Paste ausreichend metallisiert wäre, wenn es möglich wäre, 10  $\mu\text{m}$  breite Finger zu drucken. Hierbei konnten in der Simulation Wirkungsgrade bis 19,4 % für eine vollständig verschaltete Multi-Busbar-Solarzelle erreicht werden. Der optimierte Wirkungsgrad einer komplett verschalteten, siebgedruckten 3-Busbar-Solarzelle liegt bei 18,8 % und ist damit 0,6 %<sub>abs</sub> geringer.

Die Evaluation einer Ag-plattierten Vorderseite mit der Leitfähigkeit  $30 \times 10^6 \text{ S/m}$  ergab einen Silberverbrauch von 12 mg für eine vollständig verschaltete Multi-Busbar-Solarzelle mit 250  $\mu\text{m}$  breiten Drähten. Der Wechsel zu einer nickelbasierten Metallisierung würde den Metallverbrauch auf 20-25 mg erhöhen, jedoch ist Nickel sehr viel günstiger als Silber. Die optimale Drahtanzahl liegt bei 16-18 Drähten mit einem Drahtdurchmesser von 270-310  $\mu\text{m}$ . Es wurden Wirkungsgrade von 19,4 % für beide Metallisierungen berechnet.

Eine vollständig verschaltete 3-Busbar-Solarzelle konnte mit einer plattierten Ag-Metallisierung maximal einen Wirkungsgrad von 18,9 % erreichen und liegt damit 0,5 %<sub>abs</sub> unter dem maximal erreichbaren Wirkungsgrad einer Multi-Busbar-Solarzelle. Der Silberverbrauch im Optimum lag mit knapp 215 mg um 203 mg über dem einer Multi-Busbar-Solarzelle. Es wurde jedoch auch demonstriert, dass eine Reduzierung der Silbermenge um 50 mg den Wirkungsgrad nur leicht negativ beeinflusst. Die Optimierung der Vorderseitenmetallisierung auf Nickelbasis ergab einen Metallverbrauch über 500 mg bei einem maximalen Wirkungsgrad von 18,4 %. Die Plattierdauer würde sich mit einer Ni-Metallisierung stark erhöhen und geringe Wirkungsgrade erzielen, die 0,5 %<sub>abs</sub> unter der einer Ag-plattierten 3-Busbar-Solarzelle liegen.

Für die Multi-Busbar-Solarzelle scheint eine nickelbasierte Metallisierung durchaus attraktiv, da hohe Wirkungsgrade erreicht werden können. Die benötigte Nickelmenge ist gering und die Kosten für Nickel [101] sind im Vergleich zu denen von Silber deutlich niedriger [102].

## 3 Alternative Metallisierungsverfahren und deren Evaluation

In diesem Kapitel werden nasschemische Metallisierungsverfahren als Alternative zum weit verbreiteten Siebdruckverfahren diskutiert und evaluiert. Wie aus den Simulationen in Kapitel 2.5.1 ersichtlich, scheinen Plattierverfahren für das Multi-Busbar-Design besonders vielversprechend, da mit ihnen die benötigte Metallmenge gezielt dosiert werden kann.

Saatschichten auf Nickelbasis bieten zusätzlich die Möglichkeit, den Kontaktwiderstand zwischen der aufgetragenen Metallschicht und dem Emitter durch einen Temperaturschritt zu reduzieren, da an der Grenzfläche zwischen Nickel und dotiertem Silizium eine Legierung geformt werden kann, die den Kontaktwiderstand reduziert.

Die Substitution von Silber durch Nickel und Kupfer bietet zusätzlich finanzielle Anreize, da diese Metalle deutlich kostengünstiger sind.

Im Folgenden wird die generelle Funktionsweise einer nasschemischen Abscheidung erläutert. Des Weiteren werden unterschiedliche nasschemische Abscheidemethoden mit ihren Vor- und Nachteilen vorgestellt und evaluiert.

Abschließend wird auf das Phänomen der ungewollten Metallabscheidung (engl. Background Plating) auf dielektrischen  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schichten eingegangen und es werden Wege aufgezeigt, dieses zu vermeiden.

### 3.1 Der Plattierprozess

Ein Plattierprozess ist ein nasschemisches Abscheideverfahren. Hierbei scheiden sich Metallionen unter Zugabe von Elektronen aus einer wässrigen Elektrolytlösung auf ein Substrat ab. Primär handelt es sich bei solch einem Prozess um eine Redox-Reaktion. Das Substrat agiert dabei als Kathode, hat also ein negatives Potential. Werden für die Entladung der Metallionen die benötigten Elektronen von der Elektrolytlösung bereitgestellt, handelt es sich um eine außenstromlose oder chemische Abscheidung. Werden Elektronen von einer äußeren Stromquelle zugeführt, handelt es sich um eine elektrochemische Abscheidung, die umgangssprachlich auch als galvanische Abscheidung bezeichnet wird.

#### 3.1.1 Außenstromloses Plattieren

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die außenstromlose Metallabscheidung von Nickel-Phosphor-Schichten untersucht. Da dieses Abscheideverfahren durch eine Vielzahl von Reaktanten und Intermediaten komplex ist, orientiert sich die folgende Zusammenfassung der Prozesskinetik an einem Standardwerk der chemischen Vernicklung [103].

Zu Beginn soll ein vereinfachtes Reaktionsmodell beschrieben werden, das abschließend die Hauptmechanismen der Abscheidung berücksichtigt. Bei der verwend-

ten Plattiermethode handelt es sich um ein sogenanntes Reduktionsverfahren. Hierbei wird ein Reduktionsmittel (R) an der Oberfläche des zu beschichtenden Substrats oxidiert und gibt dabei Elektronen ( $e^-$ ) an diese ab (Gleichung 3.1). Je höher die Oxidationsstufe (n) des Reduktionsmittels, umso mehr Elektronen können freigesetzt werden:



Die auf der Substratoberfläche freigesetzten Elektronen können ihrerseits Metallionen ( $Me^{z+}$ ) aus der Lösung reduzieren, die sich somit auf der Substratoberfläche anlagern:

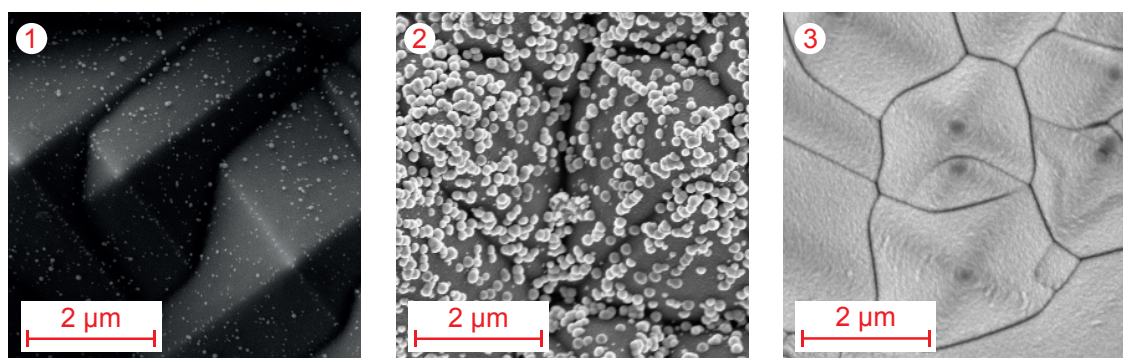


Dies kann vereinfacht wie folgt dargestellt werden:



Das abgeschiedene Metallatom agiert als Nukleationspunkt für folgende Metallionen, falls die Austrittsarbeit für die Elektronen aus dem abgeschiedenen Metall geringer ist als die Austrittsarbeit aus dem Substrat. Da dies für Siliziumsubstrate der Fall ist, wird im Verlauf der Reaktion eine Vergrößerung der Keime beobachtet. Die „Freiflächen“ auf dem Substrat werden im Laufe des Prozesses durch das Wachstum der Keime geschlossen, und es entsteht eine geschlossene Schicht.

Ein besonderer Vorteil von außenstromlosen Plattierverfahren liegt in der Erzeugung homogener Metallschichten. Die Abscheidegeschwindigkeit ist jedoch gering. Die drei Stadien des Wachstums einer metallischen Schicht, deren Austrittsarbeit niedriger ist als die des Substrats, sind in Abbildung 3.1 illustriert. Bei der aufplattierten Schicht handelt es sich um eine Legierung aus Nickel und Phosphor, die im nächsten Abschnitt genauer behandelt wird. Nach drei bis vier Minuten bildet sich eine geschlossene Ni/P-Schicht, die ca. 200-500 nm dick ist. Ein elektrisch leitfähiges Substrat oder ein Elektronenüberschuss auf dem Substrat wirkt zusätzlich katalytisch auf die Abscheidung. Hierdurch kann die Reaktion beschleunigt werden, was besonders in der Anfangsphase entscheidend ist [104]. Um die Abscheiderate zu erhöhen, kann zusätz-



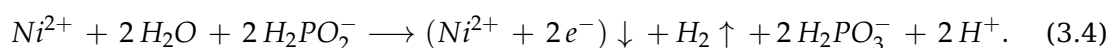
**Abb. 3.1:** Bildung einer metallischen Ni/P-Schicht durch außenstromlose Metallabscheidung auf einer alkalisch texturierten, n-dotierten Siliziumoberfläche. 1) Anfangsphase: Es bilden sich Nukleationspunkte aus (Plattierdauer: 1 min). 2) Wachstum der Keime (Plattierdauer: 2 min). 3) Die Keime sind zusammengewachsen. Es bildet sich eine homogene Schicht aus (Plattierdauer: 3-4 min).

lich die Metallionen-Konzentration oder die Temperatur der Lösung erhöht werden [105].

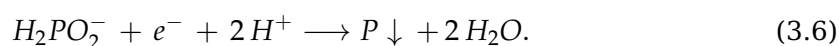
### 3.1.1.1 Außenstromloses Plattieren von Ni/P-Schichten

Das oben beschriebene Abscheidungsverfahren liefert das Grundverständnis für die Beschreibung des autokatalytischen Abscheidemechanismus einer außenstromlosen Metallabscheidung. Zur genaueren Beschreibung des Abscheidemechanismus der in dieser Arbeit verwendeten Plattierlösung muss das oben beschriebene Modell erweitert werden. Es wird eine phosphorhaltige Nickelschicht, also keine rein metallische Schicht, sondern eine Legierung, abgeschieden. Die oben beschriebene Reaktion wird dadurch erweitert. Aus Gründen der Verständlichkeit werden nur die grundlegenden Reaktionen beschrieben, die den Abscheidemechanismus einer phosphorhaltigen Nickelschicht erklären.

Ausgangspunkt ist eine wässrige Elektrolytlösung auf Basis von Nickelsulfat ( $\text{NiSO}_4$ ). Das Nickelsalz dient hierbei als Lieferant von Nickelionen, da es in der wässrigen Lösung dissoziiert. Zusätzlich wird Natriumhypophosphit ( $\text{Na}_2\text{H}_2\text{PO}_2$ ) als Reduktionsmittel in die Lösung gegeben. Natriumhypophosphit dissoziiert ebenfalls in wässriger Lösung. Die oben beschriebene allgemeine Reaktionsgleichung wird deshalb erweitert und lautet nun wie folgt:



Hierbei handelt es sich um den grundlegenden Reaktionsmechanismus der außenstromlosen nasschemischen Abscheidung. Nickelionen lagern sich unter Aufnahme von Elektronen an der Oberfläche des Substrates an ( $\downarrow$ ). Wasserstoff wird gebildet und gast aus ( $\uparrow$ ). In parallel laufenden Reaktionen kann Hypophosphit, das an der Oberfläche adsorbiert wird, über folgende Reaktionspfade atomaren Phosphor abscheiden:



So können zusätzlich Hydroxidionen (Gleichung 3.5) oder Wasser (Gleichung 3.6) entstehen. Die Menge des in die Nickelschicht eingebauten Phosphors hängt stark von Parametern wie Badtemperatur, pH-Wert der Lösung und dem Mischungsverhältnis der einzelnen Badkomponenten ab. Sie nimmt mit steigender Expositionszeit im Bad stetig zu. Die eingebaute Menge Phosphor kann hierbei zwischen einem Massenanteil von 1-14 %<sub>Gew</sub> variieren [106]. Die Konzentration der Phosphoratomate hat maßgeblichen Einfluss auf die elektrische Leitfähigkeit und die Härte, aber auch auf die Korrosionsbeständigkeit der abgeschiedenen Legierung. In Tabelle 3.1 ist eine Zusammenstellung der spezifischen elektrischen Widerstände von Ni/P-Legierungen mit unterschiedlicher P-Konzentration [107] dargestellt. Alle Widerstandswerte der Legierungen liegen um ein Vielfaches über dem Wert von kristallinem Nickel [103], wobei mit zunehmendem P-Anteil der Legierung der spezifische elektrische Widerstand der Legierung steigt.

Der außenstromlose Abscheide-Mechanismus von Ni/P-Schichten reagiert besonders empfindlich gegenüber Veränderungen der Badparameter. Temperatur, pH-Wert, die Belegung des Bads, aber auch die Konzentration aller Badkomponenten beeinflussen

**Tabelle 3.1:** Zusammenstellung des spezifischen elektrischen Widerstands von kristallinem Nickel und Ni/P-Legierungen mit unterschiedlichem Phosphorgehalt [103].

Phosphorgehalt in (% <sub>Gew</sub> )	spez. elektrischer Widerstand in ( $\mu\Omega\text{cm}$ )
Ni	6,93
1-3	30
5-7	50-70
8-9	70-100
>10	< 120

sowohl die Geschwindigkeit der Abscheidung als auch die Zusammensetzung der gebildeten Ni/P-Schicht und ihr Erscheinungsbild [108]. Hierdurch wird eine langfristige Verwendung eines Badansatzes erschwert, da eine permanente Kontrolle und Nachdosierung der Elektrolytlösung notwendig ist, um eine Abscheidung innerhalb definierter Parameter zu gewährleisten. Eine detaillierte Übersicht über den außenstromlosen nasschemischen Abscheidungsprozess von Ni/P-Schichten mit seinen Herausforderungen und Vorteilen wird in [109] vorgestellt.

Alternative nasschemische Plattierverfahren, welche bedeutend einfacher zu kontrollieren sind, sind durch elektrochemische Abscheidemethoden gegeben und werden im Folgenden behandelt.

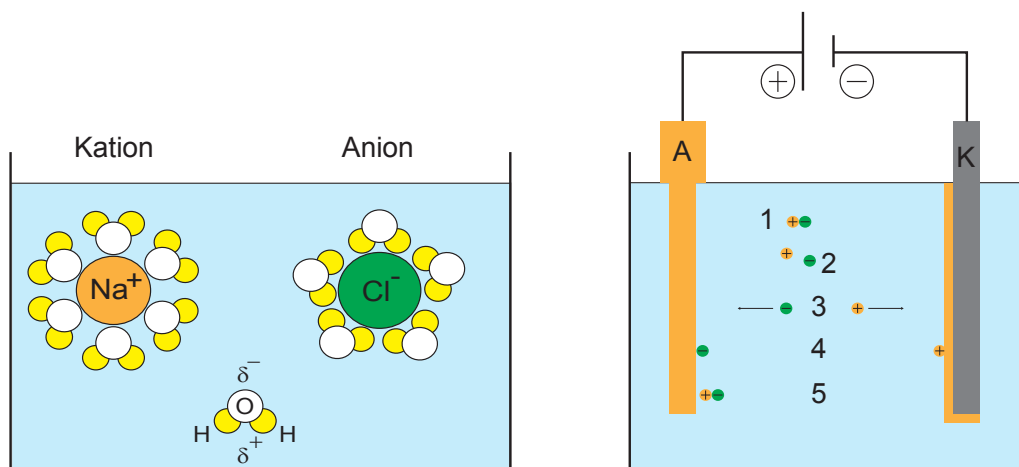
### 3.1.2 Elektrochemisches Plattieren

Wie bereits erwähnt unterscheidet sich die elektrochemische Abscheidung von der außenstromlosen Abscheidung dadurch, dass die Elektronenquelle nicht im Elektrolyten selber vorhanden ist. Die Elektronen werden über eine äußere Stromquelle zugeführt. Grundlage der elektrochemischen Abscheidung ist die elektrolytische Dissoziation. Das sich in wässriger Lösung befindende Molekül spaltet sich in elektrisch geladene Ionen auf. Für das elektrochemische Plattieren werden Metallsalze wie Kupfersulfat  $\text{CuSO}_4$ , Nickeldichlorid  $\text{NiCl}_2$  oder Silbernitrat  $\text{AgNO}_3$  verwendet. Das Salz dissoziiert in wässriger Lösung und bildet hydratisierte Ionen. Beispielhaft ist dieses Verhalten für den Fall von dissoziiertem Kochsalz in Abbildung 3.2 links illustriert. Wie im Schaubild angedeutet, spaltet sich das dissoziierte Molekül in ein positiv geladenes Kation und ein negativ geladenes Anion auf. Durch das Dipolmoment des Wassers werden Anion und Kation von Wassermolekülen „ummantelt“, also hydratisiert.

In Abbildung 3.2 rechts ist schematisch ein Plattierbecken für eine elektrochemische Abscheidung gezeigt. Der Abscheidemechanismus lässt sich wie folgt beschreiben:

Das sich in der Lösung befindende Molekül (1) dissoziiert (2) zu einem Anion und einem Kation. Durch das außen angelegte Potential wandert das Kation in Richtung der Kathode (K) und das Anion in Richtung Anode. Im folgenden Schritt (4) nimmt das Kation ein Elektron auf und scheidet sich an der Kathode ab. Das Anion wandert zur Anode, wird entladen und verbindet sich mit einem Kation, das sich von der Anode löst (5). Der Vorgang kann von Neuem beginnen.

Die Vorteile der elektrochemischen Abscheidung sind nun sichtbar. Für die Funktionsweise sind keine Reduktionsmittel notwendig. Die Elektrolytlösung wird nicht verbraucht, da durch die Anode Kationen nachgeliefert werden. Es ist keine Nachdosierung der Lösung und stetige Überwachung des pH-Werts notwendig. Die Reaktion



**Abb. 3.2:** Links: Dissoziiertes NaCl-Molekül in wässriger Lösung. Durch das Dipolmoment des Wassers werden Anion und Kation von Wassermolekülen umlagert. Rechts: Schematische Darstellung des elektrochemischen Abscheidungsprozesses. K = Kathode, A = Anode. (1) Metallsalz. Das Metallsalz dissoziiert (2). Anion und Kation wandern zur Anode und Kathode (3). (4) Das Kation scheidet sich unter Aufnahme eines Elektrons an der Kathode ab. (5) Das Anion gibt seine Ladung ab und kann ein Kation aus der Anode lösen.

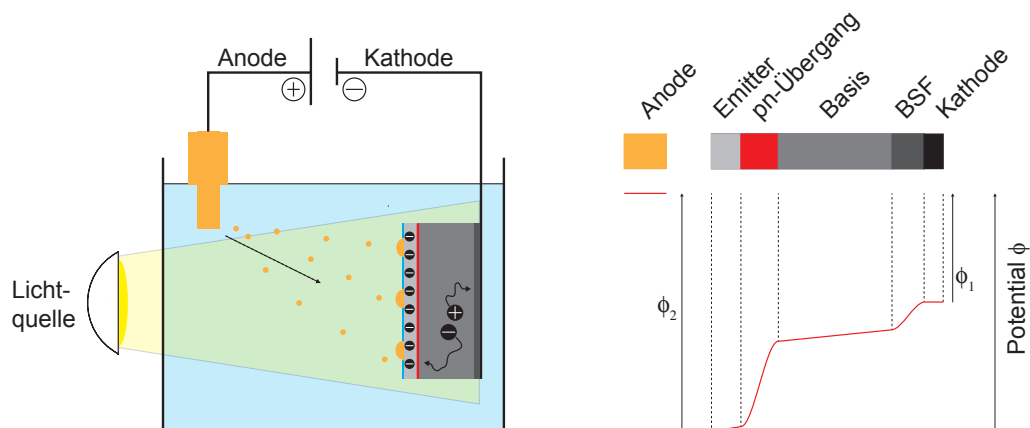
verläuft bei konstanter Temperatur homogen. Über das außen anliegende Potential lässt sich die Reaktionsgeschwindigkeit präzise steuern. Das einzige Verbrauchsmaterial stellt die Anode selbst dar. Sie kann jedoch mit geringem Aufwand schnell gewechselt werden. Für eine besonders homogene Abscheidung spielen die Geometrie der Anode und die Abscheiderate eine entscheidende Rolle [110, 111].

Der Nachteil der Abscheidung besteht darin, das Substrat kontaktieren zu müssen. Dies ist bei einer außenstromlosen Abscheidung nicht der Fall. Für die Metallisierung der Solarzellen bedeutet dies, dass abhängig vom Zelldesign eine gewisse Anzahl von Kontaktspitzen auf die zu metallisierenden Stellen aufgebracht werden muss. Dies stellt für das Design der Multi-Busbar-Solarzelle eine besondere Herausforderung dar, da die einzelnen Finger, im Gegensatz zu einer 3-Busbar-Solarzelle, nicht miteinander verbunden sind (siehe Abbildung 1.5 aus Kapitel 1.2.2). Jeder Finger müsste deshalb einzeln kontaktiert werden. Ein alternatives Verfahren, das im nächsten Abschnitt beschrieben wird, umgeht diese Problematik.

### 3.1.3 Lichtinduziertes elektrochemisches Plattieren

Eine Abwandlung des elektrochemischen Plattierens stellt das Verfahren des lichtinduzierten elektrochemischen Plattierens (engl. Light Induced Plating = LIP) dar, bei dem die Kathode zusätzlich mit einer Lichtquelle bestrahlt wird. Dieses Verfahren wurde 1979 von Durkee patentiert [112] und in den 80er Jahren für Halbleiterbauelemente weiterentwickelt [113].

In Abbildung 3.3 links ist schematisch ein LIP-Aufbau dargestellt. Links im Bild ist die Lichtquelle abgebildet. Sie beleuchtet eine Solarzelle, die sich in der Elektrolytlösung befindet. Ihr Rückkontakt ist mit der Kathode verbunden. Zusätzlich sind schematisch einige Kationen eingezeichnet, die sich von der Anode in Richtung Kathode bewegen und sich auf der Frontseite der Solarzelle abscheiden. Zwischen Anode und



**Abb. 3.3:** Links: Aufbau zum lichtinduzierten elektrochemischen Plattieren. Kationen lösen sich von der Anode und scheiden sich an der Frontseite der Solarzelle ab. Rechts: Potentialdifferenz zwischen Anode, Kathode mit schematischem Potentialverlauf in der Solarzelle.

Kathode liegt, wie bei der galvanischen Abscheidung, ein äußeres Potential an. Im Gegensatz zur elektrochemischen Abscheidung bildet sich bei der lichtinduzierten elektrochemischen Abscheidung aufgrund der Nutzung einer Solarzelle an der Kathode eine Potentialdifferenz zwischen Front- und Rückseite aus. Diese Potentialdifferenz entsteht, da eine Solarzelle unter Beleuchtung durch Ladungstrennung ein Potential zwischen Emitter und Basis aufbaut. Zusätzlich entsteht durch den Anstieg der Dotierstoffkonzentration an der Rückseite ein zusätzliches Potentialgefälle. Fließt bedingt durch die Abscheidung ein Strom, fällt im Emitter und in der Basis zusätzlich über ihren Eigenwiderstand eine Spannung ab. Der Potentialverlauf in der Solarzelle ist schematisch in Abbildung 3.3 rechts dargestellt. Zu bemerken ist hier, dass aus Anschauungsgründen die Dimensionen und die Potentialdifferenzen der Solarzelle nicht maßstabsgetreu dargestellt sind. Die Potentialunterschiede zwischen Anode, Kathode und Frontseite der Solarzelle lassen sich wie folgt beeinflussen:

Die Potentialdifferenz  $\phi_1$  zwischen Anode und Kathode lässt sich durch ein Netzgerät regeln. Die Potentialdifferenz  $\phi_2$ , die zwischen Anode und der Vorderseite der Solarzelle anliegt, wird zusätzlich durch die generierte Spannung der Solarzelle bestimmt. Sie hängt von der Intensität der Lichtquelle ab. Es versteht sich, dass die Lichtquelle Photonen emittieren muss, deren Energie groß genug ist, um Elektron-Loch-Paare zu erzeugen. Da die Bandlücke von Silizium im Bereich von 1,12 eV bei Raumtemperatur liegt, können Photonen geringerer Energie nicht zur Ladungstrennung in der Solarzelle beitragen [114]. Es ist zusätzlich darauf zu achten, dass die Absorption der Photonen im Becken die Temperatur des Bades nicht beeinflusst. Die Lage der Potentiale zueinander bestimmt maßgeblich den Abscheidemechanismus. Für eine optimale Metallabscheidung auf der Frontseite sollte das Verhältnis  $\phi_2$  zu  $\phi_1$  bei zwei liegen [115]. Detaillierte Untersuchungen zur Optimierung der Abscheideparameter und ihre Einflüsse auf das Plattierverhalten von Front- und Rückseite des Substrates wurden in [116, 117, 118] durchgeführt. Alternativ kann die Abscheidung auch bei periodisch variierendem Potential durchgeführt werden. Dieser Vorgang wird als gepulste Abscheidung bezeichnet. Hierdurch kann Einfluss auf die Härte, die Körnung und die Homogenität der Schicht genommen werden [119, 115].

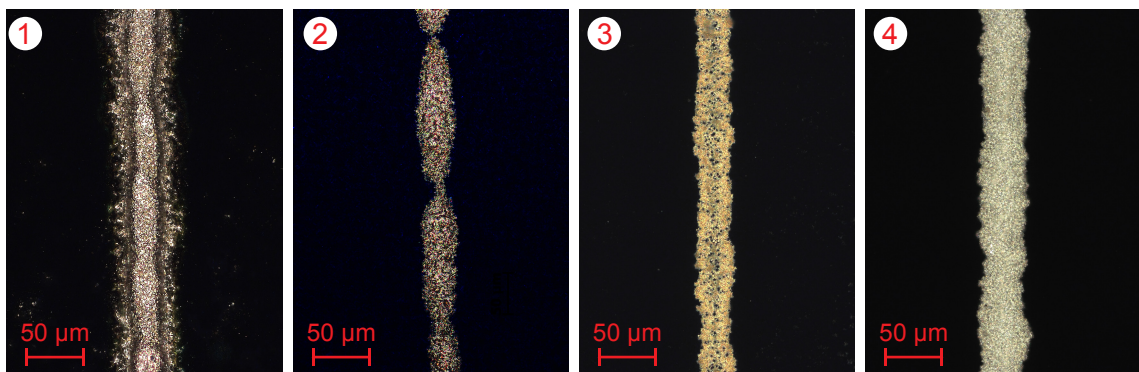
## 3.2 Öffnen der $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schicht

Das Plattieren der Vorderseite einer Solarzelle setzt voraus, dass die Emitterstruktur direkten elektrischen Kontakt zur Plattierlösung besitzt. Dies ist in der Regel nicht der Fall, da sie von einer dielektrischen  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schicht bedeckt wird (siehe Abschnitt 1.1.5). Zum Öffnen der dielektrischen Schicht steht eine Vielzahl von Verfahren zur Verfügung. Die Verfahren, die im Rahmen dieser Arbeit untersucht wurden, werden im Folgenden vorgestellt und ihre Vor- und Nachteile diskutiert.

### 3.2.1 Kontaktierung der Emitterstruktur mittels Druckverfahren

Das naheliegendste Verfahren besteht darin, eine möglichst dünne Leiterbahn mithilfe von Druckverfahren auf die  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schicht aufzubringen und diese Struktur anschließend durch Plattieren zu verstärken. Die verwendeten Pasten oder Tinten müssen allerdings nach dem Druckschritt zusätzlich noch den Kontakt zur Emitterstruktur bilden. Dies wird durch einen Hochtemperaturschritt in einem Gürtelofen (siehe Kapitel 1.1.6) bewerkstelligt. Die Verwendung von sauren oder alkalischen Plattierlösungen kann sich negativ auf die Adhäsion zwischen der Saatschicht und der plattierten Metallisierung auswirken [120, 121].

In dieser Arbeit wurden zur Herstellung von plattierten Ag-Schichten Ag-Siebdruck- und Tintenstrahldruck-Verfahren mit Ag-Nanopartikeln evaluiert. In Abbildung 3.4 ist eine Zusammenstellung von Lichtmikroskop-Bildern unterschiedlich aufgebrachtener Strukturen dargestellt. Alle Strukturen wurden auf alkalisch texturierte Oberflächen aufgebracht, die eine  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schicht aufweisen. Bild eins zeigt einen siebgedruckten Ag-Finger. Er wurde mit einem besonders feinmaschigen Sieb gedruckt und erreicht somit Breiten im Bereich von  $50\ \mu\text{m}$ . Die ermittelte Höhe liegt bei ca.  $13\ \mu\text{m}$ , die Einschnürungen haben eine Höhe von ca.  $5\ \mu\text{m}$ . Für die Metallisierung einer Multi-Busbar-Solarzelle ist dieses Verfahren trotz des eher hohen Linienwiderstands von ca.  $0,5\ \Omega/\text{cm}$  ausreichend. Eine 3-Busbar-Solarzelle kann von dieser Drucktechnik hingegen nicht profitieren, da der Gewinn durch eine geringe Abschattung im Vergleich zu den Verlusten durch einen zu hohen Serienwiderstandsbeitrag der Finger nicht kompensiert werden kann.



**Abb. 3.4:** Alkalisch texturierte Oberfläche mit  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schicht und 1. Feinlinien Siebdruckfinger. 2. Siebgedruckte Saatschicht. 3. Tintenstrahlgedruckte Saatschicht. 4. Tintenstrahlgedruckte Saatschicht, die mittels Ag-LIP-Verfahren verstärkt wurde.

Im zweiten Bild ist ein siebgedruckter Ag-Nanopartikel-Finger abgebildet. Besonders auffällig sind hier die Einschnürungen, die durch das verwendete Sieb hervorgerufen wurden. Die Breite der Struktur liegt ebenfalls im Bereich von  $50\ \mu\text{m}$ , die Einschnürungen sind teilweise nur wenige Mikrometer breit. Die maximale Höhe des untersuchten Fingers lag bei ca.  $7\ \mu\text{m}$ . Bedingt durch die Einschnürungen der Fingerstruktur und die großen Höhenvariationen des Fingers sowie die geringe Leitfähigkeit der Paste, ist der Linienwiderstand recht hoch. Er wurde zu  $(6,6 \pm 0,4)\ \Omega/\text{cm}$  bestimmt. Es ist also erforderlich solche Strukturen mit einer Deckschicht (engl. Base Layer) zu verstärken, um einen ausreichend niedrigen Linienwiderstand des Fingers zu gewährleisten.

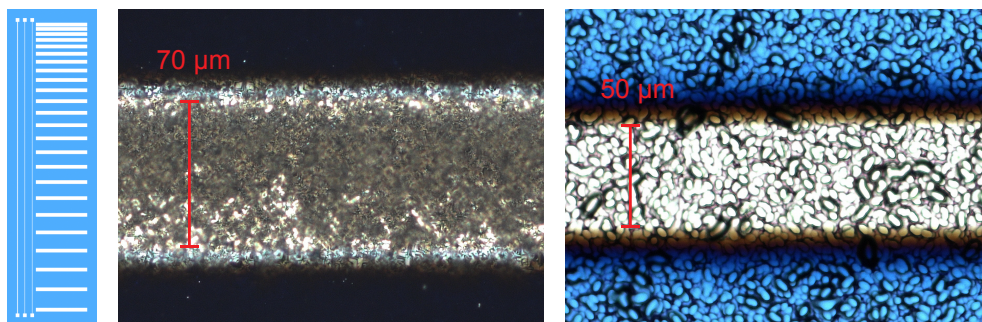
Das dritte Bild zeigt eine mithilfe eines Tintenstrahldruckers abgeschiedene Ag-Nanopartikel-Saatschicht. Auch hier sind Breitenvariationen sichtbar. Diese sind allerdings nicht so ausgeprägt wie beim Siebdruck von Ag-Nanopartikeln in Bild 2. Bedingt durch das Verfahren entstehen keine Einschnürungen, jedoch kann es bei Veränderung der Tintentropfengröße zu Breitenvariationen der Saatschicht kommen. Die Breite variiert zwischen  $30\text{-}40\ \mu\text{m}$ . Bei genauerer Betrachtung der Saatschicht sind kleine dunkle Bereiche auf der Schicht erkennbar. Sie werden durch die Pyramidenspitzen der strukturierten Oberfläche hervorgerufen. Die Dicke der abgeschiedenen Schicht variiert im Bereich zwischen  $1\text{-}5\ \mu\text{m}$ . Solch eine Schicht weist ebenfalls sehr hohe Linienwiderstände auf und wird deshalb ebenfalls durch einen Plattierschritt verstärkt. Der gemessene Linienwiderstand liegt bei  $(14,3 \pm 0,5)\ \Omega/\text{cm}$ .

Im vierten Bild wurde mithilfe des lichtinduzierten Ag-Plattierens eine Deckschicht auf eine tintenstrahlgedruckte Saatschicht aufplattiert. Die Dicke der Schicht beträgt ca.  $3\text{-}5\ \mu\text{m}$ . Die Breite des so erhaltenen Fingers liegt im Bereich  $40\text{-}50\ \mu\text{m}$ . Solch eine Struktur bietet einen ausreichenden Linienwiderstand für eine Multi-Busbar-Solarzelle mit 15 Drähten. Sie liegt bei ca.  $1,2\text{-}2\ \Omega/\text{cm}$  für die angegebene Schichtdicke.

### 3.2.2 Nasschemisches Öffnen der $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schicht

Beim nasschemischen Öffnen der  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schicht wird die Oberfläche der Solarzelle mit einem Schutzlack oder Wachs partiell bedeckt und der offenliegende Bereich der  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schicht anschließend mithilfe von wässriger Flusssäurelösung ( $\text{HF}_{\text{aq}}$ ) entfernt. Zum Herstellen solch einer Struktur können photolithografische Prozesse verwendet werden, bei denen ein UV-Licht-sensitiver Lack vollflächig auf die  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schicht aufgebracht wird. Dieser wird anschließend mithilfe einer Schattenmaske partiell belichtet. Die belichteten Bereiche des Photolacks werden anschließend durch eine Entwicklerlösung entfernt. Als Endprodukt verbleibt eine partiell geöffnete Lackschicht auf dem Substrat. Das belackte Substrat wird in einem Ofen bei ca.  $100\ ^\circ\text{C}$  ausgehärtet, um eine möglichst hohe Stabilität des Lacks zu gewährleisten. Eine ausführliche Beschreibung des photolithografischen Prozesses wird in [122] gegeben.

In Abbildung 3.5 sind eine TLM-Struktur, auf die im folgenden Kapitel eingegangen wird, sowie Lichtmikroskop-Aufnahmen von geöffneten Strukturen, die bereits plattiert wurden, abgebildet. Hierbei handelt es sich um ein alkalisch texturiertes (Mitte) und ein sauer texturiertes (rechts) Substrat. Mit dem Photolithografie-Verfahren lassen sich fein definierte Strukturen mit hoher Homogenität herstellen. Die plattierten Bereiche sind  $50\ \mu\text{m}$  beziehungsweise  $70\ \mu\text{m}$  breit und entsprechen exakt den Bereichen der Schattenmaske. Es ist allerdings durch den farblichen Verlauf der  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schicht zu erkennen, dass der Photolack in den Grenzbereichen durch die wässrige Flusssäure

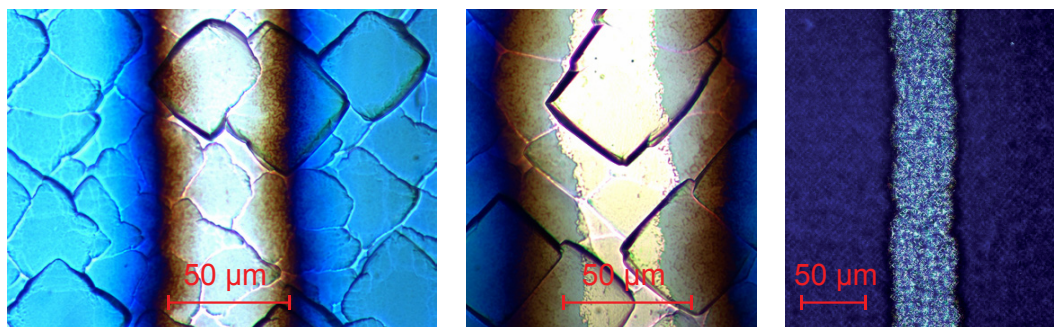


**Abb. 3.5:** Links: Skizze einer TLM Struktur. Mitte, rechts: Photolithografisch hergestellte Strukturen auf texturierten Oberflächen (Mitte alkalisch, rechts sauer), die  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schicht wurde geöffnet und außenstromlos Ni/P plattiert. Die Breite der abgeschiedenen Metallschicht stimmt mit der Öffnungsbreite überein. Die  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schicht wurde an den Kanten leicht unterätzt. Ein farblicher Verlauf ist sichtbar.

relösung leicht unterätzt wurde. Als Alternative zu diesen aufwendigen photolithografischen Prozessen kann mit einem Tintenstrahldrucker eine Wachsschicht auf die  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Oberfläche aufgebracht werden. Vorteil hierbei ist, dass direkt die gewünschte Struktur auf das Substrat aufgebracht werden kann. Das Belichten und Entwickeln der Schutzschicht entfällt somit in diesem Prozess. Allerdings sind die Strukturen, die sich mit diesem Verfahren herstellen lassen, durch die Größe der Tinten-/Wachstropfen limitiert. Eine weitere Herausforderung stellt das Unterätzen der Wachsschicht dar. In Abbildung 3.6 links ist die KOH-geätzte Oberfläche eines Si-Wafers mit  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schicht zu sehen. Der mittlere Bereich der  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schicht wurde nach dem oben beschriebenen Verfahren geöffnet und die Wachsmaske entfernt. Durch den farblichen Verlauf ist die Unterätzung der  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schicht sichtbar. Der farbliche Verlauf lässt erkennen, dass eine Unterätzung stattgefunden hat. Der unterätzte Bereich ist hierbei ähnlich groß wie der vollständig geöffnete. Im mittleren Bild wurde durch außenstromloses Ni-Plattieren eine dünne metallische Schicht aufgebracht. Deutlich zu erkennen sind Schwankungen in der Breite der Ni/P-Schicht. Auch hier ist die starke Unterätzung der  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schicht deutlich sichtbar. Nur der helle, gelbliche Bereich in der Mitte wurde plattiert. Die Unterätzung ist hier fast doppelt so breit wie die plattierte Struktur. Im rechten Bild hingegen wurde die  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schicht kaum unterätzt. Allerdings werden auch hier große Breitenvariationen der Schicht sichtbar.

Prinzipiell eignet sich die Tintenstrahltechnik zur Maskierung von  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schichten. Eine Metallabscheidung auf den geöffneten Strukturen ist möglich, allerdings entstehen durch das Unterätzen der  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schicht weitere Herausforderungen. Die  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schicht dient als Diffusionsbarriere für Fremdstoffe. Dies ist besonders beim Kupferplattieren unabdingbar. Wird die Schicht angeätzt, ist es fraglich, ob sie diese Funktion noch erfüllen kann. Zusätzlich verändern sich die Licht-Einkopplungseigenschaften der Schicht stark, und die passivierenden Eigenschaften werden verringert.

Ähnlich dem photolithografischen Prozess können die Haftungseigenschaften der aufgetragenen Wachsschicht durch eine Wärmebehandlung optimiert werden. Hierfür wird das bewachste Substrat bei  $60^\circ\text{C}$  für wenige Sekunden auf eine Heizplatte gelegt. Das Wachs schmilzt auf und kann dadurch einen besseren Kontakt zur Oberfläche bilden. In Abbildung 3.6 rechts ist solch ein Substrat zu sehen. Das Unterätzen der  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schicht kann hier erfolgreich verhindert werden, allerdings zeigt der geöffnete



**Abb. 3.6:** Maskierung mittels Tintenstrahldruck-Technologie. Links: Nasschemisch geöffnete  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schicht. Deutlich zu erkennen ist der Farbverlauf der Schicht, der darauf hindeutet, dass die Schutzschicht unterätzt wurde. Mitte: Abgeschiedenen Ni/P-Schicht auf geöffneter Struktur. Die metallische Schicht weist starke Variationen in der Breite auf. Rechts: Geöffnete  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schicht auf texturierter Oberfläche. Es ist kaum noch Unterätzung sichtbar, die Variation in der Breite der geöffneten Struktur ist deutlich zu erkennen.

Bereich noch Variationen in der Breite.

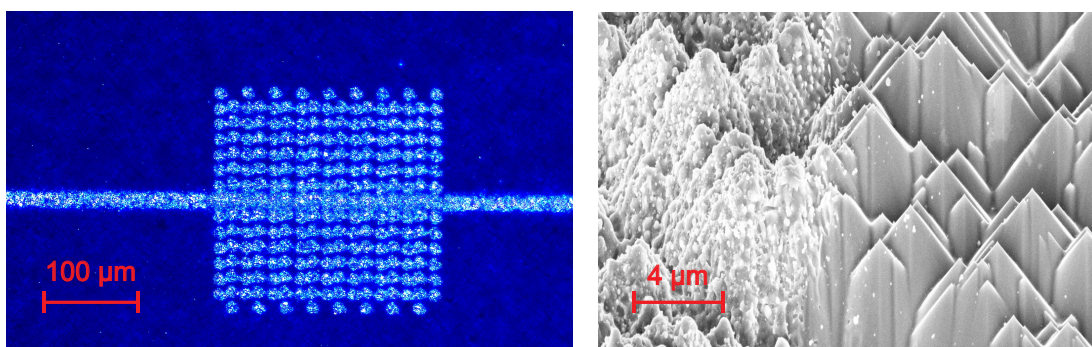
Für grundlegende Untersuchungen des Plattierverhaltens lässt sich diese Technik nutzen. Für Untersuchungen der Kontakteigenschaften, insbesondere von wärmebehandelten Ni/P- oder Ni-Schichten, ist diese Technik jedoch nicht geeignet, da durch die große Breitenvariation von über  $10\ \mu\text{m}$  keine verlässliche Messung des Kontaktwiderstands getätigt werden kann. Auf diesen Zusammenhang wird in Kapitel 3.3.3 noch ausführlich eingegangen.

### 3.2.3 Öffnen der $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schicht durch Laserablation

Eine weitere Möglichkeit,  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schichten zu öffnen, besteht in der Nutzung eines Lasers. Zwei mögliche Varianten seien hier genannt. Beim sogenannten LCP-Verfahren (engl. Laser Chemical Processing) schmilzt ein in Phosphorsäure geführter Laserstrahl die Si-Oberfläche samt  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schicht auf. Gleichzeitig werden Phosphoratom in die Schmelze integriert und dotieren das Material zusätzlich. Ein selektiver Emitter bildet sich aus [123, 124]. Nachteile dieses Verfahrens sind die hohen Phosphorkonzentrationen der zusätzlich dotierten Bereiche und die Schädigung des Wafers, die zu hoher Rekombination in den bearbeiteten Bereichen führen.

Ein zweites Verfahren zielt darauf ab, ausschließlich die  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schicht zu ablatieren und so die Emitterstruktur offen zu legen. Hierzu werden vorrangig Nano- oder Pikosekundenlaser, aber auch Femtosekundenlaser mit einer Wellenlänge von  $355\ \text{nm}$  verwendet [125, 126]. Die Herausforderung bei diesem Verfahren besteht darin, die Emitterschicht möglichst wenig zu schädigen. Untersuchungen der ablatierten Oberfläche zeigen, dass sich durch Interferenzeffekte an der strukturierten Oberfläche Intensitätsmaxima bilden, die die Intensität des eigentlichen Laserpulses verstärken und so die Oberfläche schädigen können [127]. Es ist somit notwendig, die Intensität der Laserpulse möglichst konstant zu halten und gleichzeitig die Intensität der Pulse so weit zu verringern, dass der Emitterstruktur möglichst wenig Schaden zugefügt wird.

In Abbildung 3.7 ist auf der linken Seite eine texturierte Oberfläche mit partiell geöffneter  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schicht abgebildet, die mithilfe eines UV-Pikosekundenlasers geöffnet



**Abb. 3.7:** Links: Mit UV-Pikosekundenlaser geöffnete  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schicht, ein durchgehender Finger und eine Padstruktur sind sichtbar. Rechts: REM-Aufnahme einer pyramidentexturierten Oberfläche, auf der linken Seite wurde mit einem Laser ablatiert. Es ist deutlich erkennbar, dass die Pyramiden angeschmolzen wurden.

wurde. Auf der rechten Seite ist eine Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme (REM) einer partiell laserablatierten, alkalisch texturierten Oberfläche dargestellt. Die linke Seite der texturierten Oberfläche ist durch die hohe Intensität aufgeschmolzen. Die rechte Seite wurde nicht mit dem Laser bearbeitet. Das starke Aufschmelzen der Emitterstruktur verursacht eine Änderung des Emitterprofils und führt zusätzlich zur Störung der Kristallstruktur. Durch die stark aufgeraute Oberfläche verbessern sich allerdings die Haftungseigenschaften der aufplattierten Metallschicht. Detaillierte Untersuchungen des Ablationsverhaltens glatter und texturierter dotierter Oberflächen mit  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Beschichtung wurden in [128, 129] durchgeführt.

### 3.3 Untersuchung der Kontakteigenschaften von gesinterten Ni-Schichten

Der Kontaktwiderstand zwischen einer plattierten Ni-Schicht und dem Si-Substrat kann durch einen Temperaturschritt verbessert werden. Bei ausreichender Temperatur fangen die Nickelatome aus der aufplattierten Schicht an, in das Si-Material zu diffundieren und eine Legierung zu bilden. Dieser Vorgang wird auch als Sintern bezeichnet. Abhängig von der herrschenden Temperatur können sich unterschiedliche Silizide bilden. In Tabelle 3.2 sind die sich bildenden Silizide sowie deren Bildungstemperatur und ihr spezifischer elektrischer Widerstand aufgelistet [107, 130, 131]. Physikalisch kann die Verbesserung der Kontakteigenschaften mit einer Absenkung der Schottky-Barriere zwischen Metall und Halbleiter erklärt werden [132]. Es können durch die Bildung der Legierung Kavitäten zwischen Metall und Halbleiter entstehen, die zu geringer Adhäsion der Schicht führen [133]. Die Kavitäten entstehen durch den sogenannten Kirkendall-Effekt, bei dem sich in einem Zweikomponenten-System unter Temperatureinwirkung das Volumen der einen Phase verringert und sich das Volumen der zweiten Phase vergrößert [134, 135, 136].

Wird nach dem Sinterprozess das überschüssige Metall entfernt und erneut auf die Nickelsilizid-Oberfläche plattiert, entsteht anschließend eine Verbundschicht mit hohen Adhäsionseigenschaften [133, 137, 138], da die Kavitäten durch den Plattiervorgang aufgefüllt werden.

**Tabelle 3.2:** Zusammenstellung des spezifischen elektrischen Widerstands für Ni/Si-Legierungen und kristallines Nickel [107, 130, 131].

Material	spez. elektrischer Widerstand in ( $\mu\Omega\text{cm}$ )	Bildungstemperatur in ( $^{\circ}\text{C}$ )
Ni (kristallin)	6,93	
Ni <sub>2</sub> Si	25	ca. 200
NiSi	20	350-750
NiSi <sub>2</sub>	35	450-750

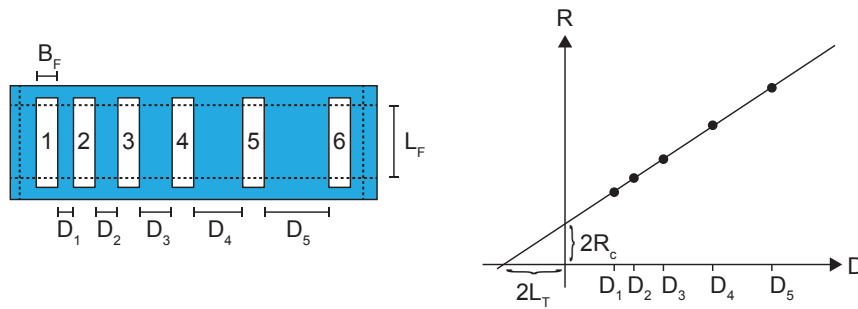
Eine Herausforderung für den Sinterprozess stellt das ungewollte Kurzschließen der Raumladungszone dar. Diffundiert das Nickel aufgrund von erhöhter Sinterteremperatur oder -dauer zu tief in die Emitterstruktur und erreicht die Raumladungszone, besteht die Gefahr, dass dies zu einem Kurzschluss zwischen Emitter und Basis führt [139, 140].

Der Kontakt zwischen einem Halbleiter und einem Metall kann mit dem Schottky-Modell beschrieben werden [141]. Zwischen dem Metall und dem Halbleiter bildet sich aufgrund der unterschiedlichen Fermi-Energien eine Potentialbarriere an der Grenzfläche aus. Je nach Höhe und Breite dieser Potentialbarriere wird zwischen drei Formen des Ladungstransports unterschieden. Bei thermischer Emission ist die Barrierenbreite aufgrund der geringen Dotierung groß. Ladungsträger können nur vereinzelt, thermisch angeregt, über die Potentialbarriere gelangen. Feldemission tritt an Grenzflächen mit hochdotierten Halbleitern auf. Die Breite der Potentialbarriere ist gering und kann von den Ladungsträgern somit durchtunnelt werden. Der dritte Fall ist eine Mischung aus thermischer- und Feldemission. Hauptsächlich hängt die Breite der Potentialbarriere von der Dotierung des Halbleiters ab, die Barrierenhöhe wird durch die Dotierung nur gering beeinflusst. Da es sich hier jedoch um ein vereinfachtes Modell handelt, soll erwähnt werden, dass die Form der Potentialbarriere zusätzlich von der Temperatur, der Oberflächenbeschaffenheit [142] und dem Material [143] abhängt [144].

### 3.3.1 Bestimmung des spezifischen Kontaktwiderstands

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Kontakteigenschaften von Ni/P-Schichten mithilfe des TLM-Verfahrens untersucht [141]. Zum besseren Verständnis soll kurz erläutert werden, wie das TLM-Verfahren angewendet wird und welche Herausforderungen es mit sich bringt. TLM steht für Transferlängenmethode (engl. Transfer Length Method) und wird im Folgenden beschrieben.

In Abbildung 3.8 links ist der schematische Aufbau einer TLM-Probe dargestellt. Aus Gründen, die in den vorherigen Kapiteln erläutert wurden, werden zum Strukturieren der SiN<sub>x</sub>:H-Schicht photolithografische Prozesse verwendet, die die aufgetragenen Metallschichten besonders gut definieren. Dies ist Voraussetzung für eine möglichst exakte Bestimmung des spezifischen Kontaktwiderstands, der die Kontaktgüte zwischen Halbleiter und Metall definiert.



**Abb. 3.8:** Links: TLM-Struktur zur Bestimmung des spezifischen Kontaktwiderstands. Rechts: Widerstandswerte aufgetragen über den Abstand  $D$  zwischen den einzelnen Kontaktflächen.

Für die Bestimmung des spezifischen Kontaktwiderstands wird der Widerstand zwischen den metallisierten Bereichen (1 - 2, 2 - 3,...) mithilfe einer Vierpunktmessung ermittelt. Zuvor muss der Bereich zwischen den metallisierten Flächen (Abb. 3.8 links, in weiß) und dem darunterliegenden Emitter getrennt werden, um eine genau definierbare Geometrie der Struktur herzustellen. In der Zeichnung ist dies durch die gestrichelten schwarzen Linien angedeutet. Die durch die Messung erhaltenen Widerstandswerte werden, wie in Abbildung 3.8 gezeigt, über den Abstand der Proben aufgetragen. Durch einen linearen Fit können der x- und y-Achsenabschnitt extrapoliert werden. Über die Steigung der Geraden kann eine Aussage über den Schichtwiderstand der Probe getroffen werden. Der Kontaktwiderstand und die Transferlänge werden über die Achsenabschnitte ermittelt. Folgende Annahmen werden für die Bestimmung des spezifischen Kontaktwiderstands verwendet:

- Die Oberflächen sind nicht strukturiert.
- Es besteht ein vollflächiger homogener Kontakt zwischen Metall und Halbleiter.
- Die Metallisierung bildet eine Äquipotentialfläche aus.
- Die Transferlänge muss mindestens 1,5 mal kleiner sein als die Breite des Kontakts.
- Die Emitterstruktur unter den Kontaktbereichen ändert sich durch die Metallisierung nicht.
- Eine lineare Extrapolation ist notwendig, um die Transferlänge zu bestimmen.

Mit diesen Annahmen kann die Transferlänge  $L_T$ , die Länge über die ein Großteil ( $1 - 1/e \sim 63\%$ ) des Stroms vom Halbleiter in das Metall gelangt, definiert werden:

$$L_T = \sqrt{\frac{\rho_c}{R_{sh}}} \quad (3.7)$$

Hierbei ist  $R_{sh}$  der Schichtwiderstand des Emitters und  $\rho_c$  der spezifische Kontaktwiderstand zwischen Halbleiter und Metall. Unter Verwendung der oben getätigten

Annahmen und Zuhilfenahme von Gleichung 3.7 ergibt sich für den gemessenen Widerstand  $R_i$  folgender Zusammenhang:

$$R_i = \frac{R_{sh}}{L_F} (D_i + 2L_T). \quad (3.8)$$

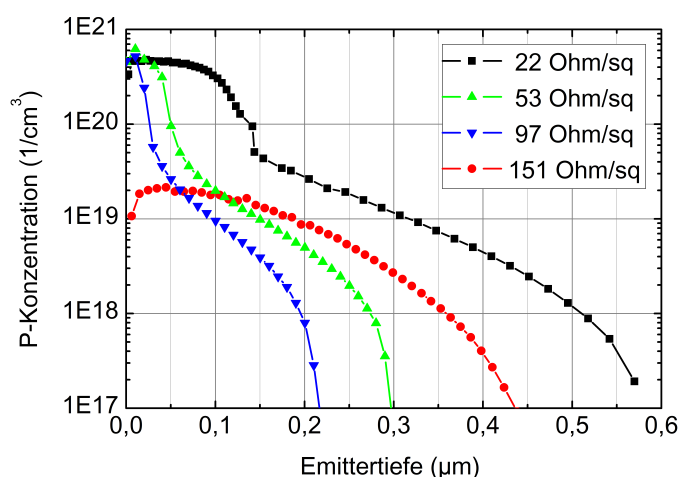
Die detaillierte Herleitung der verwendeten Gleichungen mit den getätigten Näherungen ist in [141] zu finden. Mit den Widerstandswerten  $R_i$  aus der Vierpunktmessung und den Gleichungen 3.7 und 3.8 lässt sich somit der spezifische Kontaktwiderstand zwischen Metall und Halbleiter ermitteln.

Anmerkung: Für die genaue Bestimmung geringer Kontaktwiderstände ist die exakte Ermittlung der Probengeometrie besonders wichtig. Schon geringe Abweichungen von einigen Mikrometern können dazu führen, dass die Extrapolation des Kontaktwiderstands und der Transferlänge scheitert, da die Fitgerade nicht mehr durch den zweiten Quadranten des Koordinatensystems läuft. Können die Abstände zwischen den Fingern und die Geometrie der Finger nicht genau ermittelt werden, sind die Messwerte stark fehlerbehaftet.

### 3.3.2 Untersuchung von Ni/P-Schichten

Mithilfe der in Kapitel 3.3.1 beschriebenen TLM-Methode ist es möglich, den spezifischen Kontaktwiderstand von Ni/P-Schichten auf unterschiedlich dotierten Emittoren zu bestimmen. Wie in Kapitel 3.3 bereits erwähnt, kann der Kontaktwiderstand zwischen Nickel- und Emitterschicht durch einen Sinterschritt verringert werden. Die folgenden Untersuchungen widmen sich diesem Thema.

Für die Untersuchung des spezifischen Kontaktwiderstands auf unterschiedlichen Emittoren bei variabler Sintertemperatur wurden alkalisch texturierte Cz-Si-Proben in einem Rohrofen diffundiert. Folgende Emitterschichtwiderstände und -profile wurden anschließend mithilfe einer ECV-Messung ermittelt (22, 53, 97, 151  $\Omega/\text{sq}$ ). Die Dotierprofile werden in Abbildung 3.9 wiedergegeben. Der Emitter mit einem Schichtwiderstand von 151  $\Omega/\text{sq}$ , der in Rot dargestellt ist, unterscheidet sich von den anderen

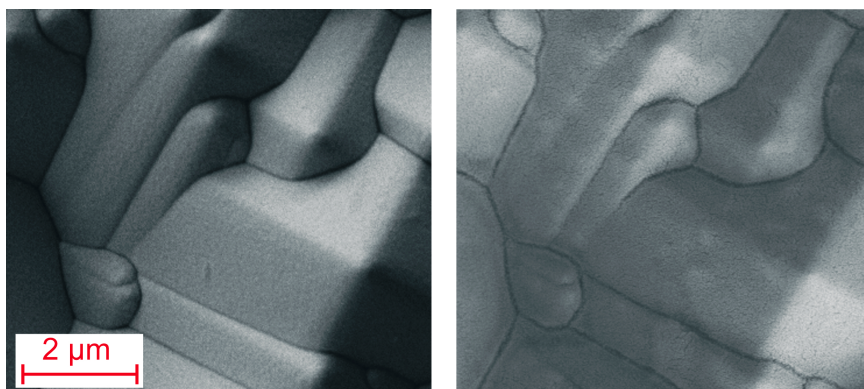


**Abb. 3.9:** Emitterprofile der vier im Experiment verwendeten Emitter. Die Emitter die in Schwarz, Grün und Blau dargestellt sind, wurden einmal diffundiert. In Rot ist ein Emitterprofil zu sehen, dass durch einen zusätzlichen Hochtemperaturschritt erzeugt wurde.

drei Emitterprofilen. Für seine Herstellung wurde die PSG-Schicht eines Emitters mit  $100 \Omega/\text{sq}$  Schichtwiderstand (blau) entfernt und eine sogenannte trockene Oxidation, ein weiterer Hochtemperaturschritt unter Sauerstoffzufuhr, durchgeführt [145]. Die Oxidschicht dient dabei als Diffusionsbarriere. Die P-Atome diffundieren bei hohen Temperaturen weiter in den Wafer hinein. Da die PSG-Schicht, die Dotierquelle, entfernt wurde, sinkt die Konzentration der P-Atome mit zunehmender Zeit weiter ab. Dieser schwach dotierte Emitter soll Aufschluss darüber geben, ob trotz einer geringen Oberflächendotierung von  $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  ausreichend geringe Kontaktwiderstände mit einer Ni/P-Metallisierung erreicht werden können.

Nach der Emitterdiffusion wurde die PSG-Schicht in verdünnter Flusssäurelösung entfernt und eine  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schicht auf der Oberfläche abgeschieden. Die Wafer wurden photolithografisch strukturiert, die geöffneten Bereiche zurückgeätzt, in DI-Wasser gespült und die Lackschicht anschließend in Aceton entfernt. Die Proben wurden in einem Gürtelofen gefeuert und für das außenstromlose Ni/P-Plattieren vorbereitet. Das natürliche Oxid, das sich auf den geöffneten Bereichen der Emitterstruktur gebildet hat, wurde vor der Metallabscheidung in verdünnter Flusssäurelösung entfernt und das Substrat anschließend in DI-Wasser gespült. Die Wafer wurden in eine Haltevorrichtung (engl. Carrier) sortiert und in das Plattierbecken gestellt. Bei der verwendeten Plattierlösung handelt es sich um ein kommerziell erwerbbares Produkt der Firma DOW Chemical mit der Bezeichnung Niposit PM 988. Die Wafer wurden in der alkalischen Plattierlösung bei  $40^\circ\text{C}$  für 180 Sekunden plattiert. Die Höhe der abgeschiedenen Ni/P-Schicht betrug ca.  $200\text{-}250 \mu\text{m}$ . Die plattierte Ni/P-Schicht wurde anschließend mithilfe eines Raster-Elektronen-Mikroskops (REM) untersucht, um sicherzustellen, dass sich eine geschlossene Ni/P-Schicht gebildet hat. Die Proben wurden in einem RTP-Ofen (engl. Rapid Thermal Process) für fünf Minuten bei  $350^\circ\text{C}$ ,  $400^\circ\text{C}$ ,  $450^\circ\text{C}$  und  $500^\circ\text{C}$  unter Stickstoffatmosphäre gesintert.

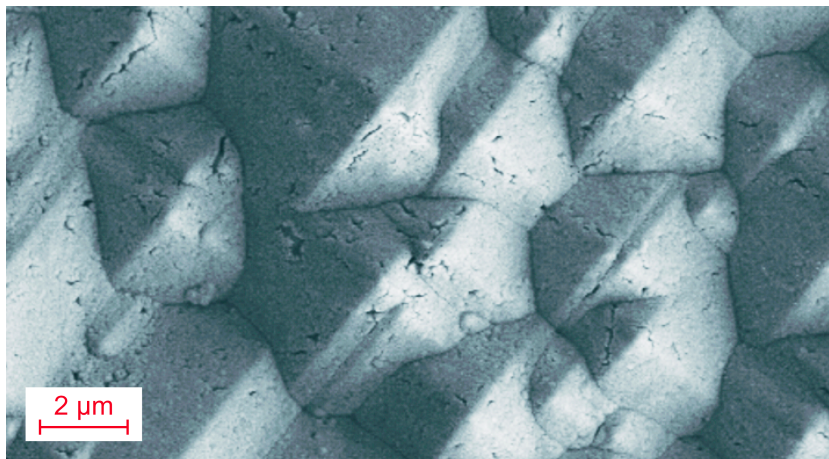
In Abbildung 3.10 links ist die REM-Aufnahme einer für drei Minuten plattierten Probe abgebildet. Auf der rechten Seite befindet sich die gleiche Probe nachdem sie fünf Minuten bei  $450^\circ\text{C}$  gesintert wurde. Ein Vergleich der Bilder zeigt, dass die Ni/P-Schicht durch den Sinterschritt aufgeraut wurde. Dies ist damit zu erklären, dass ein Teil des Nickels durch das Si-Substrat konsumiert wird und sich eine Nickelsilizid-



**Abb. 3.10:** REM Aufnahmen, Links: Abgeschiedene Ni/P-Schicht auf alkalischer Textur. Die abgeschiedene Schicht ist vollflächig geschlossen. Rechts: Die gleiche Probe fünf Minuten bei  $450^\circ\text{C}$  unter  $\text{N}_2$ -Atmosphäre gesintert. Die Struktur wirkt gröber, es sind keine Risse zu erkennen.

Legierung bildet. Rein optisch scheint die gesinterte Schicht geschlossen zu sein. Dies ist insofern wichtig, da die Schicht zusätzlich auch als Diffusionsbarriere benötigt wird, wenn hochdiffusive Metalle wie zum Beispiel Kupfer als leitende Schicht auf ihr abgeschieden werden sollen. Wird hingegen Silber zur Verstärkung der Ni/P-Schicht verwendet, dient die Nickelsilizidschicht ausschließlich als Kontaktvermittler, da Silber bei Raumtemperatur nicht ins Silizium diffundiert. Besonders bei langen Plattierdauern kann es zu einem Aufreißen der Nickelschicht kommen. Die Schicht kann damit ihre Funktion als Diffusionsbarriere nicht mehr erfüllen. Eine erneute Abscheidung ist notwendig, um wieder eine geschlossene Diffusionsbarriere zu erzeugen.

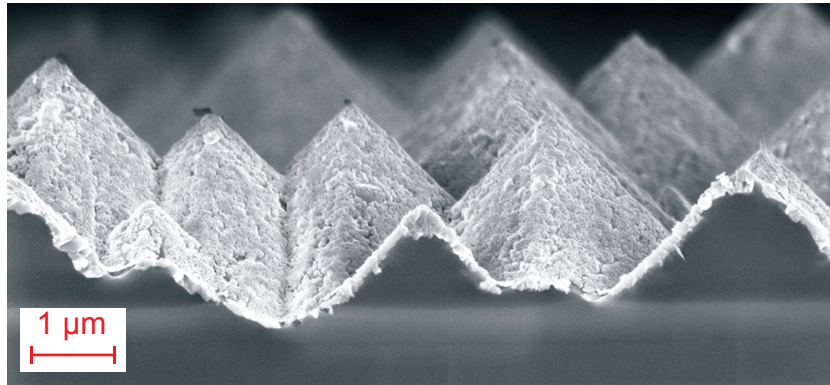
In Abbildung 3.11 ist solch eine Schicht zu sehen. Sie wurde sieben Minuten lang plattiert und anschließend fünf Minuten bei 450 °C in N<sub>2</sub>-Atmosphäre gesintert. Deutlich sind Risse in der Schicht zu erkennen, insbesondere an den Pyramidenkanten treten diese gehäuft auf. Vermutlich führt die größere Schichtdicke in Kombination mit



**Abb. 3.11:** Gesinterte Ni/P-Schicht, mit sieben Minuten Plattierdauer. Die thermische Behandlung für fünf Minuten bei 450 °C führt zu Rissen in der Schicht.

der Wärmebehandlung des Sinterns zu thermisch induzierter mechanischer Spannung in der Schicht.

Überschüssiges Ni wird in Königswasser (HCl<sub>aq</sub> + HNO<sub>3</sub>) zurückgeätzt und die Probe gezielt gebrochen, um die Oberflächenbeschaffenheit der Silizidschicht zu untersuchen. Zuvor wurde die Probe drei Minuten lang plattiert und anschließend für fünf Minuten bei 450 °C in N<sub>2</sub>-Atmosphäre gesintert. In Abbildung 3.12 ist deutlich zu erkennen, dass sich die Silizidschicht nicht homogen ausbildet, sondern stark aufgeraut ist. Damit wurde der Beweis erbracht, dass sich ein Silizid unter der aufgebrachtten Ni/P-Schicht gebildet hat. Welche Legierung gebildet wurde, ist unklar. Es wird vermutet, dass es sich um eine NiSi-Legierung handelt, da sich dieses Silizid wie bereits erwähnt ab Temperaturen um 350 °C ausbildet.



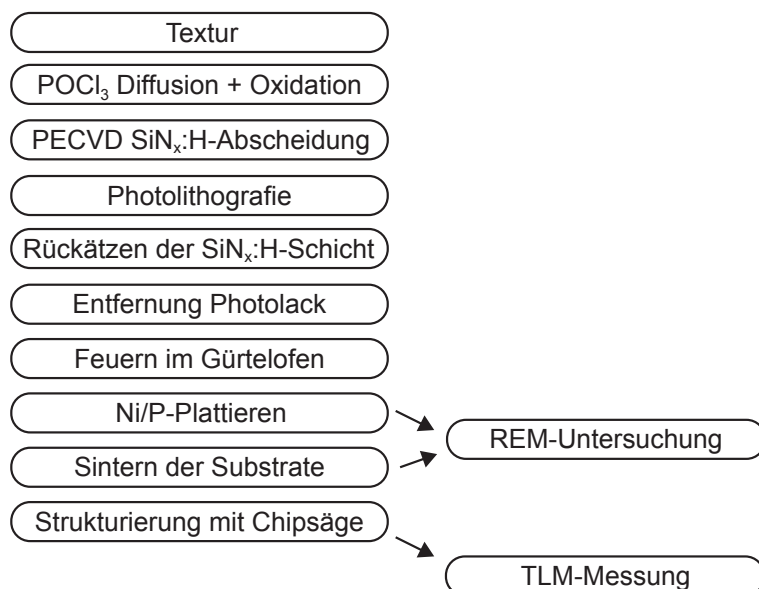
**Abb. 3.12:** REM Aufnahme: Querschnitt einer alkalisch texturierten Probe. Auf der Oberfläche befindet sich Nickelsilizid. Überschüssiges Nickel wurde zuvor in Königswasser entfernt. Die Oberfläche der Legierung ist aufgeraut.

### 3.3.3 Kontaktwiderstandsuntersuchung von gesinterten Ni/P-Schichten

Die Voruntersuchungen haben gezeigt, dass sich geschlossene Ni/P-Schichten auf den Substraten abscheiden lassen. Dies ist eine Voraussetzung für die Bestimmung des spezifischen Kontaktwiderstands, da angenommen wird, dass der metallisierte Bereich eine Äquipotentialfläche bildet. Diese Annahme kann getroffen werden, da die Messströme im 1 mA Bereich liegen und der Spannungsverlust deshalb bei der Messung gering ausfällt.

Als Referenzgruppe für die plattierten Proben wurden zusätzlich TLM-Strukturen mit TiPdAg-Metallisierung (Titan-Palladium-Silber) hergestellt. Diese Metallisierung weist sehr geringe Kontaktwiderstände auf [146] und wird nicht ausschließlich wie die Ni/P-Metallisierung aufplattiert. In einem ersten Schritt wird nacheinander eine dünne Schicht aus Titan, Palladium und Silber in einer Vakuumkammer aufgedampft. In einem weiteren Prozessschritt wird diese Schicht in einem Ag-Plattierbecken verstärkt. Die Prozessfolge für die Herstellung solch einer Metallisierung unterscheidet sich hauptsächlich dadurch von den Ni-plattierten Proben, dass die photolithografisch hergestellte Schicht erst nach der Metallisierung entfernt wird. Da der leicht unterschiedliche Herstellungsprozess der Proben allerdings irrelevant für diese Untersuchung ist, soll hier nicht näher auf ihn eingegangen werden.

Die Proben wurden mit einer Chipsäge auf eine Breite von 2 mm zugeschnitten und der Widerstand anschließend mit der Vierpunkt-Methode gemessen. Zur Veranschaulichung des Prozesses ist in Abbildung 3.13 ein Flussdiagramm des Prozesses abgebildet. Aus den erhaltenen Widerstandswerten kann der spezifische Kontaktwiderstand extrahiert werden. Tabelle 3.3 zeigt eine Zusammenfassung der ermittelten Ergebnisse. Die ermittelten Messwerte weisen eine große Streuung auf und erschweren eine eindeutige Aussage über die Kontaktgeigenschaften von gesinterten Ni/P-Schichten. Die Fehler der Messung sind als groß zu beurteilen und sollen hier separat betrachtet werden. Der Messfehler der Vierpunktmessung ist gering und liegt für die untersuchten Proben im einstelligen Prozentbereich. Die aus der Messung ermittelten Emitterschichtwiderstände sind in Tabelle 3.4 aufgelistet. Ein Vergleich der Messwerte, die mit dem



**Abb. 3.13:** Flussdiagramm des Experiments zur Ermittlung des spezifischen Kontaktwiderstands unterschiedlicher Nickellegierungen auf dotierten Si-Substraten.

ECV-Verfahren (siehe Kapitel 1.1.4) ermittelt wurden, mit denen der TLM-Messung zeigt teilweise deutliche Abweichungen. Die Abweichungen im Schichtwiderstand können allerdings nicht die große Schwankung der Messwerte erklären.

Eine deutlich größere Unsicherheit stellt die exakte Bestimmung des Abstands zwischen den metallisierten Bereichen der Probe dar. Wie bereits erwähnt, kann es durch den Rückätzprozess der SiN<sub>x</sub>:H-Schicht zu einem Unterätzen der Lackschicht kommen. Hierdurch kann sich der Abstand zwischen den metallisierten Bereichen verringern. Bei niedrigen spezifischen Kontaktwiderständen von 0,001 mΩcm<sup>2</sup> ergibt sich für eine Vergrößerung des Abstands um einen Mikrometer kein ermittelbarer Wert. Dies liegt daran, dass der y-Achsenabschnitt der Fitgeraden, der den Kontaktwiderstand repräsentiert, negative Werte annimmt. Hieraus würden sich negative spezifische Kontaktwiderstände ergeben, die keine physikalische Aussagekraft besitzen. Eine Verbreiterung des Abstands D<sub>i</sub> wurde experimentell nie beobachtet, kann allerdings nicht ausgeschlossen werden. Dieser Effekt könnte auftreten, wenn die belichtete

**Tabelle 3.3:** Ergebnisse der TLM-Messung für gesinterte Ni/P-Schichten auf texturierten, P-dotierten, Si-Substraten. Als Referenz dient eine TiPdAg-Metallisierung.

T <sub>sinter</sub>	Nickelsilizid				TiPdAg
	350 °C	400 °C	450 °C	500 °C	350 °C
R <sub>sh</sub> ECV in (Ω/sq)	ρ <sub>c</sub> in (mΩcm <sup>2</sup> )	ρ <sub>c</sub> in (mΩcm <sup>2</sup> )	ρ <sub>c</sub> in (mΩcm <sup>2</sup> )	ρ <sub>c</sub> in (mΩcm <sup>2</sup> )	ρ <sub>c</sub> in (mΩcm <sup>2</sup> )
22	0,007	0,033	0,007	0,033	0,010
53	0,121	0,003	0,002	0,004	0,001
97	0,406	0,266	0,363	0,065	
151	0,143	0,120	0,111	0,100	

**Tabelle 3.4:** Aus der TLM-Messung ermittelte Emitterschichtwiderstände für gesinterte Ni/P-Schichten auf texturierten, P-dotierten Si-Substraten. Als Referenz dient eine TiPdAg-Metallisierung.

T <sub>sinter</sub>	Nickelsilizid				TiPdAg
	350 °C	400 °C	450 °C	500 °C	350 °C
R <sub>sh</sub> ECV in (Ω/sq)	R <sub>sh</sub> TLM in (Ω/sq)	R <sub>sh</sub> TLM in (Ω/sq)	R <sub>sh</sub> TLM in (Ω/sq)	R <sub>sh</sub> TLM in (Ω/sq)	R <sub>sh</sub> TLM in (Ω/sq)
22	17,1	18,3	19,3	20,9	19,6
53	44,8	51,3	49,2	49,6	44,7
97	78,1	93,4	89,1	93,9	
151	157,8	158,0	155,4	143,5	

Lackfläche zum Beispiel durch eine beschädigte Schattenmaske verringert wird.

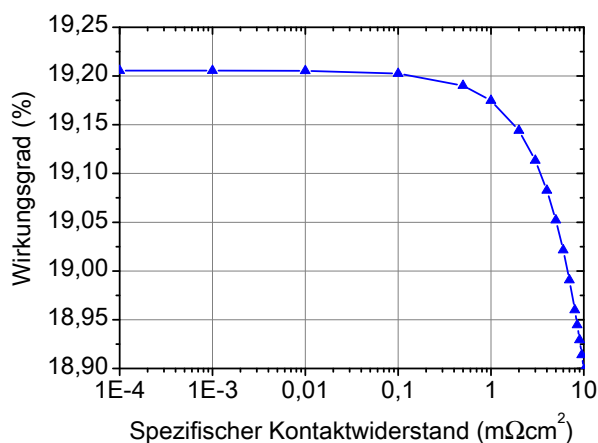
Der deutlich wahrscheinlichere Fall des Unterätzens wurde hingegen häufig beobachtet. Hierdurch tritt eine Verkleinerung der Abstände  $D_i$  auf. Bei einer Verringerung des Abstands zwischen den metallisierten Kontaktflächen um einem Mikrometer steigt der ermittelte Kontaktwiderstand auf  $0,0028 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$  an. Dies entspricht einer prozentualen Abweichung größer 200 %. Eine Verringerung des Abstands von fünf Mikrometern führt zu einem spezifischen Kontaktwiderstand von  $0,0166 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$ , was einer Abweichung von knapp 1400 % entsprechen würde.

Da eine Ungenauigkeit von  $5 \mu\text{m}$  durchaus realistisch erscheint, wird die Problematik der Messmethode erkennbar, die eine exakte Bestimmung der Abstände voraussetzt. Die im Experiment gewählte Probengeometrie lautet wie folgt:  $D_i = (100 \cdot i) \mu\text{m}$ ,  $B_F = 500 \mu\text{m}$ ,  $L_F = 2 \text{ mm}$ . Die Abstände  $D_i$  im  $100 \mu\text{m}$  Bereich sind für solch geringe spezifische Kontaktwiderstände zu groß gewählt, um Absolutwerte zu bestimmen.

Es wird damit deutlich, dass die Messgenauigkeit stark mit der Dimension der TLM-Probe korreliert. Die Ergebnisse der Untersuchung wurden teilweise publiziert [149].

In Experimenten anderer Gruppen, die in der Mikroelektronik tätig sind, wurden folgende Parameter gewählt, um den spezifischen Kontaktwiderstand präzise zu ermitteln: Variation des Abstands  $D_i$  um  $5 \mu\text{m}$ , Fingerlänge  $L_F$   $8 \mu\text{m}$ , Breite der Finger  $B_F$   $1,5 \mu\text{m}$  [147]. Solche Strukturen können allerdings nur mit speziellen Gerätschaften kontaktiert werden, da die benötigten Vierpunktprobenspitzen ähnliche Dimensionen aufweisen müssen, um die Probe zu kontaktieren. Die so ermittelten spezifischen Kontaktwiderstände liegen für ein NiSi-Legierung auf einem ebenen Si-Substrat mit einer Oberflächendotierung von  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  unter  $0,01 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$ . Bei einer Oberflächenkonzentration von  $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  verringert sich der spezifische Kontaktwiderstand sogar auf  $0,01 \mu\Omega\text{cm}^2$  [148]. Trotz der stark fehlerbehafteten Messung lassen sich aus dem getätigten Experiment einige Aussagen ableiten. Zuerst ist zu bemerken, dass trotz des großen Fehlers die ermittelten spezifischen Kontaktwiderstände äußerst gering sind. Der Verlauf zeigt, dass mit steigendem Schichtwiderstand der spezifische Kontaktwiderstand zunimmt. Die Referenzgruppe mit einer TiPdAg-Metallisierung zeigt ähnlich geringe spezifische Kontaktwiderstände wie die Proben mit der Silizidlegierung. Eine generelle Aussage über die gebildeten Silizide lässt sich nicht ableiten, da es keine Möglichkeit gab, diese zu bestimmen. Nach Tabelle 3.2 bildet sich bei Sintertemperaturen bis  $350 \text{ °C}$  eine  $\text{Ni}_2\text{Si}$ -Legierung aus. Bei höheren Temperaturen wandelt sich diese durch weitere Ni-Diffusion zu einer NiSi-Legierung um. Ein ge-

nereller Trend, dass mit höheren Sintertemperaturen geringere Widerstände erzielt werden, deutet sich zwar an, kann jedoch aufgrund des großen Fehlers nicht verifiziert werden. Eine NiSi-Schicht sollte einen geringeren Kontaktwiderstand besitzen als eine Ni<sub>2</sub>Si-Schicht (siehe Tabelle 3.2). Die Bedeutung des spezifischen Kontaktwiderstands für den Wirkungsgrad einer 3-Busbar-Solarzelle ist in Abbildung 3.14 veranschaulicht. Es handelt sich um die in Kapitel 1.4 bereits simulierte 3-Busbar-Solarzelle. Die Form und Leitfähigkeit der Vorderseitenmetallisierung wurde für die Simulation nicht verändert. Gleiches gilt bis auf den Serienwiderstand für die Diodenparameter. Im Schaubild ist der Wirkungsgrad der Solarzelle über den spezifischen Kontaktwiderstand aufgetragen. Es ist deutlich sichtbar, dass der Wirkungsgrad der Solarzelle für geringe spezifische Kontaktwiderstände in Sättigung geht und sein Maximum bei ca. 19,21 % erreicht. Durch Ersetzen des geringen Kontaktwiderstands der Siebdruck-Solarzelle von 1,5 mΩcm<sup>2</sup> durch einen gesinterten Nickelkontakt könnte ein Wirkungsgradgewinn von ca. 0,05%<sub>abs</sub> erzielt werden. Deutlich wird allerdings auch, dass hohe spezifische Kontaktwiderstände den Wirkungsgrad der Solarzelle stark limitieren können.



**Abb. 3.14:** Wirkungsgrad einer 3-Busbar-Solarzelle in Abhängigkeit vom spezifischen Kontaktwiderstand.

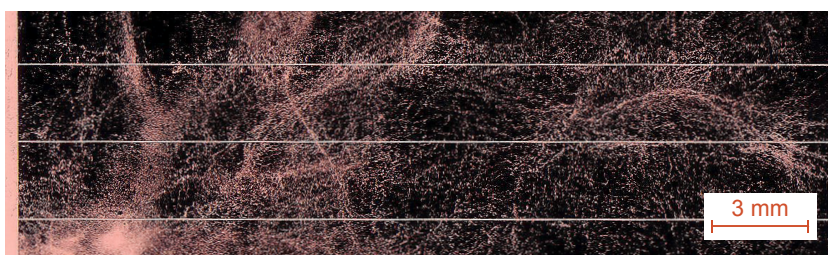
### 3.4 Ungewollte Metallabscheidung auf dielektrischen Schichten

Die mit dem PECVD-Verfahren abgeschiedene SiN<sub>x</sub>:H-Schicht erfüllt nicht ausschließlich die Aufgabe als Antireflexionsschicht und Wasserstoffquelle während des Feuerprozesses im Gürtelofen. Sie agiert zusätzlich, da es sich um eine dielektrische Schicht handelt, als Plattierbarriere für Metallionen während der nasschemischen Abscheidung. In Experimenten zeigte sich allerdings, dass es zu ungewollter Metallabscheidung auf der SiN<sub>x</sub>:H-Schicht kommen kann. Dieses Phänomen wird in der Literatur als Background Plating oder Ghost Plating beschrieben. Da es allerdings auf einer perfekt gereinigten Substratoberfläche mit einer homogen abgeschiedenen SiN<sub>x</sub>:H-Schicht nicht zu Background Plating kommen kann, führt dies zu der Vermutung, dass sich in der abgeschiedenen SiN<sub>x</sub>:H-Schicht Inhomogenitäten befinden

müssen, durch die die Plattierlösung in Kontakt mit der Emitterstruktur kommen kann. Solche Inhomogenitäten in der  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schicht werden auch als Pinholes bezeichnet und sind weitläufig dokumentiert [150, 151].

In Abbildung 3.15 ist ein Ausschnitt einer Ni/Cu-plattierten Zelloberfläche zu sehen, die massives Background Plating aufweist. Die gewollte Metallabscheidung bezieht sich ausschließlich auf die drei parallel verlaufenden Finger und den Busbar, der links im Bild zu erkennen ist. Besonders massiv tritt das Background Plating im linken unteren Bereich des Substrats auf. Die ungewollte Metallabscheidung beeinflusst die Solarzelle negativ. Im Wesentlichen verursacht die ungewollte Abscheidung von Metall auf der  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schicht zusätzliche Abschattung der Solarzellen-Vorderseite, was sich negativ auf den generierten Strom auswirkt. Zusätzlich geht ein höherer Metallverbrauch mit ihr einher, was besonders für hochpreisige Metalle wie Silber nachteilig ist. Des Weiteren besteht die Gefahr, dass sich im Fall einer Ni/Cu-Abscheidung auch keine ausreichend dicke Ni-Diffusionsbarriere gebildet hat. Eine ausreichend dicke Ni-Diffusionsbarriere ist allerdings die Voraussetzung für eine „langlebige“ Solarzelle mit Ni/Cu-Metallisierung, da hoch diffusives Kupfer [152] in das Si-Substrat eindringen könnte und damit erhöhte Rekombination oder auch Kurzschlüsse verursachen würde [153, 154]. Prozesstechnisch kann Background Plating dazu führen, dass eine galvanisch abgeschiedene Metallschicht nicht die gewünschten Eigenschaften aufweist, da es durch die erhöhte Oberfläche zu einer Verringerung der eingestellten Stromdichten kommt und somit die gewünschte Metallmenge auf den Leiterbahnen für das gewählte Prozessfenster zu gering ist.

Zur Vermeidung der ungewollten Metallabscheidung kann die dielektrische Schicht mit einem Schutzlack oder Wachs bedeckt werden. Dies führt allerdings zu weiteren Prozessschritten, da die Maske auch wieder entfernt werden muss [155]. Ziel war es deshalb, zu untersuchen, worin die Ursachen für die Pinhole-Bildung liegen und wie sie sich verringern oder gänzlich vermeiden lässt.



**Abb. 3.15:** Ausschnitt einer Ni/Cu-plattierten Zelloberfläche mit massivem Background Plating. Die gewünschte Abscheidung bezieht sich lediglich auf die drei parallel verlaufenden Finger und den Busbar (links im Bild zu sehen).

### 3.4.1 Probenpräparation zur Untersuchung des Background Platings

Als Ausgangsmaterial für die Untersuchung dienen bordotierte, monokristalline, sechs Zoll Si-Substrate, die mithilfe eines Lasers in  $5 \times 5 \text{ cm}^2$  große Proben geteilt wurden. Es wurde Cz-Silizium ( $1\text{-}3 \Omega\text{cm}$ ) und FZ-Material ( $1,7\text{-}2,3 \Omega\text{cm}$ ) verwendet, um sicherzustellen, dass es sich bei dem Phänomen nicht um einen materialabhängigen Effekt handelt. Zuerst wurden von beiden Seiten der Substrate ca.  $12 \mu\text{m}$  in heißer

NaOH<sub>aq</sub>-Lösung chemisch abgetragen, um mögliche Rückstände des Sägeprozesses (Mikrorisse oder Verunreinigungen) zu entfernen. Anschließend wurden die Proben in einer wässrigen Lösung aus KOH und einem hochsiedenden Alkohol texturiert [156]. Die Substrate erhielten so eine Pyramidentextur auf Vorder- und Rückseite. Um den Einfluss der Textur auszuschließen, wurden zusätzlich Proben in wässriger NaOH-Lösung (Natriumhydroxid) zurückgeätzt, um eine planare Oberfläche zu erhalten. Anschließend wurden die Wafer in zwei Gruppen aufgeteilt. Gruppe eins wurde zuerst in verdünnter HCl<sub>aq</sub>-Lösung gereinigt, gefolgt von einem Tauchschrift in DI-Wasser. Das native Oxid wurde in verdünnter HF<sub>aq</sub>-Lösung entfernt. Die zweite Gruppe wurde mit einer Lösung aus Wasserstoffperoxid (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) und Schwefelsäure (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), die auch als Piranha-Lösung bekannt ist, gereinigt und in DI-Wasser gespült. Anschließend wurde auch hier das native Oxid in verdünnter HF<sub>aq</sub>-Lösung entfernt.

Alle Proben wurden in einem Rohrofen diffundiert und erhielten somit beidseitig einen Emitter mit einem Schichtwiderstand von 50 Ω/sq. Das während der Emitterdiffusion gebildete PSG wurde anschließend in verdünnter HF<sub>aq</sub>-Lösung entfernt. Auf die Proben wurde mithilfe des PECVD-Verfahrens eine SiN<sub>x</sub>:H-Schicht einseitig abgeschieden. Es handelte sich hierbei um eine Direktplasma-Abscheidung bei 440 kHz und ca. 400 °C in einem Horizontalboot.

Mit einem Tintenstrahldrucker wurde die Oberfläche der Proben selektiv bedruckt, um ein Negativ-Grid zu bilden. Die SiN<sub>x</sub>:H-Schicht wurde an den noch offenen Stellen in verdünnter HF<sub>aq</sub>-Lösung entfernt. Die Wachsmaske wurde in stark verdünnter KOH<sub>aq</sub>-Lösung abgenommen.

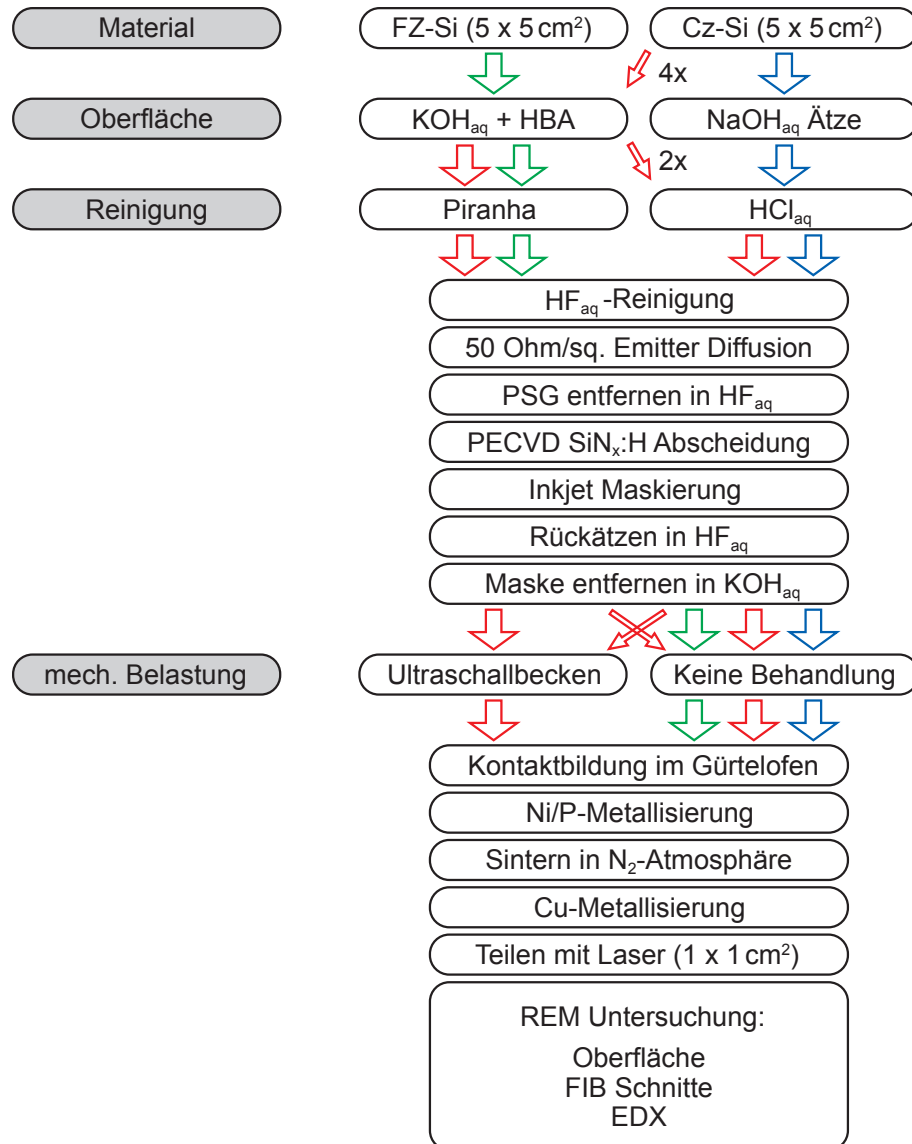
Zur Simulation starker mechanischer Belastung wurden zwei Cz-Proben, eine in Piranha-Lösung, die andere in HCl<sub>aq</sub>-Lösung, gereinigt und für drei Minuten in ein mit DI-Wasser gefülltes Ultraschallbecken (ca. 37 kHz) gestellt. Anschließend wurden alle Proben in einem Gürtelofen gefeuert.

Vor dem außenstromlosen Ni/P-Plattieren wurde das native Oxid in einer verdünnten HF<sub>aq</sub>-Lösung entfernt. Die Proben wurden 210 Sekunden lang bei 40 °C in der Plattierlösung Niposit PM 988 plattiert und anschließend für drei Minuten bei 400 °C unter N<sub>2</sub>-Atmosphäre in einem Rohrofen gesintert. Zuletzt wurde elektrochemisch eine dünne Kupferschicht auf die gesinterten Ni/P-Schichten aufplattiert.

Für die anschließenden REM-Untersuchungen wurden die Proben per Laser in 1 × 1 cm<sup>2</sup> große Stücke geteilt, und die Oberfläche der Probestücke wurde untersucht. Die Metallablagerungen, die sich auf der SiN<sub>x</sub>:H-Schicht gebildet haben, wurden mithilfe eines gebündelten Galliumionen-Strahls (engl. FIB = Focused Ion Beam) [157] sukzessive in 12 nm-Schritten abgetragen. Hierbei wurde auch das Substrat angeschnitten, um die Kontaktfläche zum Si-Substrat genauer untersuchen zu können. Die Querschnitte wurden anschließend optisch und per EDX-Verfahren (engl. Energy Dispersive X-Ray) [158] auf ihre chemische Zusammensetzung untersucht. Besonderes Augenmerk wurde hierbei auf die Suche nach Nickel oder Nickelsiliziden gelegt, da sie die erste metallische Schicht bilden, die auf das Substrat abgeschieden wurde. Die hierdurch erhaltenen Querschnitte belegen die Ursache der ungewollten Metallabscheidung.

In Abbildung 3.16 ist ein Flussdiagramm des Experiments veranschaulicht, um den recht aufwendigen Prozessablauf besser verständlich zu machen. In der ersten Spalte des Diagramms sind in Grau die sich voneinander unterscheidenden Prozessschritte unterlegt. Sie gelten jeweils für die gesamte Zeile. Gemeinsame Prozessschritte

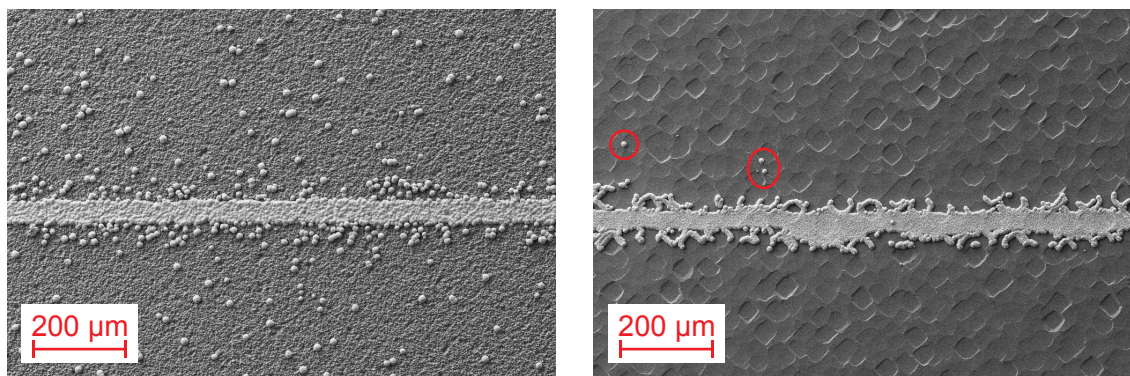
der Proben sind weiß unterlegt. Die farbigen Pfeile geben Aufschluss über die Substratbeschaffenheit. In Grün sind texturierte FZ-Proben markiert. Die texturierten Cz-Substrate sind in Rot dargestellt. In Blau sind NaOH<sub>aq</sub>-geätzten Cz-Wafer abgebildet, die eine flache Oberfläche aufweisen.



**Abb. 3.16:** Flussdiagramm des Experiments. In Grau sind die Schritte unterlegt, in denen Variationen zwischen den Proben auftreten. Die farbigen Pfeile markieren die Prozessschritte einzelner Gruppen. In Grün die FZ-Gruppe, in Blau die Cz-Substrate mit glatter Oberfläche und in Rot die mit texturierter Oberfläche.

### 3.4.2 Untersuchung der Probenoberfläche

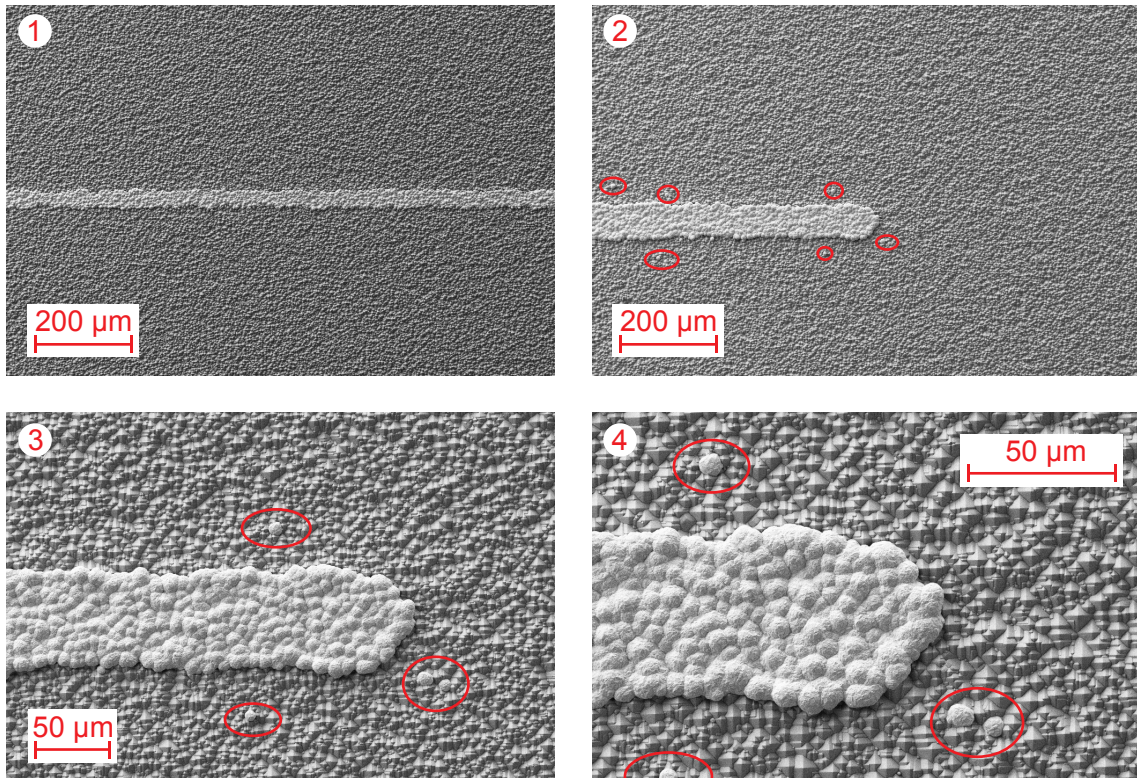
Die Untersuchungen mit dem REM zeigten, dass die Reinigung der Substratoberfläche eine entscheidende Rolle spielt, um Background Plating zu vermeiden. Die Untersuchung von texturierten und flachen Proben, die keine Ultraschallbehandlung erhalten haben und in einer  $\text{HCl}_{\text{aq}}$ -Lösung gereinigt wurden, zeigte ungewollte Metallabscheidungen auf der  $\text{SiN}_x$ :H-Schicht. Repräsentativ hierfür ist in Abbildung 3.17 links eine Aufnahme solch einer Oberfläche dargestellt. Deutlich sichtbar sind sphärische Strukturen auf der Oberfläche. Auf der rechten Seite ist eine flache Probe abgebildet. Es sind kaum Bereiche auf der Oberfläche zu erkennen, die ungewollte Metallabscheidung aufweisen. Auffällig ist jedoch das „Ausfransen“ der Finger. Es ist höchstwahrscheinlich der Tatsache geschuldet, dass während des Rückätzens der selektiv bedeckten  $\text{SiN}_x$ :H-Schicht in verdünnter Flußsäure die Kantenbereiche der Wachsschicht unterätzt wurden.



**Abb. 3.17:** REM Aufnahmen der Oberflächen von Proben, die mit verdünnter  $\text{HCl}_{\text{aq}}$  gereinigt wurden. Links: Probe mit Pyramidentextur, sehr deutlich sind kreisrunde Abscheidungen sichtbar. Rechts: Oberfläche einer flachen Probe. In Rot markiert sind vereinzelt ungewollte Abscheidungen sichtbar. Besonders auffällig ist die „ausgefranzte“ Fingerstruktur, die höchstwahrscheinlich durch das Unterätzen der Wachsschicht entstanden ist.

Oberflächenuntersuchungen von texturierten Cz- und FZ-Proben, die mithilfe von Piranha-Lösung gereinigt wurden und keine Ultraschallbehandlung erhalten haben, zeigen hingegen kaum Background Plating. In Abbildung 3.18 (Bild 1) ist die Oberfläche solch einer Probe dargestellt. In dieser Auflösung ist keine ungewollte Metallabscheidung erkennbar. Unter vergrößerter Auflösung sind an den Kantenbereichen des plattierten Fingers (Bild 2) vereinzelt Abscheidungen (rot umrandet) sichtbar. Auf der restlichen Oberfläche sind keine Metallabscheidungen erkennbar. Die Abscheidungen im Fingerbereich (Bild 3, 4) sind sphärisch. Warum sich die ungewollte Metallabscheidung in Fingernähe befindet, konnte nicht geklärt werden. Das vereinzelt Auftreten der ungewollten Abscheidungen führt in dieser Größenordnung jedoch nicht zu einer merklichen Vergrößerung der Abschattung der Zelloberfläche.

Im zweiten Versuchsteil wurden die gereinigten Proben zusätzlich mechanisch belastet. Dies geschah, wie oben bereits beschrieben, in einem Ultraschallbecken. Die Oberflächen dieser Proben sind in Abbildung 3.19 zu sehen. Dargestellt sind REM-Aufnahmen eines texturierten Substrats, das mit Piranha-Lösung gereinigt wurde. In den vorherigen Untersuchungen wurde gezeigt, dass auf solch einem Substrat ohne

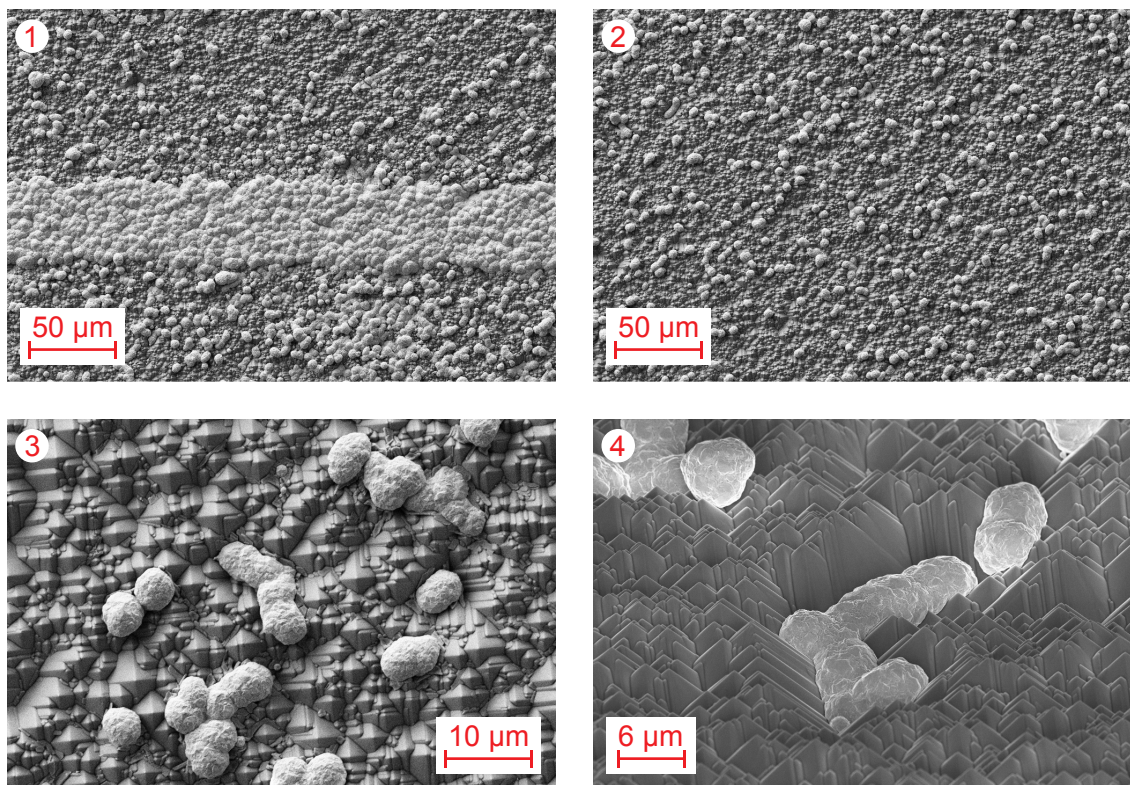


**Abb. 3.18:** REM Aufnahmen, der texturierten Oberfläche einer mit Piranha-Lösung gereinigten Probe (Bild 1, 2). Es zeigt sich kaum Background Plating. Unter starker Vergrößerung sind im Fingerbereich sphärische Abscheidungen (Bild 3, 4) erkennbar.

Ultraschallbehandlung praktisch keine ungewollte Abscheidung stattfindet. Bild 1 und 2 zeigen nun deutlich, dass das Ausmaß an Background Plating stark zugenommen hat. Ein Vergleich mit der Probe aus Abbildung 3.17 zeigt eine extreme Zunahme des Phänomens. Teilweise bilden sich sogar zusammenhängende Ansammlungen, wie in Bild 1 unten rechts sichtbar. Es wird deutlich, dass die ungewollten Abscheidungen nicht nur sphärische Form haben, wie die zuvor untersuchten Proben, sondern auch in die Länge gezogen sind (Bild 3). Diese „wurmartige“ Strukturen scheinen sich bevorzugt in den Tälern zwischen den Pyramiden anzulagern. In Bild 4 ist solch eine Ablagerung in hoher Auflösung dargestellt. Durch die mechanische Belastung hat die Reinigung praktisch keinen Effekt mehr auf die Dichtigkeit der  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schicht.

Es ist davon auszugehen, dass sowohl die Reinigung als auch die mechanische Belastung des Substrats unterschiedliche Effekte hervorrufen. Die Störung in der  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schicht muss für sphärische Abscheidungen eine punktuelle Störung sein. Für eine „wurmartige“ Struktur wird eine ausgedehnte Störung der Schicht benötigt.

Sowohl auf glatten Proben mit  $\text{HCl}_{\text{aq}}$ -Reinigung als auch auf texturierten Proben mit  $\text{HCl}_{\text{aq}}$ -Reinigung und Ultraschallbehandlung wurden ungewollte metallische Abscheidungen in sphärischer und „wurmartiger“ Form gefunden. Durch die Ultraschallbehandlung wird die Menge der metallischen Abscheidungen jedoch drastisch erhöht. Durch die Vibrationen, die das Ultraschallbecken erzeugt, fangen die Wafer an zu schwingen. Durch diese Vibrationen wird die  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schicht beschädigt. Deshalb wurden die Abscheidungen angeschnitten und die Querschnitte untersucht.

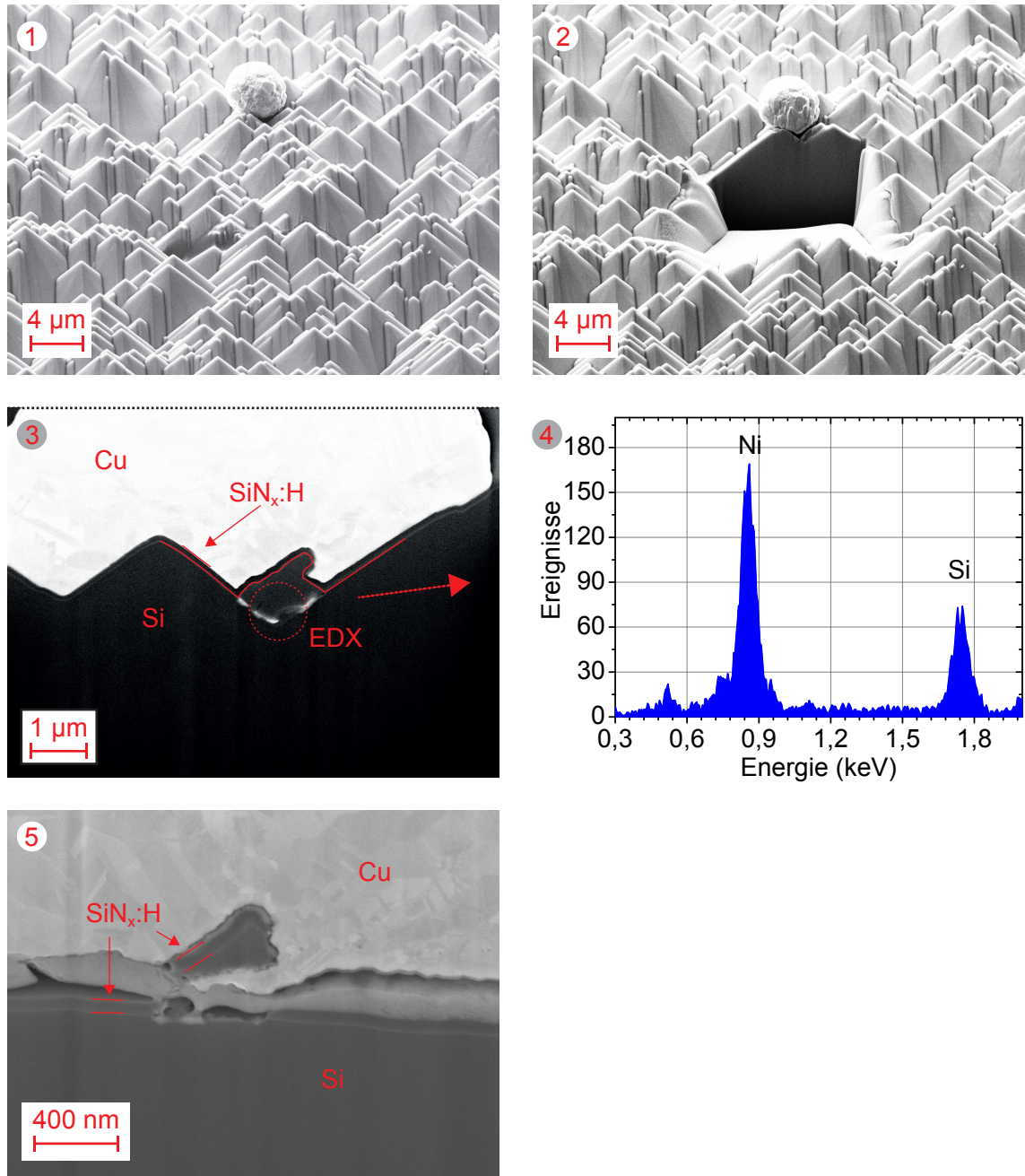


**Abb. 3.19:** REM-Aufnahmen der texturierten Oberfläche einer mit Piranha-Lösung gereinigten Probe. Die Proben wurden vor der Metallabscheidung in einem Ultraschallbecken behandelt, um mechanische Belastung zu simulieren. Massives Background Plating ist sichtbar (Bild 1, 2). Die Abscheidungen sind nicht mehr ausschließlich sphärisch, auch langgezogene „wurmartige“ Strukturen befinden sich auf der Oberfläche der Probe (Bild 3, 4).

### 3.4.3 Profiluntersuchung von Metallpartikeln

Im nächsten Untersuchungsschritt wurden die ungewollten Abscheidungen gezielt mit einem Ionenstrahl abgetragen, um zu ermitteln, wodurch sie hervorgerufen werden. Als Erstes wurden die sphärischen Abscheidungen untersucht. Da eine  $\text{HCl}_{\text{aq}}$ -Reinigung im Vergleich zu einer Piranha-Reinigung das Background Plating nicht verhindern konnte, liegt es nahe, dass organische Rückstände auf der Waferoberfläche die ungewollte Metallabscheidung beeinflussen. Die Lösung aus  $\text{H}_2\text{O}_2$  und  $\text{H}_2\text{SO}_4$  entfernt organische Verunreinigungen im Vergleich zu  $\text{HCl}_{\text{aq}}$  besonders effektiv.

Der Untersuchungsvorgang bestand aus vier Teilschritten. Die einzelnen Teilschritte sind in Abbildung 3.20 dargestellt. Zuerst wurde der zu untersuchende Bereich lokalisiert (Bild 1). Mithilfe des Ionenstrahls wurde ein Graben vor dem metallischen Partikel geschaffen (Bild 2), damit das abgetragene Material die Sicht nicht behindert. Anschließend wurde das Partikel in 12 nm Schritten abgetragen. An markanten Stellen wurde der FIB-Schnitt unterbrochen und eine EDX-Analyse durchgeführt (Bild 3 und 4). Die Untersuchung der texturierten Proben mit  $\text{HCl}_{\text{aq}}$ -Reinigung und Ultraschallbehandlung zeigte, dass sich unter einigen runden Partikeln in den Tälern der Pyramiden kleine Partikel angelagert haben. Mithilfe der EDX-Analyse konnte nachgewiesen werden, dass es sich um ein Siliziumpartikel handelt (Bild 4). Auf dem Partikel befindet sich eine  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schicht. Das Partikel muss sich deshalb vor der  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Abscheidung



**Abb. 3.20:** REM Aufnahmen der Probenpräparation. Bild 1: Lokalisierung des Partikels. Bild 2: Ein Graben wird vor dem Partikel „geschnitten“. Bild 3: Abtragung des Partikels in 12 nm Schritten. Hierbei handelt es sich nicht um dasselbe Partikel wie in Bild 1 und 2. Bild 4: EDX-Messung zur Elementanalyse. Die Elemente Si und Ni wurden ermittelt. Bild 5: Querschnitt einer in  $\text{NaOH}_{\text{aq}}$  geätzten, glatten Probe. Ein kleines Partikel hat sich gelöst.

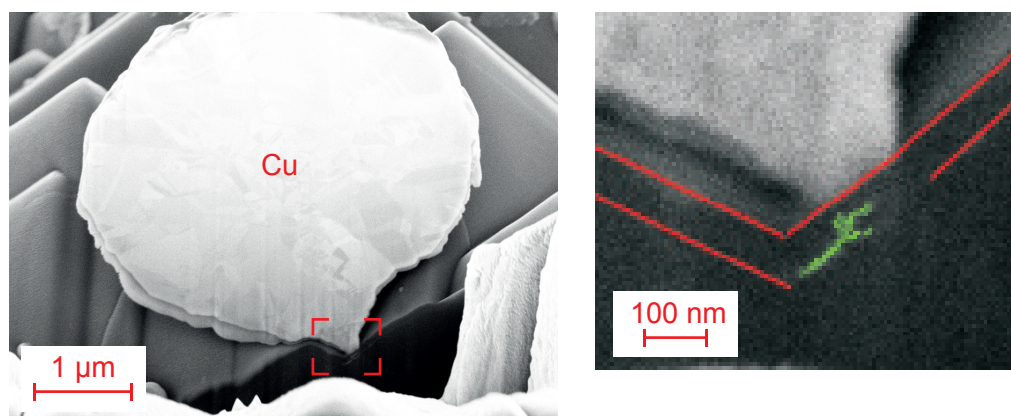
auf der Oberfläche abgelagert haben. Unter dem Partikel konnte Nickel detektiert werden. Damit wurde gezeigt, dass die  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schicht das Partikel nicht vollständig bedeckt. Die Öffnung in der  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schicht ermöglichte somit eine Abscheidung von Nickel und Kupfer. Das Aufreißen der  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schicht könnte durch Schwingungen im Ultraschallbad erzeugt worden sein. Interessanterweise hat sich das Partikel jedoch

nicht vollständig von der Oberfläche gelöst. Auch auf der Probe mit glatter Oberfläche wurden kleine Partikel gefunden.

Ähnlich wie in Bild 3 ist in Bild 5 ein kleines Partikel erkennbar. Auch hier kam es zu sphärischer Abscheidung. Die Herkunft des Partikels ist unklar. Es ist jedoch zu erkennen, dass es mit  $\text{SiN}_x\text{:H}$  beschichtet wurde. Da der EDX-Detektionsbereich minimal einen Durchmesser von ca. einem Mikrometer besitzt, konnte hier keine zuverlässige Elementanalyse durchgeführt werden. Es scheint sich jedoch auch um ein Si-Partikel zu handeln. Ähnlich zu Bild 3 befindet sich Nickel unterhalb der Probe auf dem Substrat.

Die Untersuchung sphärischer Partikel auf Proben mit  $\text{HCl}_{\text{aq}}$ -Reinigung und ohne Ultraschallbehandlung zeigte einen weiteren Effekt. In Abbildung 3.21 links ist ein FIB-Querschnitt dargestellt. Das Partikel wächst aus der  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schicht heraus. Bei genauerer Betrachtung werden helle Reflexe in der  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schicht sichtbar. In der Abbildung wurde der rot markierte Ausschnitt vergrößert und der helle Bereich grün eingefärbt. Zusätzlich wurden die Ränder der  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schicht mit roten Balken markiert. Ein heller Bereich ist in der  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schicht zu sehen. Es könnte sich hierbei um eine organische Ablagerung handeln, da auf Proben mit Piranha-Reinigung keine Verunreinigungen gefunden wurden. Der Beweis, dass es sich um eine organische Ablagerung handelt, konnte jedoch nicht erbracht werden. Da die glatten Proben kaum ungewollte Metallabscheidungen aufweisen und für die Textur der Proben ein langkettiger Alkohol verwendet wurde, könnten die organischen Ablagerungen Restbestände dieses Alkohols sein.

Die Untersuchung der länglichen Partikel zeigte einen weiteren Effekt, der zu ungewollter Abscheidung führt. Durch die mechanische Behandlung der Proben im Ultraschallbad kommt es zur Rissbildung in den „Tälern“ der Pyramidentextur. Dies ist in Abbildung 3.22 dargestellt. Wie bereits bei der vorherigen Untersuchung wurde die zu untersuchende Struktur angeschnitten und anschließend mithilfe des Ionenstrahls sukzessive abgetragen. In Bild 1 ist eine längliche Cu-Abscheidung in der Aufsicht dargestellt. Vor der Struktur wurde ein Graben geformt. Das Partikel wurde bereits angeschnitten.



**Abb. 3.21:** Links: FIB-Querschnitt auf eine Probe mit  $\text{HCl}_{\text{aq}}$ -Reinigung. Rechts: Vergrößerter und nachbearbeiteter Ausschnitt. Die  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schicht wurde mit roten Balken versehen. Der helle Bereich in der  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schicht wurde grün gefärbt, um den Kontrast zu erhöhen. Eventuell handelt es sich um eine organische Verunreinigung.

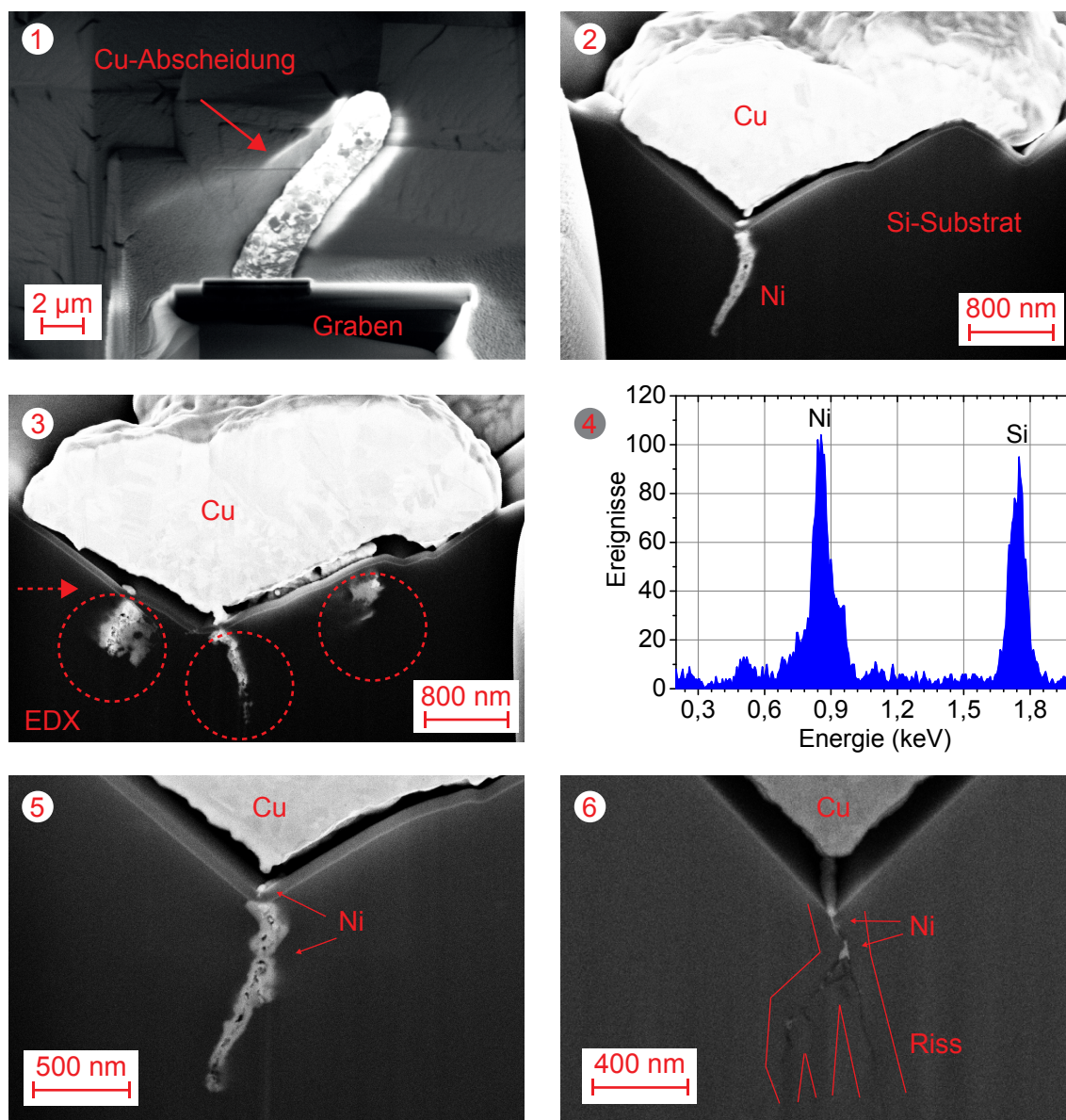
Im zweiten Bild ist die Schnittebene mit dem Partikel abgebildet. Deutlich zu erkennen ist die Kupferschicht sowie ein heller Bereich, der sich im Si-Substrat befindet. Mithilfe einer EDX-Analyse konnte gezeigt werden, dass sich Nickel in dem Riss befindet. Der Riss, der sich durch die Ultraschallbehandlung gebildet hat, wurde durch den Plattiervorgang und den nachfolgenden Sinterschritt mit Nickel gefüllt. Unklar ist, ob sich das Nickel bereits während der Abscheidung in der Rissstruktur abgelagert hat. Es scheint möglich, dass Nickel erst durch den Sinterschritt tief in das Substrat gelangen konnte. Mit der EDX-Analyse konnte nicht belegt werden, ob es sich um reines Nickel handelt oder ob Nickel in Form eines Silizids vorliegt. Es ist jedoch plausibel, dass es sich hier um ein Nickelsilizid handelt, da die Proben gesintert wurden. Die Tiefe des Risses ist größer als 800 nm. Diese Tatsache ist insofern beunruhigend, da die Emitterstruktur bei einem Schichtwiderstand von  $50 \Omega/\text{sq}$  im Bereich von ca. 300-350 nm liegt. Eine metallisch leitende Ni-Struktur oder ein Nickelsilizid, wie im Bild zu sehen, würde unweigerlich zu einem Kurzschluss des pn-Übergangs führen.

Der dritte Querschnitt zeigt, dass sich nicht nur Risse bilden können, auch weit ausgedehnte Strukturen rechts und links des Risses sind sichtbar. Die Analyse ergab, dass es sich um Nickel oder Nickelverbindungen handelt, wie die EDX-Auswertung in Bild 4 zeigt. Die EDX-Analyse wurde an den rot markierten Bereichen in Bild 3 durchgeführt. In Bild 4 ist die Auswertung der rechten Struktur dargestellt. Unklar ist jedoch, wie sich diese großflächigen Strukturen gebildet haben. Es ist zu bemerken, dass sie sich nicht direkt in den Pyramidentälern befinden.

Bild 5 zeigt die 40000-fache Vergrößerung eines Risses. Hohlräume befinden sich innerhalb der Rissstruktur. Es bildet sich eine Art „Corona“ um den Riss, was durch die Diffusion des Nickels und die folgende Silizidbildung erklärt werden könnte. Im Pyramidental ist noch ein geringer Rest Nickel sichtbar. Das Kupferpartikel hat sich durch die Bearbeitung mit dem Ionenstrahl bereits vom restlichen Nickel im Pyramidental gelöst. Dieses Verhalten konnte mehrfach beobachtet werden und tritt besonders dann gehäuft auf, wenn die verbliebene Partikelgröße gering ist oder die Kontaktstelle bereits durch den Ionenstrahl entfernt wurde.

In Bild 6 ist ein Riss abgebildet, der nicht vollständig mit Nickel oder Nickelsilizid gefüllt ist. Nur die Anfangsbereiche scheinen Spuren von Nickel aufzuweisen. Da der Riss schwer zu erkennen ist, wurde er aus Anschauungsgründen rot umrahmt. Die Rissstruktur besitzt Hohlräume. Unklar ist, ob die fehlenden Bereiche im Riss durch den Ionenstrahl entfernt wurden. Es könnte sein, dass kleine Si-Partikel, die sich im Riss gelöst haben, durch den Ionenstrahl entfernt wurden. Dies kann nicht ausgeschlossen werden, da eine kontinuierliche Beobachtung der Probe während der Schneidprozedur mit dem Ionenstrahl nicht möglich ist.

Im Rahmen des Experiments wurden ca. 50 Partikel untersucht. Da allerdings tausende Partikel alleine in einem Probenbereich von  $1 \times 1 \text{ cm}^2$  sichtbar wurden, kann nicht ausgeschlossen werden, dass es weitere Ursachen für die ungewollte Metallabscheidung gibt. Teile dieser Arbeit wurden veröffentlicht [159].



**Abb. 3.22:** REM Aufnahmen von länglichen metallischen Abscheidungen. Mithilfe eines Ionenstrahls wurden Querschnitte der Proben erstellt. Bild 1: Aufsicht auf ein längliches Cu-Partikel. Vor dem Partikel wurde bereits ein Graben erstellt. Bild 2: Querschnitt eines Partikels. Deutlich ist ein tiefer Riss unter der Probe im „Pyramidental“ zu erkennen. Der Riss ist mit Nickel oder einem Nickelsilizid gefüllt. Bild 3: Es bilden sich nicht nur längliche Risse durch die Ultraschallbehandlung aus, auch weit ausgedehnte Strukturen sind sichtbar. Bild 4: EDX-Analyse des Risses aus Bild 3. Bild 5: 40000-fache Vergrößerung eines Risses. Es haben sich Hohlräume in der Rissstruktur gebildet. Bild 6: Nicht vollständig mit Ni gefüllte Gräben sind sichtbar. Es befinden sich Hohlräume in der Rissstruktur.

### 3.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die Mechanismen der nasschemischen Metallabscheidung mit ihren Vor- und Nachteilen diskutiert. Es wurden drei unterschiedliche Plattiertechniken vorgestellt: die außenstromlose Abscheidung, die elektrochemische Abscheidung und die lichtinduzierte elektrochemische Abscheidung.

Techniken zum Öffnen von  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schichten, die im Rahmen dieser Arbeit Verwendung fanden, wurden eingeführt und evaluiert. Pasten und Tinten können durch die  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schicht die Emitterstruktur kontaktieren und dienen damit als sogenannte Saatschicht für den folgenden Plattiervorgang. Alternativ kann die  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schicht nasschemisch oder mithilfe von Laserverfahren geöffnet werden. Alle verwendeten Verfahren bieten spezifische Vor- und Nachteile bezüglich der Uniformität, der Strukturgröße oder der Aufwendigkeit in der Herstellung.

Einen besonderen Vorteil bietet die Nutzung von Nickel zur Kontaktierung von Emitterstrukturen, da durch gezielte Erwärmung eine Nickelsilizidschicht zwischen Substrat und Metall gebildet werden kann. Dies wurde anhand von Ni/P-Schichten demonstriert. Dünne, 200-250 nm dicke Ni/P-Schichten können ihre Integrität bei Temperschritten zwischen 350-500 °C bis zu fünf Minuten behalten und so als Diffusionsbarriere dienen. Durch hohe Temperaturen oder lange Sinterdauern können die abgeschiedenen Ni/P-Schichten jedoch aufreißen und können somit nicht mehr als Diffusionsbarriere verwendet werden.

Durch TLM-Messungen wurde demonstriert, dass niedrige spezifische Kontaktwiderstände kleiner  $0,1 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$  für unterschiedliche Emitterstrukturen erreicht werden können. Jedoch war die durchgeführte TLM-Messung stark fehlerbehaftet. Die Untersuchungen haben belegt, dass sich gesinterte Ni/P-Schichten ideal eignen, um hochohmige Emitter zu kontaktieren. Durch den geringen Kontaktwiderstand kann die Fingerbreite stark reduziert werden, ohne dass der Serienwiderstand einer Solarzelle stark beeinflusst wird.

Untersuchungen zur ungewollten Metallabscheidung auf  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schichten wurden mithilfe von REM-Aufnahmen, FIB-Schnitten und EDX-Analysen durchgeführt. Verunreinigungen und kleine Si-Partikel, die sich auf der Emitteroberfläche befanden, sowie Risse im Substrat führten zu einer Störung der  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schicht. An diesen Stellen scheidet sich während des Plattiervorgangs Metall ab.

Für gesinterte Ni/P-Schichten konnte gezeigt werden, dass Nickel über die Risse in das Substrat gelangt. Hierdurch entsteht eine metallische Verbindung zwischen Emitter und Basis, die zu einem Kurzschluss der Raumladungszone führt. Infolgedessen sinken sowohl die Spannung als auch der Füllfaktor der Solarzelle. Die Untersuchung lieferte somit erstmals eine Erklärung dafür, warum plattierte Solarzellen oft einen geringen Parallelwiderstand aufweisen.

Durch eine Reinigung der Substrate, die gezielt organische Verunreinigungen entfernt und durch geringe mechanische Belastung, wurde zusätzlich demonstriert, wie sich die ungewollte Metallabscheidung verhindern lässt.



## 4 Elektrische Charakterisierung von Multi-Busbar-Solarzellen

Eine große Herausforderung bei der Implementierung neuer Zelldesigns stellt die Adaption der vorhandenen Messtechnik an die neue Zellgeometrie dar. Wie bereits in Kapitel 1.2.2 erläutert, besteht die Vorderseite einer unverschalteten Multi-Busbar-Solarzelle ausschließlich aus einem Fingergrid. Im Gegensatz zu einer 3-Busbar-Solarzelle, bei der für eine Messung der Diodenkennlinie die breiten Busbars über Messbrücken mit Kontaktspitzen kontaktiert werden, ohne die Solarzelle zusätzlich abzuschatten (siehe Abbildung 2.1), funktioniert diese Messmethode bei einer Multi-Busbar-Solarzelle praktisch nicht, da eine sehr hohe Anzahl an Kontaktspitzen benötigt werden würde. Im Folgenden sollen verschiedene Ansätze für Messaufbauten zur Charakterisierung der Diodenkennlinie (I(U)-Messaufbau) von Multi-Busbar-Solarzellen vorgestellt und evaluiert werden.

### 4.1 Grundlegende Überlegungen zum Messaufbau

Die Gestaltung einer Halterung für einen I(U)-Messaufbau kann auf zwei Arten ermöglicht werden. Der erste Ansatz verfolgt das Ziel, die Solarzelle so zu vermessen, dass der Gesamtserienwiderstand der Solarzelle minimiert wird. Der zweite Ansatz setzt darauf, die Zelleistung möglichst realistisch wiederzugeben. Das bedeutet, dass der Aufbau so gestaltet ist, dass er die Leistung der Solarzelle im Modul widerspiegelt.

Zur Bestimmung einer möglichst hohen Zelleistung sollten folgende Bedingungen erfüllt werden:

- Die Abschattung des Aufbaus sollte so gering wie möglich sein, damit möglichst keine zusätzliche Abschattung durch sie entsteht. Im Falle des 3-Busbar-Messaufbaus liegen die Messbrücken über den Busbars und haben eine ähnliche Breite wie diese, um zusätzliche Abschattung zu vermeiden.
- Die Solarzelle liegt auf einer Metallplatte mit hoher Wärmeleitfähigkeit und geringem elektrischen Widerstand. So ist gewährleistet, dass sich die Temperatur der Solarzelle während der Messung nicht verändert.
- Die generierte Spannung der Solarzelle sollte direkt auf dem Finger abgegriffen werden, optimalerweise in der Mitte zwischen zwei Busbars, da hier die Ausgleichsströme am geringsten sind.
- Zwischen Lichtquelle und Solarzelle sollten sich keine transparenten Medien wie EVA-Folie oder Modulglas befinden, die das Lichtspektrum durch Absorption oder Reflexion beeinflussen.
- Die Kontaktierung zur Vorderseitenmetallisierung der Solarzelle sollte einen möglichst geringen Kontaktwiderstand aufweisen. Die Messbrücken sollten einen

geringen elektrischen Widerstand mit möglichst hoher Messspitzenanzahl besitzen (siehe Abschnitt 2.1.1).

Diese Voraussetzungen führen dazu, dass der Gesamtserienwiderstand des Messsystems möglichst gering ausfällt. Die Solarzelle erzielt so den maximal erreichbaren Wirkungsgrad bei konstanter Temperatur von 25 °C und einem vorgegebenem Spektrum (AM 1.5) [160].

Soll die Solarzelle ihr Leistungsverhalten im Modul wiedergeben, sollten für die Bestimmung ihrer Diodenkennlinie folgende Bedingungen erfüllt werden:

- Die ermittelte Leistung der Solarzelle soll die Leistung der Zelle im Modul unter vollständig verschalteten Konditionen wiedergeben.
- Die Spannung sollte nicht auf der Solarzelle selbst, sondern erst auf der Messbrücke gemessen werden. Über definierte Vorwiderstände, die den Spannungsverlust im Ribbon oder Draht simulieren, kann die Spannung der Zelle im Modul besser abgeschätzt werden.
- Die Kontaktierung der Rückseite sollte nicht vollflächig, sondern wie im Modul partiell an den Pads erfolgen.
- Die Absorption und die Reflexion des Modulglases und der EVA-Folie müssen bei der Einstellung der Lampen- oder Flasherleistung berücksichtigt werden.
- Die Abschattung des Messaufbaus sollte der Abschattung der Ribbons oder Drähte im Modul möglichst ähnlich sein.

Mit diesen Voraussetzungen kann gewährleistet werden, dass die Messung der Diodenkennlinie einer Solarzelle ihrer Leistung im Modul möglichst ähnlich ist. Hierdurch kann die Leistung des späteren Moduls genauer ermittelt werden. Zusätzlich kann schnell abgeschätzt werden, wie sich eine Optimierung des Zelldesigns auf die Modulleistung auswirken würde.

### 4.1.1 Charakterisierung von Solarzellen

Zum direkten Vergleich der gefertigten Messaufbauten wurden Elektrolumineszenz-Aufnahmen von Solarzellen durchgeführt. Das Elektrolumineszenz-Verfahren (EL) ermöglicht es, den Spannungsabfall auf einer Solarzelle bildgebend darzustellen [161]. Hierbei wird an die kontaktierte Solarzelle eine definierte Spannung angelegt. Der Strom fließt über die Raumladungszone und es findet teilweise ein strahlender Übergang der Ladungsträger zwischen 1-1,3 eV statt [162, 163]. Dies entspricht in etwa der Energie der Bandlücke bei 25 °C [164]. Die emittierte infrarote Strahlung kann anschließend mit einer CCD-Kamera (engl. Charge Coupled Device) detektiert werden. Die Intensität  $\Phi$ , die von der angelegten Spannung  $U$  und vom Ort  $x$  abhängt kann durch eine Exponentialfunktion genähert werden [163].

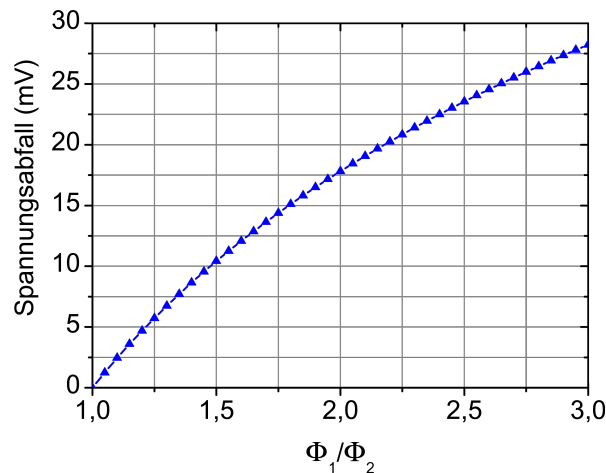
$$\Phi(U, x) = K(x) \left( e^{\frac{qU}{k_B T}} \right) \quad (4.1)$$

$K(x)$  ist ein Vorfaktor, der zu Bestimmung der absoluten Spannung benötigt wird. Da hier die Spannungsdifferenz zwischen zwei Punkten auf einer Solarzelle zu einer gegebenen angelegten Spannung von Interesse ist, kann der Vorfaktor vernachlässigt werden [163]. Die Spannungsdifferenz  $\Delta U$  zwischen zwei Punkten kann somit wie folgt formulieren werden:

$$\Delta U = U_1 - U_2 = \frac{k_B T}{q} \ln \frac{\Phi_1}{\Phi_2} \quad \text{mit } \Phi_1 > \Phi_2. \quad (4.2)$$

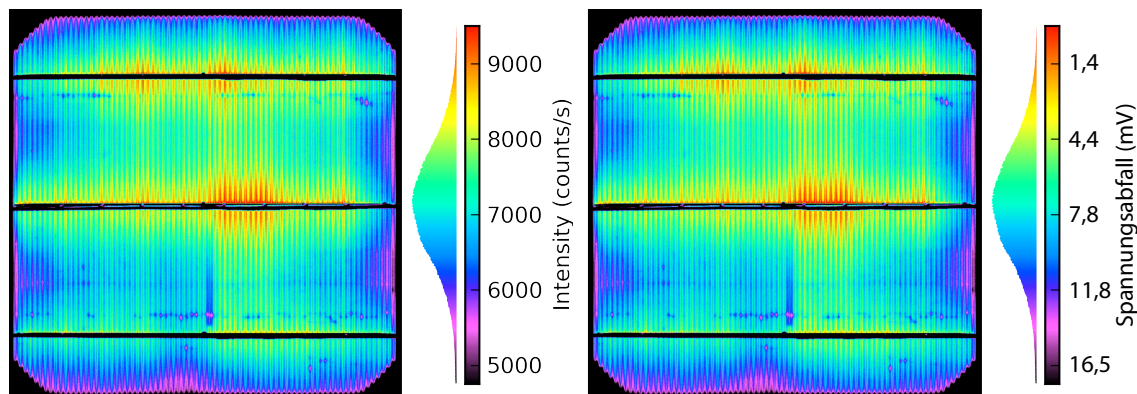
Der Quotient aus Boltzmann-Konstante  $k_B$ , der absoluter Temperatur und der Elementarladung ergibt einen Vorfaktor von ca. 25,7 mV bei 25 °C. Der Zusammenhang zwischen der Spannungsdifferenz zwischen zwei Punkten und dem Quotienten der Intensitäten wird in Abbildung 4.1 verdeutlicht. Mit diesem Zusammenhang lässt sich abschätzen, wie groß der Spannungsabfall auf der Solarzelle ist und wie homogen der Messaufbau die Solarzelle kontaktiert. Durch Intensitätsaufnahmen bei unterschiedlichen Stromdichten kann zusätzlich lokal der Serienwiderstand der Solarzelle abgebildet werden [165, 166].

Als Beispiel für eine Elektrolumineszenzaufnahme ist in Abbildung 4.2 eine Solarzelle dargestellt, die mit dem üblicherweise verwendeten 3-Busbar-Messaufbau kontaktiert wurde. Die Vorderseite ist mit drei Messbrücken mit jeweils zehn Kontaktspitzen kontaktiert. Die Solarzellenrückseite hat vollflächigen Kontakt zur Auflage des Messaufbaus. Die linke Seite zeigt die ursprüngliche EL-Aufnahme mit englischer Beschriftung, die die Intensität, also die Ereignisse pro definierter Zeiteinheit, farblich anzeigt. Die Spannungsdifferenz wurde nach Gleichung 4.2 bestimmt, wobei die maximale Intensität als Referenzpunkt für  $\Phi_2$  gewählt wurde. An den Messspitzen auf den Busbars, an denen die Spannung abgegriffen wird, ist die Spannungsdifferenz nahe Null. Eine Bewegung senkrecht zu den Busbars erhöht die Differenz, da der Strom über einen Widerstand abfließen muss. Eine Messung einer 3-Busbar-Solarzelle bei einer Stromdichte von 40 mA/cm<sup>2</sup> zeigt bereits Spannungsdifferenzen im Bereich größer 16 mV. Besonders die Randbereiche leiden unter hohem Spannungsverlust. Es sei erwähnt, dass die Stromdichte von 40 mA/cm<sup>2</sup> absichtlich etwas zu hoch gewählt



**Abb. 4.1:** Spannungsabfall zwischen zwei Punkten 1 und 2, aufgetragen über den Quotienten der Intensitäten an den Punkten 1 und 2.

wurde, um den Spannungsabfall deutlicher zu veranschaulichen. Eine Stromdichte von  $35\text{-}36\text{ mA/cm}^2$ , die Stromdichte bei maximaler Leistung, wäre für den gemessenen Zelltyp realistischer.



**Abb. 4.2:** EL-Aufnahme einer 3-Busbar-Solarzelle. Links: Ursprüngliches EL-Bild mit Intensitätsskala. Rechts: Äquivalentes Bild mit Umrechnung auf den Spannungsabfall. Die Messung wurde bei einer Stromdichte von  $40\text{ mA/cm}^2$  aufgenommen. Der Spannungsabfall liegt bei dieser Messmethode an den Rändern über  $16,5\text{ mV}$ .

Die EL-Aufnahmen der Solarzelle wurden in Durchlassrichtung aufgenommen. Eine Solarzelle wird jedoch in Sperrrichtung betrieben. Für den Spannungsabfall auf einer Solarzelle unter Betriebsbedingungen führt dies zu einer Umkehrung des Spannungsverlaufs. In der Mitte zwischen den Busbars wäre der Spannungsabfall minimal und an den Busbars hoch.

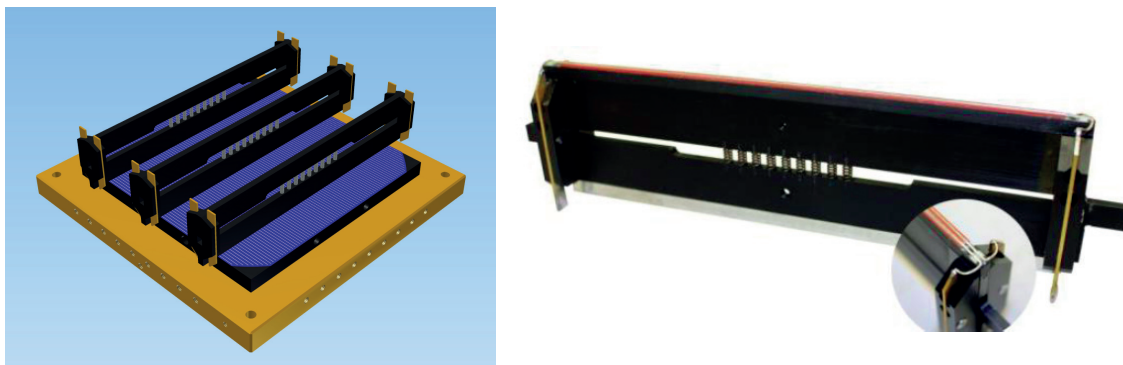
Aufgrund der reduzierten Fingerlänge ist für die Multi-Busbar-Solarzellen bei ausreichender Kontaktierung ein deutlich geringerer Spannungsabfall zu erwarten. Dies wird im Folgenden geprüft.

## 4.2 Messaufbauten für Multi-Busbar-Solarzellen

Im Rahmen dieser Arbeit entstanden einige Prototypen, die zur Entwicklung des momentan verwendeten Aufbaus für die elektrische Charakterisierung von Multi-Busbar-Solarzellen führten. Die bei der Untersuchung dieser Prototypen gewonnenen Erkenntnisse sollen dargestellt und sowohl Vor- als auch Nachteile der jeweiligen Aufbauten analysiert werden.

### 4.2.1 Messaufbau mit Day4™ ecoTest-Messbrücken

Bei diesem Modell handelt es sich um den ersten kommerziell erwerbbaaren Aufbau zur elektrischen Charakterisierung von Multi-Busbar-Solarzellen. Es wurde von der Firma Day4-Energy entwickelt und zeichnet sich dadurch aus, dass sein Aufbau dem eines 3-Busbar-Messaufbaus ähnelt. Eine Zeichnung des Aufbaus ist in Abbildung 4.3 links illustriert. Mit drei breiten Messbrücken wird die Solarzelle, die auf einen metallischen Chuck aufgelegt wird, kontaktiert. Auf der rechten Seite ist solch eine Messbrücke abgebildet. Die Messbrücke wird durch Federn flexibel gelagert. Auf der Unterseite



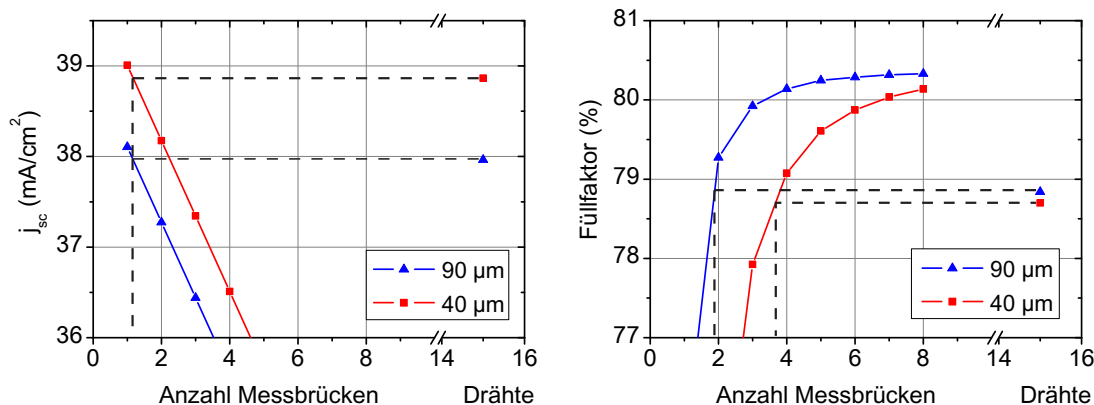
**Abb. 4.3:** Links: Schematischer Messaufbau mit 3 Day4™ ecoTest-Messbrücken [58]. Rechts: Day4™ ecoTest Messbrücke. Strom und Spannung werden über zwei Drähte separat ermittelt. Das rechte Bild wurde aus [167] entnommen.

befindet sich auf einer roten Gummimatte jeweils ein Draht für den Stromabgriff und die Spannungsmessung. Eine detaillierte Analyse dieser Messvorrichtung wurde in [167] durchgeführt.

Eine grundlegende Problematik bei der Charakterisierung mit den Day4™ ecoTest-Messbrücken besteht darin, dass die Messbrücken eine hohe Abschattung besitzen. Eine große Anzahl von Messbrücken würde damit unweigerlich zu erhöhter Abschattung führen. Wie bereits in Kapitel 1.2.4 ausführlich dargestellt wurde, ist bei großer Drahtanzahl die Fingerlänge reduziert und damit auch der Serienwiderstandsbeitrag der Finger gering. Wenn die Fingergeometrie auf eine hohe Drahtanzahl angepasst wird, kann eine Messung mit wenigen breiten Messbrücken den so gemessenen Füllfaktor stark negativ beeinflussen. Eine Simulation mit einer Solarzelle mit selektivem Emitter und Siebdruckmetallisierung (siehe Kapitel 1.4) verdeutlicht den Einfluss der Messbrückenanzahl auf den Füllfaktor, die generierte Stromdichte und die Effizienz der Solarzelle. Die Breite einer Messbrücke beträgt 3,2 mm. Beide Messdrähte haben die Abmessung  $400\ \mu\text{m} \times 700\ \mu\text{m}$ . Im Vergleich zu einem  $250\ \mu\text{m}$  breiten Kupferdraht ist der Linienwiderstand bei gleicher Leitfähigkeit beider Drähte fast sechs Mal niedriger. Da die Drähte aus Silber bestehen, ist die tatsächliche Leitfähigkeit der Messdrähte sogar noch höher.

Als Referenz für die oben beschriebene Simulation wurde eine Solarzelle mit 15 runden,  $250\ \mu\text{m}$  dicken Kupferdrähten verschaltet simuliert. Strom und Spannung wurden einseitig abgegriffen. Die Fingerbreite betrug  $90\ \mu\text{m}$ . Zusätzlich wurde eine Solarzelle mit  $40\ \mu\text{m}$  breiten Fingern simuliert, um die Auswirkung auf die Abschattung und die Veränderung des Füllfaktors zu demonstrieren. Nach den Simulationen aus Kapitel 2.4.1 hat eine Solarzelle mit schmalen Fingern eine höhere Leistung, da sie bei einer Verschaltung mit 15 Drähten eine geringere Abschattung aufweist. Die Ergebnisse der Simulation werden in den Abbildungen 4.4 und 4.5 vorgestellt.

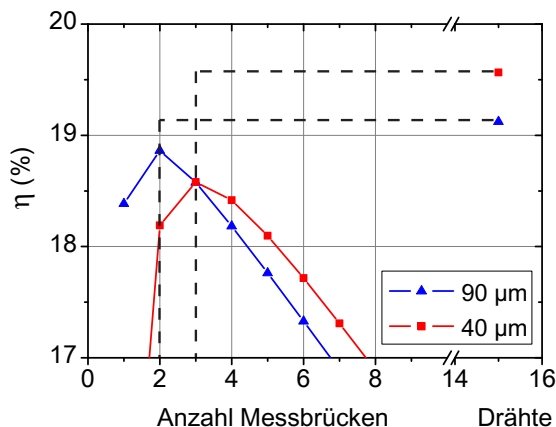
Zum einfacheren Ablesen wurden schwarze gestrichelte Linien in das Schaubild eingefügt. Ihr Schnittpunkt zeigt die optimale Anzahl an Messbrücken bezogen auf die Referenz an. Die Betrachtung der Stromdichte in Abbildung 4.4 links zeigt, dass mit zunehmender Anzahl an Messbrücken die generierte Stromdichte sinkt, da die Abschattung durch die Messbrücken steigt. Für die Referenzzellen würde dies bedeuten, dass bei einer Fingerbreite von  $90\ \mu\text{m}$  die optimale Anzahl an Messbrücken zwischen



**Abb. 4.4:** Simulierte messbare Stromdichte (links) und messbarer Füllfaktor (rechts), aufgetragen über die Anzahl der Messbrücken für zwei Solarzellen mit 90  $\mu\text{m}$  beziehungsweise 40  $\mu\text{m}$  breiten Fingern. Zusätzlich sind zwei auf der Vorderseite verschaltete Solarzellen mit 15 jeweils 250  $\mu\text{m}$  breiten Drähten und 90  $\mu\text{m}$  beziehungsweise 40  $\mu\text{m}$  breiten Fingern abgebildet. Die Schnittpunkte der gestrichelten schwarzen Linien zeigen die optimale Anzahl an Messbrücken.

eins und zwei liegt, sofern als Referenz eine Multi-Busbar-Solarzelle mit 15 Drähten verwendet wird. Ähnliches Verhalten zeigt die Solarzelle mit schmalen Fingern. Hier liegt der optimale Wert zwischen einer und zwei Messbrücken.

Das rechte Schaubild zeigt, dass bei einer Reduzierung der Fingerbreite die Anzahl an Messbrücken erhöht werden muss, um den Referenzwert abzubilden. Optimal wären zwei (90  $\mu\text{m}$  Finger) beziehungsweise vier (40  $\mu\text{m}$  Finger) Messbrücken. Gut zu erkennen ist ebenfalls, dass eine große Anzahl an Messbrücken den Füllfaktor zu stark überbewerten würde, da der Widerstand der Messbrücken gering ausfällt. Diese Problematik wurde bereits bei der I(U)-Messung von 3-Busbar-Solarzellen in Kapitel 2.1.1 thematisiert. Auch hier wurde durch den geringen Widerstand der Messbrücken der Füllfaktor überbewertet. In Abbildung 4.5 ist der Wirkungsgrad in Abhängigkeit



**Abb. 4.5:** Simulierter messbarer Wirkungsgrad von zwei Solarzelle mit 90  $\mu\text{m}$  beziehungsweise 40  $\mu\text{m}$  breiten Fingern, bei Variation der Anzahl der Messbrücken im Vergleich zu zwei Solarzellen mit 15 jeweils 250  $\mu\text{m}$  dicken Drähten und 90  $\mu\text{m}$  beziehungsweise 40  $\mu\text{m}$  breiten Fingern.

der Messbrücken aufgetragen. Für Solarzellen mit 90  $\mu\text{m}$  breiten Fingern liegt der optimale Wirkungsgrad bei zwei Messbrücken. Für die Bestimmung des Füllfaktors wären zwei und für die Bestimmung der Stromdichte eine Messbrücke geeigneter. Bezüglich der Solarzelle mit 40  $\mu\text{m}$  breiten Fingern ergibt sich ebenfalls keine optimale Konfiguration. Auch hier kann der Wirkungsgrad nicht exakt bestimmt werden. Am geeignetsten ist ein Aufbau mit drei Messbrücken. Für die Solarzelle mit 90  $\mu\text{m}$  breiten Fingern liegt der optimale Wirkungsgrad bei zwei Messbrücken. Der Wirkungsgrad liegt 0,26 %<sub>abs</sub> unter der simulierten Referenz. Der Füllfaktor hingegen wird 0,4 %<sub>abs</sub> zu hoch angegeben. Die Stromdichte zeigt bei zwei Messbrücken eine Abweichung von 0,7 mA/cm<sup>2</sup>. Noch gravierender sind die Abweichungen bei der Solarzelle mit 40  $\mu\text{m}$  breiten Fingern. Im Gegensatz zur Solarzelle mit 90  $\mu\text{m}$  breiten Fingern sollte hier die Anzahl der Messbrücken auf drei erhöht werden. Der Wirkungsgrad wird um 1,0 %<sub>abs</sub>, die Stromdichte um 1,5 mA/cm<sup>2</sup> und der Füllfaktor um 0,8 %<sub>abs</sub> zu niedrig gemessen.

Für eine optimierte plattierte Multi-Busbar-Solarzelle wären die Abweichungen noch höher. In Kapitel 2.5.1 wurde bereits gezeigt, dass bei einer hohen Drahtanzahl der Linienwiderstand der Finger erhöht ist. Bei geringer Messbrückenanzahl wird der Füllfaktor somit stark unterschätzt. Dies ist bereits in Abbildung 4.4 rechts sichtbar. Durch eine Reduzierung der Fingerbreite bricht der Füllfaktor bei geringer Messbrückenanzahl ein. Für jede Fingerbreite muss die Anzahl der Messbrücken neu angepasst werden. Eine genaue Angabe der Zelleistung im Modul ist nicht möglich. Eine weitere Schwäche des Aufbaus liegt darin, dass er mögliche Fingerunterbrechungen oder -einschnürungen bei einer geringen Messbrückenanzahl überbewertet, da die effektive Fingerlänge stark erhöht wird (siehe Kapitel 1.2.4).

Aus diesen Gründen wurde nach alternativen Ansätzen zur Messung von Multi-Busbar-Solarzellen gesucht, bei denen die Anzahl an Kontaktbrücken oder -drähten dem späteren Zelldesign im Modul entspricht.

#### 4.2.2 Messaufbau mit gefederten Messbrücken

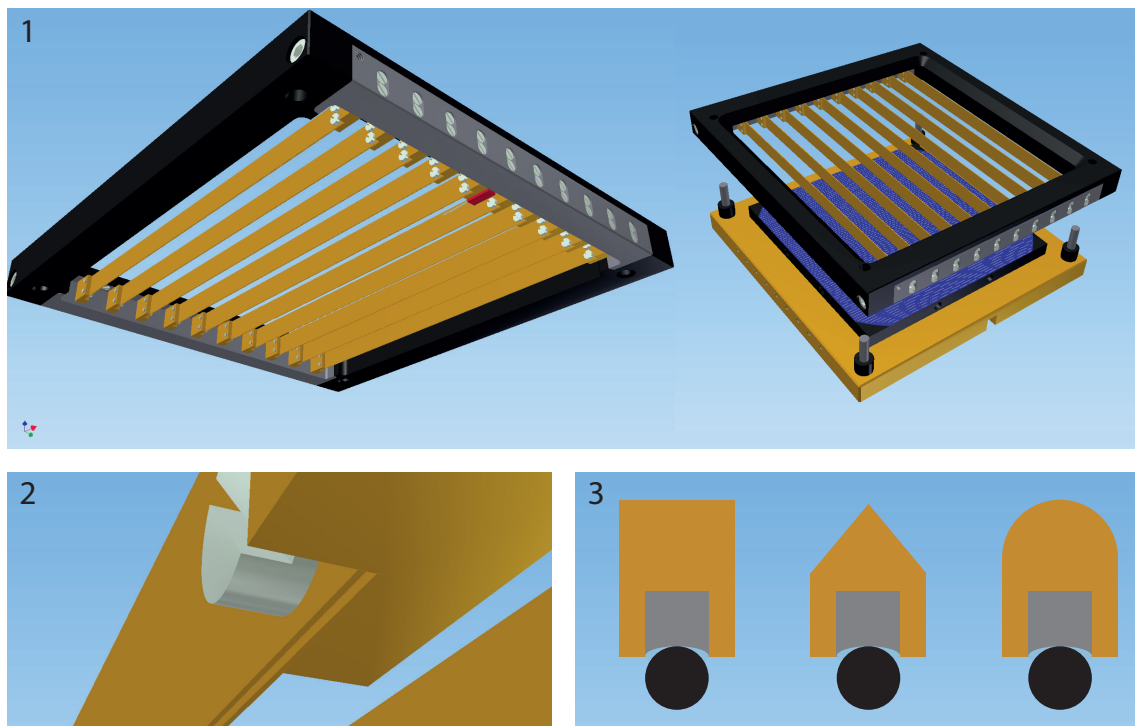
Wie im vorherigen Kapitel beschrieben, eignet sich eine geringe Anzahl breiter Messbrücken nicht, um eine Multi-Busbar-Solarzelle adäquat zu charakterisieren. Deshalb liegt der Ansatz nahe, die Anzahl der Messbrücken zu erhöhen und die Breite der Messbrücken gleichzeitig möglichst schmal zu halten. In Abbildung 4.6 ist der schematische Aufbau der optimierten Messvorrichtung in Bild 1 dargestellt. Auf der linken Seite befindet sich der Rahmen mit einer großen Anzahl an Messbrücken. Strom und Spannung lassen sich jeweils separat an den Enden der Messbrücken abgreifen. Auf der rechten Seite ist der gesamte Aufbau abgebildet. Die Auflagefläche ist metallisch und mit einer Vakuumanasugung versehen. Temperatursensor und Spannungsfühler sind in die Auflage integriert und kontaktieren die Solarzelle auf der Rückseite. Die Umrahmung der Auflage besteht aus Plastik, um sowohl semi- als auch full-square Solarzellen messen zu können. Die isolierende Umrahmung wird benötigt, um Kurzschlüsse zwischen Draht und Auflage zu vermeiden. Die Drähte würden sonst an den Kantenbereichen einer semi-square Solarzelle die Auflage kontaktieren.

In Abbildung 4.6 ist in Bild 2 die Vergrößerung einer Messbrücke dargestellt. Sie ist auf der Unterseite mit einem Graben versehen, der mit einem flexiblen Material gefüllt ist. Das Füllmaterial ist aus Anschauungsgründen nicht dargestellt.

Der Querschnitt diverser Messbrücken ist in Abbildung 4.6 in Bild 3 illustriert. Die

Breite der Gräben hat dieselbe Dimension wie der Draht (schwarz). Die Gräben sind mit flexiblen Material aufgefüllt (grau). Exemplarisch sind drei mögliche Konfigurationen der Messbrücke aufgeführt (flach, dreieckig, rund). Durch die runde oder dreieckige Oberseite der Messbrücke kann die effektive Abschattung der Messbrücke verringert werden. Die Messbrücken dienen nicht als Stromleiter, sondern agieren ausschließlich als Halterung, da das Füllmaterial im Graben nicht leitend ist. So wird gewährleistet, dass der Füllfaktor möglichst realistisch ermittelt wird. Der Strom kann entweder einseitig oder beidseitig vom Draht abgegriffen werden.

Die Herstellung von dünnen Messbrücken mit Gräben erweist sich jedoch als kompliziert. Versuche mit  $450\ \mu\text{m}$  breiten Brücken, die einen  $250\ \mu\text{m}$  breiten Graben besaßen, zeigten, dass sich bei hohem Anpressdruck die Unterkante der Messbrücken verbiegt. Die präzise Lagerung des Messdrahtes in der Grabenführung wird dadurch erschwert. Springt ein Draht teilweise aus der Führung, stört er den Messvorgang empfindlich, da er nicht mehr gefedert gelagert ist.



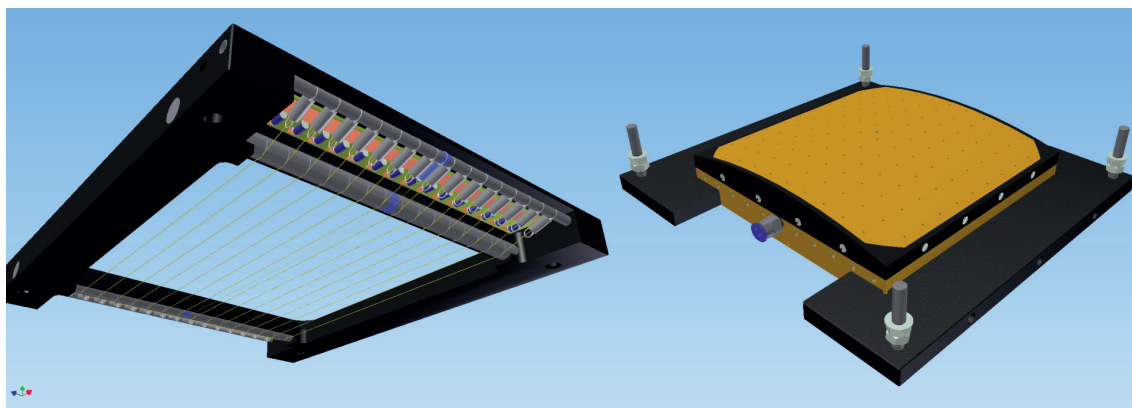
**Abb. 4.6:** Bild 1: Schematischer Aufbau einer Messvorrichtung für Multi-Busbar-Solarzellen [58]. Links: Rahmen mit vielen dünnen Messbrücken. Rechts: Auflage mit Halterungen für den Rahmen. 2: Vergrößerung einer Messschiene. 3: Querschnitt einer Messschiene in drei Konfigurationen (flach, Dreieck, rund). In Grau ist der mit einem flexiblen Material gefüllte Graben gezeigt. Der darunterliegende Draht in Schwarz ist somit federnd gelagert.

### 4.2.3 Messaufbau mit gebogener Auflage

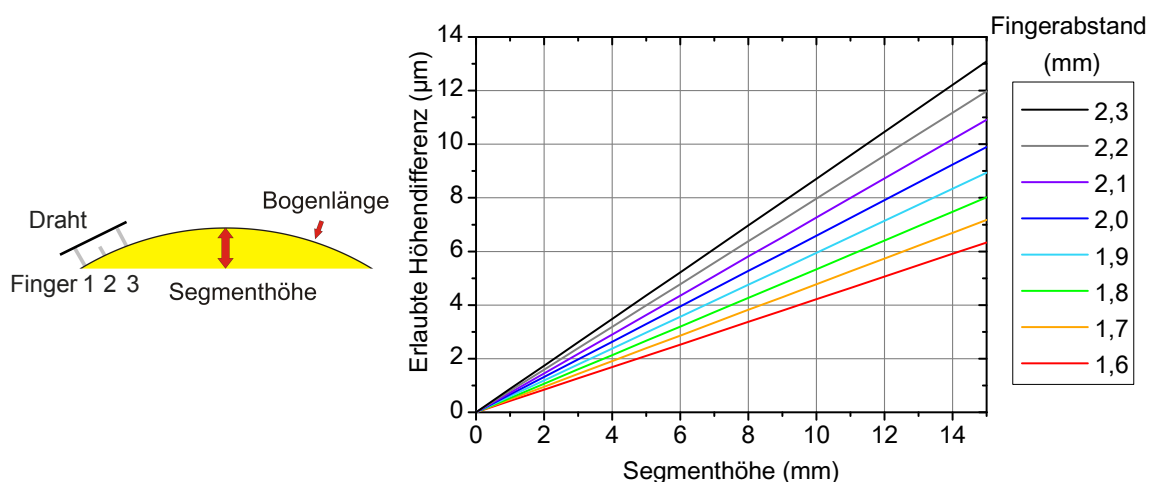
Für die I(U)-Messung spielt die Anzahl der Drähte und die Geometrie derselben eine wichtige Rolle. Deshalb wurde ein Ansatz gewählt, bei dem die Drähte die Solarzelle kontaktieren. Die Drähte werden auf einen Rahmen gespannt und an den Enden gefedert gelagert. So entsteht keine zusätzliche Abschattung, da keine Führungsschienen benötigt werden. Da die Drähte beim Auflegen auf eine flache Solarzelle ausschließlich an den Kanten der Zelle Druck auf diese ausüben würden, wurde eine gebogene Metallplatte als Auflage verwendet. Die Biegung der Platte ist konstant und die Segmenthöhe beträgt 10 mm. Der Aufbau ist in Abbildung 4.7 dargestellt. Die Halterung besteht aus elektrisch isolierendem Material und bietet den Vorteil, dass der Strom sowohl einseitig als auch beidseitig abgegriffen werden kann. Die Drähte sind auf beiden Seiten mit Federn verbunden, die bei zu hohem Anpressdruck nachgeben. Jeder Draht besitzt wiederum einen in Reihe geschalteten Vorwiderstand an jedem Ende, um den Stromfluss zu homogenisieren.

In der Mitte der Vorrichtung befindet sich ein dünner, teilweise isolierter Draht, der die Spannung direkt in der Mitte der Zelle abgreift. Alternativ kann die Spannung an der Zellkante abgegriffen werden. Auf der rechten Seite des Bildes ist die gebogene Auflage dargestellt. Eine Vakuumvorrichtung saugt die Solarzelle an die Auflage. Der gebogene Messaufbau ist in Abbildung 4.8 links illustriert. Die Biegung der Auflage hat große Auswirkungen auf die Kontaktierbarkeit der Finger. Insbesondere bei unterschiedlichen Fingerhöhen kann es zum Kontaktverlust kommen, da ein flacher Finger (grau 2) zwischen zwei benachbarten hohen Fingern (grau 1 und 3) nicht kontaktiert werden kann. Die Bogenlänge beträgt 156 mm. Die Segmenthöhe ist variabel und wird im Schaubild durch einen roten Doppelpfeil symbolisiert. Wenn ein Draht über das Fingergrid gelegt wird und Finger 2 bedeutend niedriger als die benachbarten Finger ist, kontaktiert der Draht Finger 2 nicht mehr. Durch eine Vergrößerung der Segmenthöhe lässt sich dieser Effekt ausgleichen. Durch die Biegung der Solarzelle werden jedoch die beleuchtete Zellfläche und der Einstrahlwinkel verändert.

Auf der rechten Seite in Abbildung 4.8 ist die noch erlaubte Höhendifferenz zwischen den Fingern bei Variation des Fingerabstands und der Segmenthöhe aufgetragen. Wird die erlaubte Höhendifferenz überschritten, wird der mittlere Finger nicht mehr kontak-



**Abb. 4.7:** Messaufbau mit gebogener Auflage. Auf der linken Seite befindet sich die Halterung, die auf die Solarzelle gepresst wird. Rechts ist der gebogene Chuck abgebildet [58].

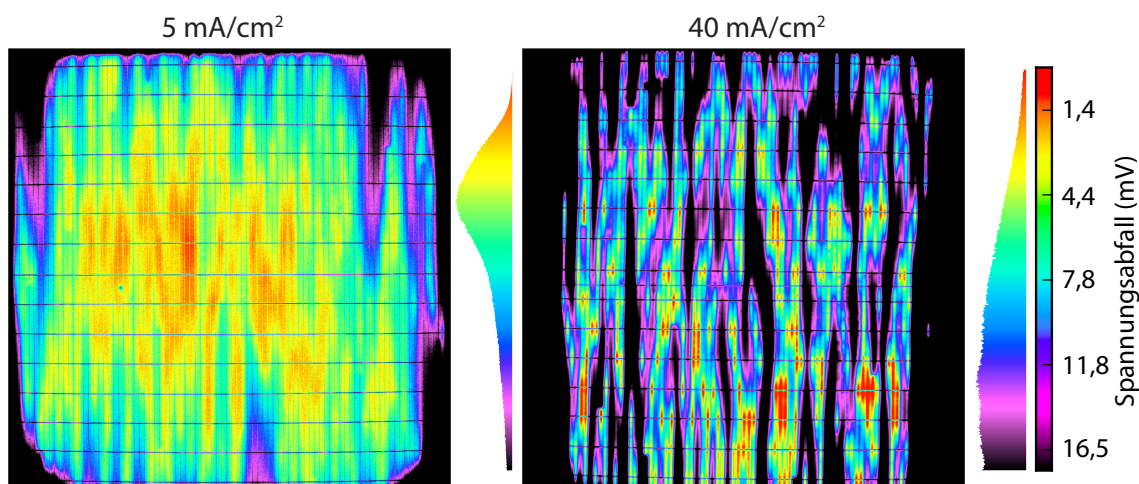


**Abb. 4.8:** Links: Darstellung der gebogenen Auflage. Höhenvariationen des Grids können dazu führen, dass Fingern durch den Draht nicht kontaktiert werden. Rechts: Simulation der erlaubten Höhendifferenz der Fingerstruktur für eine quadratische Solarzelle mit 156 mm Kantenlänge, bei Variation der Segmenthöhe und des Fingerabstands.

tiert. Mit steigendem Fingerabstand und Vergrößerung der Segmenthöhe vergrößert sich die erlaubte Höhendifferenz. Für eine maximal angenommene Segmenthöhe von 15 mm beträgt die Höhendifferenz bei einem Fingerabstand von 2,3 mm ca.  $13 \mu\text{m}$ . Eine Verringerung des Fingerabstands auf 1,6 mm ermöglicht Höhendifferenzen von ca.  $6 \mu\text{m}$ . Bei einer Siebdruckmetallisierung nach heutigem Standard können somit erhebliche Probleme bei der vollständigen Kontaktierung der Solarzelle auftreten. Die ermittelte Höhendifferenz auf einem Siebdruckfinger aus Abbildung 3.4 liegt bei ca.  $8 \mu\text{m}$ . Geeigneter für diesen Aufbau erscheinen deshalb plattierte Finger, da diese eine homogenere Höhenverteilung aufweisen.

Die Segmenthöhe der gefertigten Auflage betrug 10 mm. Eine stärkere Biegung erscheint kritisch, da die Solarzelle durch die Messung nicht zu Schaden kommen sollte. Der Messaufbau wurde mittels EL-Verfahren auf die Homogenität der Kontaktierung sowie den Spannungsabfall zwischen den Fingern evaluiert. Der Spannungsabfall wurde gleich skaliert wie die EL-Aufnahmen der 3-Busbar Solarzelle aus Abbildung 4.2. Dies wird für alle folgenden EL-Messungen der Messaufbauten beibehalten.

Abbildung 4.2 belegt, dass bei einer 3-Busbar-Solarzelle der maximale Spannungsabfall bei einer Stromdichte von  $40 \text{ mA/cm}^2$  bei ca. 16 mV liegt. In Abbildung 4.9 links ist eine EL-Aufnahme bei einer Stromdichte von  $5 \text{ mA/cm}^2$  dargestellt. Die Kantenbereiche, über die die Drähte laufen, werden unvollständig kontaktiert. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass der Rahmen nicht stark genug auf die Zelle gepresst wurde. Die Drähte liegen deshalb in den Randbereichen nicht auf der Solarzelle auf. Hierbei handelt es sich allerdings um ein lösbares Problem. Ein Hindernis, das jedoch nicht umgangen werden kann, stellt die Variation der Fingerhöhe dar. Sind die Höhendifferenzen benachbarter Finger zu groß, kann wie oben beschrieben keine technische Lösung des Problems gefunden werden. In nicht kontaktierten Bereichen bilden sich längliche Regionen geringer Intensität heraus. Besonders anschaulich ist dies im linken Bild in der Mitte unten dargestellt. Bei Erhöhung der Stromdichte auf  $40 \text{ mA/cm}^2$ , wie in Abbildung 4.9 rechts, bilden sich die Kontraste noch stärker



**Abb. 4.9:** EL-Aufnahme einer Multi-Busbar-Solarzelle mit Siebdruckmetallisierung auf einer gebogenen Auflage. Beide Aufnahmen sind gleich skaliert. Links: Bereits bei  $5 \text{ mA/cm}^2$  treten starke Inhomogenitäten auf. Nicht-kontaktierte Fingerbereiche sind deutlich zu erkennen. Rechts: Bei  $40 \text{ mA/cm}^2$  wird nur noch ein geringer Teil der Solarzelle ausreichend kontaktiert.

aus. Sichtbar sind sehr gut kontaktierte Bereiche (rechte untere Ecke). Hier liegt der Spannungsabfall auf dem Finger unter  $2 \text{ mV}$ . Der Großteil der Solarzelle ist jedoch unzureichend kontaktiert.

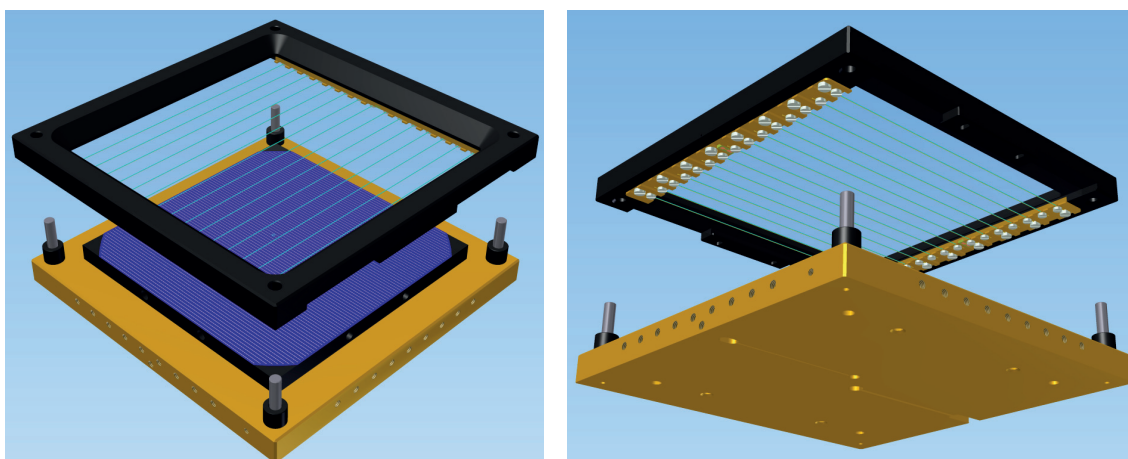
Aufgrund dieser Analyse wurde deutlich, dass sowohl eine Anpassung der Federspannung des Messaufbaus als auch eine Veränderung des Anpressdrucks des Rahmens die Unebenheiten auf der Solarzelle nicht ausgleichen können. Eventuell könnte die Segmenthöhe weiter vergrößert werden, allerdings muss dann damit gerechnet werden, dass die Solarzelle beim Auflegevorgang anreißt oder sogar vollständig zerbricht. Zusätzlich führen Größen wie Welligkeit und Keiligkeit des Wafers zu einer Verschlechterung der Messbedingungen. Ein ähnlicher Ansatz wurde extern entwickelt und kommt zu ähnlichen Ergebnissen [168].

Für Wafer mit hoher Homogenität, einer homogen aufgetragenen Metallisierung und großem Fingerabstand kann dieses Messkonzept verwendet werden.

#### 4.2.4 Messaufbau mit flexibel gelagerten Drähten

Ein weiterer Ansatz zur Kontaktierung von Multi-Busbar-Solarzellen besteht darin, die Drähte durch ein transparentes Medium auf die Solarzelle zu pressen. Hierfür wurde eine Glasplatte mit 15 Gräben strukturiert. Die Gräben wurden anschließend mit einem flexiblen Material aufgefüllt. Die Glasplatte absorbiert und reflektiert wie in einem Modul einen Teil des Lichts. Damit spiegelt dieses Messverfahren durch Einbringung des transparenten Mediums zwischen Lichtquelle und Solarzelle ein deutlich realistischeres Szenario einer Solarzelle im Modul wider. Der Strom kann am Rahmen einseitig oder beidseitig abgegriffen werden. Durch niedrige in Reihe geschaltete Widerstände an den Enden der Drähte wird der Stromfluss homogenisiert.

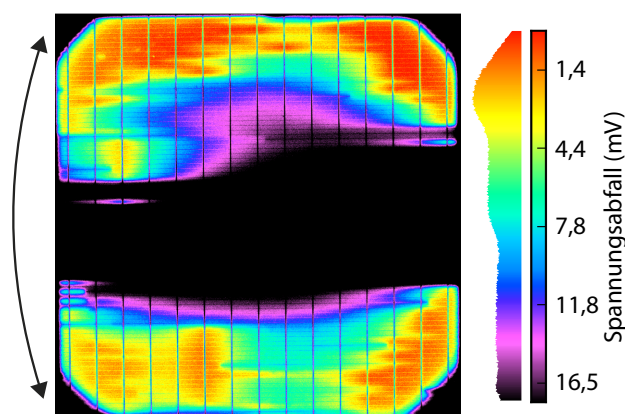
Der Messaufbau kann in zwei Varianten betrieben werden. In der ersten Variante wird der Rahmen mit der Glasplatte und den Drähten auf den Chuck gepresst. Eine Zeichnung des Aufbaus ist in Abbildung 4.10 dargestellt.



**Abb. 4.10:** Messaufbau mit flexibel gelagerten Drähten in der Glasplatte [58]. Links: Sicht von schräg oben. Rechts: Sicht von schräg unten.

Die komplette Haltevorrichtung mit Metallaufgabe und Plastikrahmen ist zu sehen (links von oben, rechts von unten). Es sollte allerdings gewährleistet sein, dass der Rahmen möglichst starr ist, um eine homogene Belastung auf die Glasplatte ausüben zu können. In ersten Tests stellte sich heraus, dass sich der Plastikrahmen und die Glasplatte trotz ihrer Dicke von 5 mm leicht verbiegen lassen. In Abbildung 4.11 links ist eine EL-Aufnahme mit dem beschriebenen Aufbau zu sehen. Die EL-Aufnahme wurde bei einer Stromdichte von  $5 \text{ mA/cm}^2$  durchgeführt. Durch Anpressen des Rahmens über die Führungzapfen und die Zugspannung der Leitungsdrähte verbiegt sich die Glasplatte. Die Wölbung der Biegung wird in der Zeichnung durch einen schwarzen Pfeil angedeutet. Als Resultat werden die Drähte in der Mitte der Solarzelle nicht angepresst.

Für eine homogenere Kontaktierung der Solarzelle müsste die Zugspannung der Drähte beim Einbau besser reguliert werden. Ein möglichst starrer Rahmen kann die



**Abb. 4.11:** EL-Aufnahme einer Multi-Busbar-Solarzelle mit oben beschriebenem Aufbau, gemessen bei  $5 \text{ mA/cm}^2$ . Die Glasplatte wird durch die Zugspannung der Drähte und den Druck am Rahmen gebogen (durch schwarzen Pfeil angedeutet). Die Mitte der Solarzelle wird dadurch nicht kontaktiert.

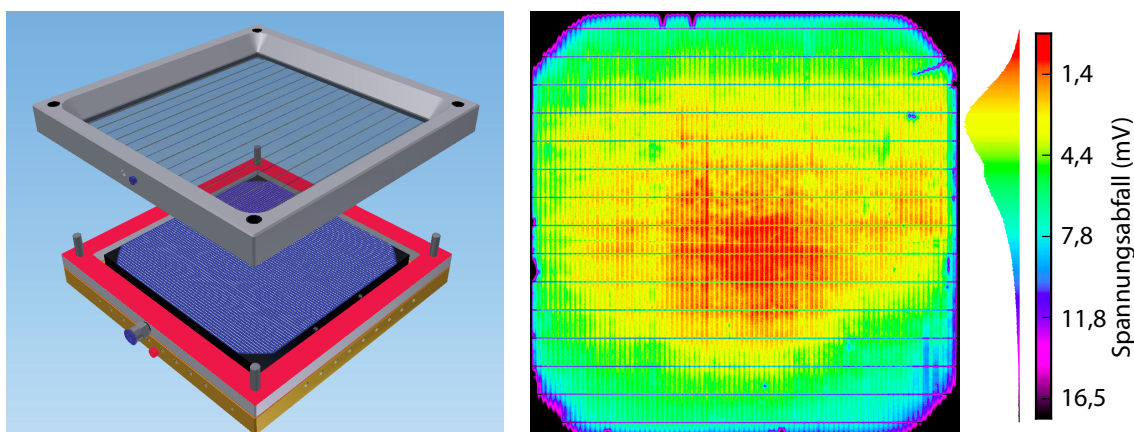
Biegung weiter reduzieren. Eine dickere Glasplatte könnte für eine höhere Steifigkeit des Aufbaus sorgen.

In der zweiten Variante des Messaufbaus wird die Solarzelle hermetisch zwischen der Auflage und dem Rahmen eingeschlossen. Zwischen Rahmen und Auflage wurde ein weiteres Segment eingefügt, das jeweils auf Ober- und Unterseite mit einer Gummidichtung versehen ist. Durch Anlegen eines Vakuums wird die so entstandene Kammer evakuiert. Die Glasplatte wird durch das Vakuum auf die Solarzelle gepresst.

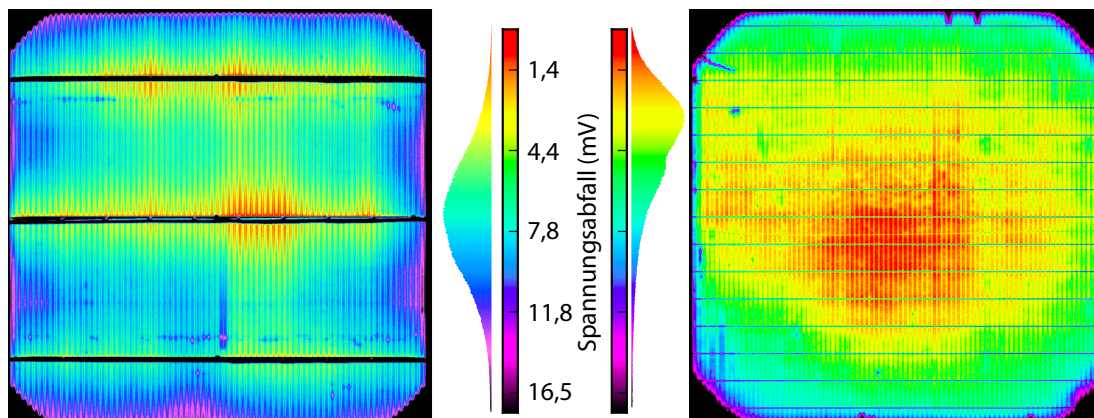
Es besteht auch die Möglichkeit, die Glasplatte durch eine transparente Folie auszutauschen. Allerdings wird die Folie durch den Unterdruck auf die Solarzelle gepresst und steht so in direktem Kontakt mit ihr. Dies kann dazu führen, dass sowohl die Folie als auch die Solarzelle beschädigt werden.

Diese Messmethode bietet den Vorteil, dass die Glasplatte aufgrund des Unterdrucks gleichmäßig auf die Solarzelle gepresst wird. Der Rahmen wurde aus Edelstahl gefertigt, um größtmögliche Steifigkeit zu gewährleisten. In Abbildung 4.12 links ist der optimierte Aufbau dargestellt. Auf der rechten Seite ist das Ergebnis der EL-Messung einer Multi-Busbar-Solarzelle dargestellt. Die Solarzelle wird ganzflächig kontaktiert. In der rechten oberen Ecke ist ein Riss sichtbar. Die Intensität ist in der Mitte der Solarzelle erhöht. Der Anpressdruck der Drähte/Glasplatte ist in der Mitte der Solarzelle höher als an den Rändern. Bei gleichmäßig verteiltem Druck der Drähte auf die Solarzelle müsste der Spannungsabfall zwischen den Drähten identisch sein. Möglicherweise ist die Glasplatte an den Rändern nicht flexibel genug gelagert und kann dadurch im Randbereich weniger nachgeben. An der rechten unteren Ecke scheinen einige Finger nicht ausreichend kontaktiert zu sein.

Abbildung 4.13 zeigt den direkten Vergleich zwischen der 3-Busbar- und der Multi-busbar-Kontaktierung mit 15 jeweils 250  $\mu\text{m}$  dicken Drähten. Hierfür wurden Abbildung 4.2 und Abbildung 4.13 direkt gegenüber gestellt. Die rechte Aufnahme wurde aus Anschauungsgründen gespiegelt, damit die Skalen nebeneinander liegen. Der Spannungsabfall auf der Solarzellen zeigt deutlich, dass die Multibusbar-Solarzelle homogener kontaktiert wird, da der Spannungsabfall geringer ausfällt. Dies liegt vor allem daran, dass der Spannungsabfall aufgrund der geringen effektiven Fingerlänge



**Abb. 4.12:** Links: Messaufbau mit Vakuumanlage und Stahlrahmen [58]. Rechts: EL-Messung einer Multi-Busbar-Solarzelle bei  $40 \text{ mA/cm}^2$  gemessen. Die Zelle weist einen geringen Spannungsabfall auf.



**Abb. 4.13:** Direkter Vergleich der Messaufbauten. Elektrolumineszenzaufnahmen bei  $40 \text{ mAcm}^2$ . Links: 3-Busbar-Aufbau. Rechts: Multi-Busbar-Aufbau mit 15 jeweils  $250 \mu\text{m}$  dicken Drähten. Die EL-Messung zeigt, dass die Solarzelle durch die 15 Drähte des Multi-Busbar-Aufbaus homogener kontaktiert wird.

geringer ausfällt als bei der 3-Busbar-Solarzelle. Der geringere Serienwiderstandsbeitrag der Vorderseitenmetallisierung führt somit zu einem geringeren Spannungsabfall. Damit können erstmals die Ergebnisse der Simulation aus Kapitel 2.1.3 grafisch dargestellt werden.

Der Aufbau ist damit geeignet, Multi-Busbar-Solarzellen ausreichend homogen elektrisch zu charakterisieren. Zur Ermittlung der Zellparameter von Multi-Busbar-Solarzellen wird ein Multi-Busbar-Aufbau mit 15 jeweils  $250 \mu\text{m}$  dicken Drähten verwendet. Das Design des Aufbaus wurde zum Patent angemeldet [169]. Teile der Evaluation wurden veröffentlicht [170].

### 4.3 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden unterschiedliche Messaufbauten zur Kontaktierung von Multi-Busbar-Solarzellen evaluiert. Zuerst wurden grundlegende Überlegungen zum Aufbau solcher Halterungen getätigt. Entscheidend für den Messaufbau ist, ob die Solarzelle eine möglichst hohe Leistung erzielen soll oder ob die Messung eher auf die spätere Leistung der Solarzelle im Modul angepasst werden soll. Zur Charakterisierung der Aufbauten wurde die Elektrolumineszenz-Messmethode eingeführt und der Spannungsabfall auf einer 3-Busbar-Solarzelle mithilfe dieser Messmethode ermittelt.

Es konnte belegt werden, warum ein bereits vorhandener Messaufbau sich als unzureichend erweist. Die Messungen des Füllfaktors und des generierten Stroms mit drei Messbrücken entsprechen nicht den Erwartungswerten, wie eine Simulation mit 15 jeweils  $250 \mu\text{m}$  dicken Drähten zeigte. Die Verwendung vieler schmaler Messbrücken könnte Abhilfe schaffen. Dies ist jedoch schwer umzusetzen, da die Messbrücken sehr schmal sein müssen.

Ein gebogener Messaufbau mit Drähten kann die Solarzelle nur bei ausreichend hoher Segmenthöhe kontaktieren. Zusätzlich wird die aktive Fläche der Solarzelle durch die Biegung verringert.

Der Aufbau mit flexibel gelagerten Drähten in einer Glasplatte zeigte eine inhomogene Kontaktierung der Solarzelle. Der Aufbau könnte allerdings durch eine zusätzliche

Versteifung des Rahmens und eine angepasste Federung verbessert werden.

Der vielversprechendste Ansatz besteht in der zusätzlichen Nutzung einer Vakuumsaugung, die die Glasplatte auf die Solarzelle zieht. Untersuchungen mit diesem Aufbau zeigten zufriedenstellende Ergebnisse bezüglich der Kontaktierbarkeit von Multibusbar-Solarzellen. Durch den direkten Vergleich des 3-Busbar- mit dem Multi-Busbar-Aufbau konnte belegt werden, wie das Multi-Busbar-Design zu einer Homogenisierung der Spannungsverteilung auf einer Solarzelle beiträgt.



# 5 Untersuchungen auf Zell- und Modulebene

Die Ergebnisse der Simulationen aus Kapitel 2 werden in diesem Kapitel experimentell überprüft. Hierfür werden 3-Busbar- und Multi-Busbar-Solarzellen hergestellt, charakterisiert und miteinander verglichen.

Es werden im Folgenden vier Experimente vorgestellt. Im ersten Experiment wird die Leistung der 3-Busbar- und der Multi-Busbar-Solarzelle auf Zell- und Modulebene miteinander verglichen. Die Drahtdicke der Multi-Busbar-Module wird zusätzlich variiert, um ihren Einfluss auf die Modulleistung darzustellen. Im zweiten Experiment werden Vier-Zell-Module aus 3-Busbar- und Multi-Busbar-Solarzellen untersucht, um den Einfluss der Freiflächen im Modul genauer zu analysieren. Die Optimierung des Silberbedarfs von plattierten Multi-Busbar-Solarzellen wird im dritten Experiment untersucht. Im vierten Experiment wird ein neuartiges Vorderseitendesign für Multi-Busbar-Solarzellen evaluiert. Die Ergebnisse der Experimente werden mit dem Simulationsprogramm abgebildet, um die Aussagekraft der Simulation zu überprüfen.

## 5.1 Untersuchung von Ein-Zell-Modulen

Das erste durchgeführte Experiment soll Aufschluss über die Leistungsverluste von 3-Busbar- und Multi-Busbar-Solarzellen im Modul geben. Hierzu wurden beide Zelltypen hergestellt und elektrisch charakterisiert. Anschließend wurden ausgewählte Solarzellen verschaltet und zu Ein-Zell-Modulen verarbeitet. Zusätzlich wurden zwei unterschiedliche Drahtdicken (250  $\mu\text{m}$  und 300  $\mu\text{m}$ ) zur Verschaltung der Multi-Busbar-Solarzellen verwendet, um die Effekte des Drahtdurchmessers auf die Modulleistung zu analysieren.

### 5.1.1 Beschreibung des Experiments

Für das Experiment werden alkalisch texturierte 6 Zoll semi-square Cz-Wafer mit einem Basiswiderstand von  $2\ \Omega\text{cm}$  verwendet. Die Waferfläche beträgt  $239,12\ \text{cm}^2$ . Die Wafer erhalten eine Emitterdiffusion ( $55\ \Omega/\text{sq}$ ). Der Emitter wird anschließend maskiert und auf ca.  $115\ \Omega/\text{sq}$  zurückgeätzt. Eine Darstellung der verwendeten Emitterprofile wurde bereits in Abbildung 1.2 gezeigt. Es folgt eine nasschemische Kantenisolation. Auf die texturierte Oberfläche der Wafer wird mittels des PECVD-Verfahrens eine  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schicht abgeschieden und die Rückseite vollflächig mit aluminiumhaltiger Siebdruckpaste bedruckt. Die Wafer werden getrocknet und die Vorderseiten werden anschließend mit silberhaltiger Siebdruckpaste metallisiert. Es folgt ein Hochtemperaturschritt in einem Gürtelofen, um die Kontakte zu Emitter und Basis auszubilden. Für eine ausführliche Beschreibung des Fertigungsprozesses von Solarzellen dieser Art sei auf Kapitel 1.1 verwiesen.

Der Fingerabstand beider Zelltypen wird unabhängig voneinander mit dem Simulationsprogramm optimiert. Es wurde ein optimaler Fingerabstand von 2 mm für die 3-Busbar- und 1,8 mm für die Multi-Busbar-Solarzellen ermittelt. Die Breite der Busbars beträgt 1,3 mm. Die Fingerbreite der 3-Busbar-Solarzellen beträgt 70  $\mu\text{m}$ , die Fingerbreite der Multi-Busbar-Solarzelle liegt bei 50  $\mu\text{m}$ .

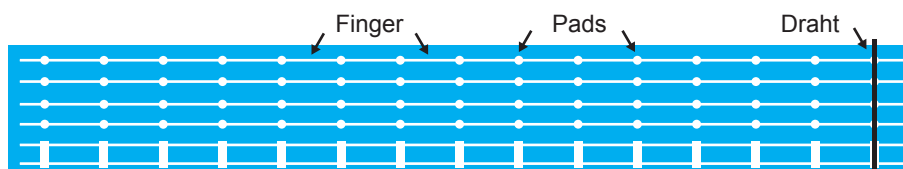
Aus Voruntersuchungen wurde ersichtlich, dass der Lötkontakt zwischen Drähten und Fingern keine ausreichend hohe Adhäsion besitzt. Deshalb wurden auf jeden Finger in einem zweiten Siebdruckschritt 15 runde Vorderseitenpads mit einem Durchmesser von 500  $\mu\text{m}$  gedruckt. Somit kann die Auflagefläche zwischen Draht und Solarzelle erhöht werden. Da die mechanische Belastung der Vorderseitenpads an den Randbereichen besonders groß ist, werden zusätzlich breitere Randpads gedruckt, um die Haftung zu erhöhen. Hierdurch wird ein Abreißen der verlöteten Drähte von der Solarzellenoberfläche verhindert. Ein anderer Ansatz zur Verschaltung der Multi-Busbar-Solarzellen, bei dem die Drähte in die EVA-Folie integriert werden, benötigt diese Vorderseitenpads jedoch nicht [171, 172]. Das neue Metallisierungsschema ist in Abbildung 5.1 verdeutlicht. Rechts im Bild ist in Schwarz ein Draht dargestellt, der über die Finger-Pad-Struktur gelegt wurde. Durch die erhöhte Kontaktfläche wird gewährleistet, dass die Haftung zwischen Draht und Finger ausreichend groß ist und die Drähte sich nicht ablösen.

Für die Vorderseitenpadstrukturen wird eine silberhaltige Paste aufgebracht, die den Emitter nicht kontaktiert. Durch die aufgetragenen Vorderseitenpads wird die Abschattung und der Pastenverbrauch erhöht.

Die Diodenkennlinien der Solarzellen wurden mithilfe eines Flashers der Firma Halm [173] elektrisch charakterisiert. Ein Flasher ist ein Sonnensimulator, der die benötigte Lichtleistung durch eine Xenon-Gasentladungslampe erzeugt. Hierbei werden mehrere „Lichtblitze“ in schneller Abfolge auf die Solarzelle abgegeben und die Diodenkennlinie bestimmt [174]. Eine detaillierte Untersuchung verschiedener I(U)-Messtechniken für kristalline Si-Solarzellen wurde in [175] getätigt.

Für die Messung der Multi-Busbar-Solarzellen besteht der Messaufbau aus 15 jeweils 250  $\mu\text{m}$  breiten Kupferdrähten. Der Strom wird beidseitig abgegriffen, um den Serienwiderstand der Drähte möglichst gering zu halten.

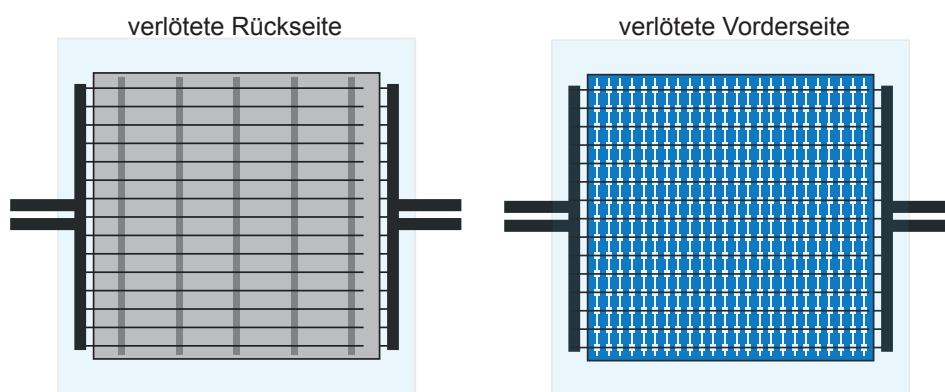
Nachdem die Diodenkennlinie der Solarzellen bestimmt wurde, werden auf der Rückseite der Solarzellen dünne Zinnstreifen abgeschieden, um einen verlötbaren Kontakt zu den Drähten und Ribbons herstellen zu können. Hierzu wurde das in Kapitel 1.2.1 beschriebene Abscheidungsverfahren verwendet. Die Zinnschicht ist 4 mm breit und 154 mm lang. Für die 3-Busbar-Solarzellen wurden drei Zinnstreifen abgeschieden. Die Ribbons



**Abb. 5.1:** Schematische Darstellung der Vorderseitenpads auf dem Fingergrid einer Solarzelle mit runden Vorderseiten- und breiten Randpads. Durch die größere Auflagefläche der Pads wird die Haftung zwischen Draht und Vorderseitenmetallisierung erhöht. Rechts ist in Schwarz ein aufgelegter Draht abgebildet.

haben so vollflächigen Kontakt zur Rückseite. Für die Multi-Busbar-Solarzellen wurden fünf Zinnstreifen senkrecht zur Drahrichtung abgeschieden. Jeder Draht kontaktiert somit über fünf 4 mm lange Pads die Rückseite. Zur Verlotung der 3-Busbar-Solarzellen werden zinnbeschichtete Kupferribbons verwendet, die eine Breite von 1,5 mm und eine Höhe von 200  $\mu\text{m}$  aufweisen. An den Kanten der Solarzelle werden die Ribbons mit einem 5 mm breiten und 450  $\mu\text{m}$  hohen zinnbeschichteten Kupferband verlötet. An diesem Kupferband werden wiederum zwei 2,5 cm lange Bänder verlötet, die aus dem Modul herausführen. Das erste Band dient als Stromleiter, das zweite zur Messung der Spannung. Schematisch ist die Verschaltung einer Multi-Busbar-Solarzelle im Modul in Abbildung 5.2 dargestellt. Links ist die Rückseite der verschalteten Multi-Busbar-Solarzelle und rechts die Vorderseite sichtbar. Matt unterlegt ist das Modulglas dargestellt. In der Abbildung ist eine full-square Solarzelle abgebildet. Im Experiment werden semi-square Wafer zur Zellherstellung verwendet. Die verschalteten Solarzellen werden auf Vorder- und Rückseite mit einer EVA-Folie bedeckt. Anschließend wird auf die Vorderseite eine Glasplatte mit Antireflexionsbeschichtung aufgebracht (20 cm  $\times$  20 cm  $\times$  3 mm) und die Rückseite mit einer Polyvinylfluorid-Folie (Tedlar) bedeckt [176]. Das Modul wird in einem Laminator bei Temperaturen um 140-170  $^{\circ}\text{C}$  erhitzt. Die Kammer, in der sich das Modul befindet, wird evakuiert und gleichzeitig wird von außen Druck auf Modulglas und Rückseitenfolie ausgeübt [177]. Um den Einfluss des Drahtdurchmessers auf die Zelleistung zu untersuchen, werden Multi-Busbar-Module mit 250  $\mu\text{m}$  und 300  $\mu\text{m}$  dicken Drähten hergestellt.

Die Leistung der gefertigten Module wird beim JRC-ESTI (Joint Research Center - European Solar Test Installation) bestimmt. Die Module werden für die Charakterisierung mit einer Schattenmaske abgedeckt, die der Fläche und der Form der Solarzelle entsprechen. Hierdurch wird verhindert, dass Licht, welches nicht direkt auf die Solarzelle trifft, über Reflexion an der Rückseite und am Glassubstrat auf die Solarzelle gelangen kann und somit den generierten Strom zusätzlich erhöht.

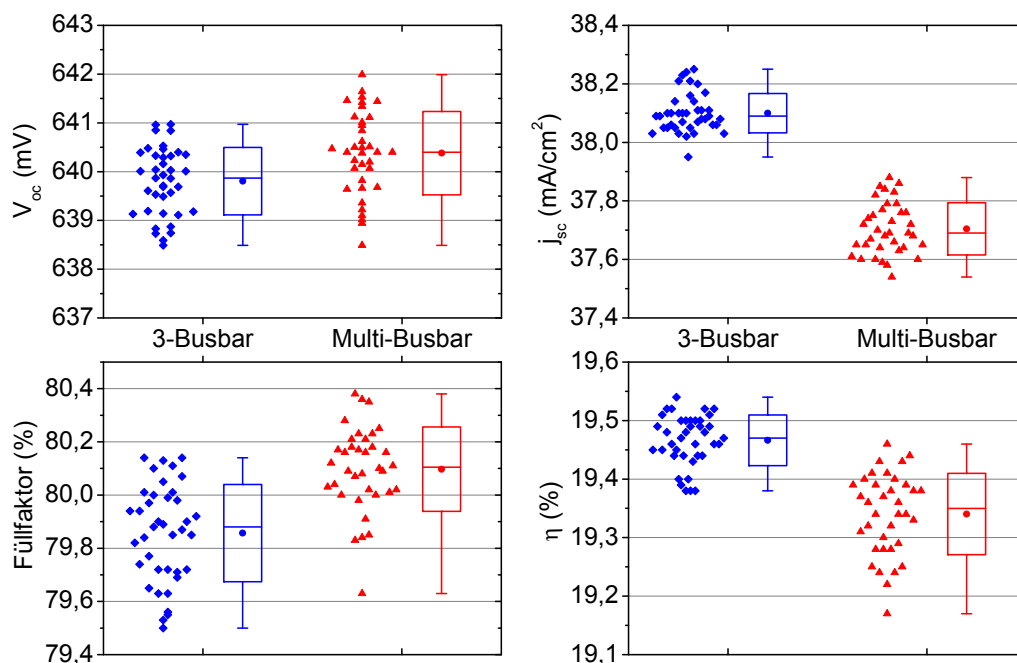


**Abb. 5.2:** Schematischer Aufbau eines Ein-Zell-Moduls. Hier ist eine full-square Multi-Busbar-Solarzelle dargestellt, für das Experiment werden Wafer mit Phase verwendet. Strom und Spannung werden jeweils an den zwei aus dem Modul reichenden Bändern auf Vorder- und Rückseite abgegriffen. Links: Rückseite mit fünf Zinnstreifen, die Kontaktfläche zwischen Zinnstreifen und Drähten wird verlötet. Rechts: Vorderseite der Multi-Busbar-Solarzelle. Die Drähte werden auf die Vorderseitenpads gelötet.

### 5.1.2 Analyse der siebgedruckten Solarzellen

Die Messergebnisse der Solarzellen sind in Abbildung 5.3 veranschaulicht. In Blau sind die 3-Busbar- und in Rot die Multi-Busbar-Solarzellen abgebildet. Die Diagramme bestehen jeweils aus den Messpunkten (links angeordnet) und einem Boxplot (rechts angeordnet). Messpunkte, die den gleichen Wert besitzen, sind nebeneinander angeordnet. Der Boxplot beschreibt jeweils den Maximal- und Minimalwert (Whiskers), die Standardabweichung (Kasten), den Mittelwert (Punkt in der Box) und den Median (Strich in der Box). Bei Betrachtung der offenen Klemmenspannung  $V_{oc}$  in Abbildung 5.3 oben links ist eine leicht höhere Spannung der Multi-Busbar-Solarzellen im Vergleich zur 3-Busbar-Gruppe zu erkennen. Die höhere Spannung wird durch den verwendeten Dual-Druck erzeugt. Da ausschließlich die Finger den Emitter kontaktieren, wird die Kontaktfläche zwischen Emitter und Metallisierung verringert. Unter den Vorderseitenpads wird kein hochdotierter Bereich zur Kontaktbildung benötigt. Die Bereiche unter den Vorderseitenpads können somit zusätzlich zurückgeätzt werden. Die Rekombination an der Oberfläche nimmt ab, und die offene Klemmenspannung wird erhöht. Der mittlere Spannungsgewinn liegt bei circa 0,6 mV. Die Verteilung der Messwerte ist im Vergleich zur 3-Busbar-Gruppe etwas größer.

Im oberen rechten Schaubild sind die Werte der Kurzschlussstromdichte  $j_{sc}$  beider Gruppen aufgetragen. Im Mittel weisen die 3-Busbar-Solarzellen eine um  $0,4 \text{ mA/cm}^2$  höhere Stromdichte im Vergleich zu den Multi-Busbar-Solarzellen auf. Die geringere Kurzschlussstromdichte kann direkt auf die höhere Abschattung der Multi-Busbar-Solarzelle zurückgeführt werden. Wie bereits erwähnt wurde, benötigt man zusätzlich



**Abb. 5.3:** I(U)-Parameter der 3-Busbar- (blau) und der Multi-Busbar-Gruppe (rot). Jeweils links sind die Messwerte und rechts der Boxplot mit Min-/Max-Wert (Whiskers), Median, Mittelwert (Punkt) und Standardabweichung (Kasten) dargestellt. Insgesamt erzielen die 3-Busbar-Solarzellen höhere Wirkungsgrade. Der niedrigere Wirkungsgrad der Multi-Busbar-Solarzellen wird durch eine höhere Abschattung, bedingt durch Vorderseitenpads, hervorgerufen.

Vorderseitenpads, um einen ausreichend hohe Haftung der Drähte zu gewährleisten. Die Abschattung der Multi-Busbar-Solarzelle ist im Vergleich zur 3-Busbar-Solarzelle um  $15,9\%_{\text{rel}}$  höher. In der Simulation sorgt solch eine erhöhte Abschattung von  $15,9\%_{\text{rel}}$  für einen Stromdichteabfall von  $0,35 \text{ mA/cm}^2$ .

Der gemittelte Füllfaktor (unten links) der Multi-Busbar-Solarzellen ist im Vergleich zu den 3-Busbar-Solarzellen größer. Mit  $80,1\%$  liegt er um  $0,25\%_{\text{abs}}$  höher. Hervorgerufen wird der hohe Füllfaktor durch die geringe effektive Fingerlänge der Multi-Busbar-Solarzellen (siehe Kapitel 1.2.4), die einen geringen Serienwiderstandsbeitrag des Fingergrids bewirkt. Da der Fingerabstand um  $0,2 \text{ mm}$  geringer ist als bei den 3-Busbar-Solarzellen, reduziert sich zusätzlich der Serienwiderstandsbeitrag des Emitters.

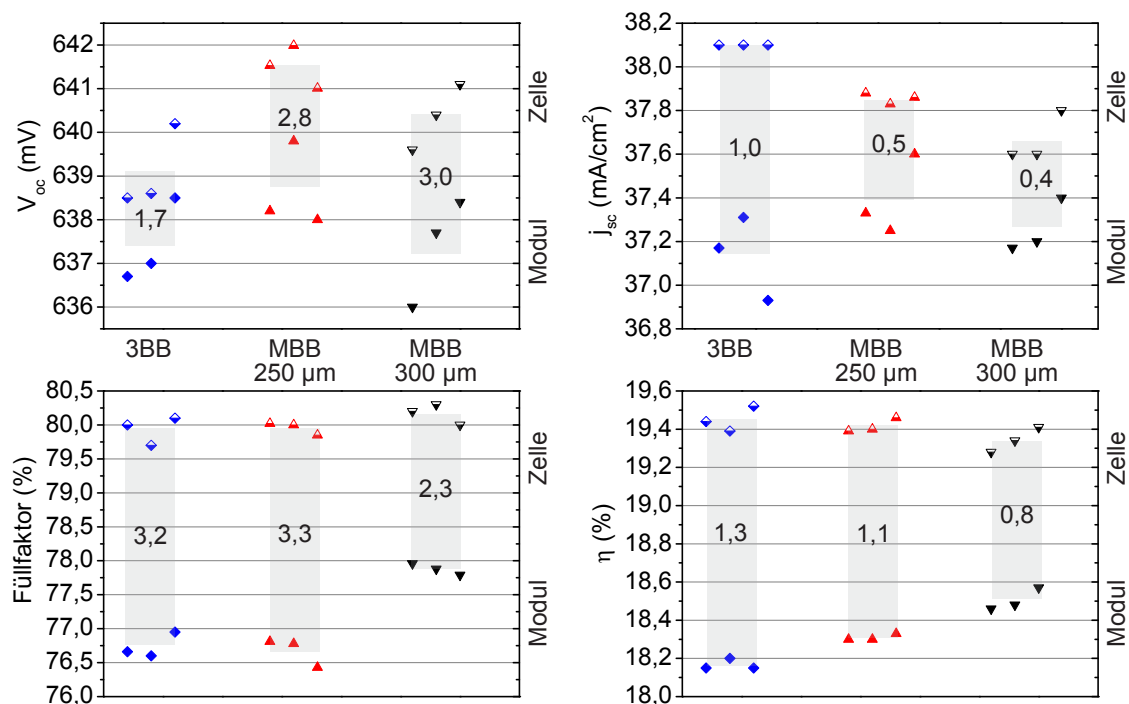
Ein Vergleich der erreichbaren Wirkungsgrade beider Gruppen zeigt, dass die 3-Busbar-Solarzellen insgesamt ein besseres Ergebnis mit einer geringeren Verteilung erzielen. Im Mittel liegt der Wirkungsgrad bei  $19,47\%$  mit einer niedrigen Standardabweichung. Bei den Multi-Busbar-Solarzellen ist die Verteilung verbreitert. Der mittlere Wirkungsgrad liegt bei  $19,34\%$  und ist damit um  $0,13\%_{\text{abs}}$  geringer als bei der 3-Busbar-Gruppe.

Die große Differenz in der Kurzschlussstromdichte beider Gruppen führt insgesamt zu höheren Wirkungsgraden der 3-Busbar-Solarzellen. Eine Reduzierung der Vorderseitenpadfläche kann hier jedoch Abhilfe schaffen und zu einer Erhöhung der Stromdichte der Multi-Busbar-Solarzellen führen. Optimal wären Vorderseitenpads, die direkt unter den Drähten liegen würden und so keine zusätzliche Abschattung erzeugen. Durch eine Reduzierung der Padfläche sollte jedoch die Haftung zwischen Draht und Pad nicht negativ beeinflusst werden.

### 5.1.3 Analyse der Ein-Zell-Module

Die Ergebnisse der Modulanalyse werden in Abbildung 5.4 vorgestellt. Jede der drei Gruppen besteht aus drei Solarzellen, aus denen Ein-Zell-Module gefertigt wurden. Die 3-Busbar-Solarzellen bilden die erste Gruppe. Gruppe 2 und 3 bestehen aus Multi-Busbar-Solarzellen, die mit  $250 \mu\text{m}$  beziehungsweise  $300 \mu\text{m}$  breiten Drähten verlötet wurden. Gruppe 1 ist in den Diagrammen in Blau, Gruppe 2 in Rot und Gruppe 3 in Schwarz dargestellt. In jeder Gruppe sind die Werte für die Solarzellen (obere drei Messwerte) und ihre dazugehörigen Modulwerte (untere drei Messwerte) abgebildet. Die grauen Balken zeigen schematisch die Differenz der gebildeten Mittelwerte an. Der Zell-Modul-Verlust ist bei den 3-Busbar-Solarzellen mit  $1,7 \text{ mV}$  am geringsten. Die Multi-Busbar-Gruppen zeigen Verluste von  $2,8 \text{ mV}$  und  $3,0 \text{ mV}$ . In der zweiten Gruppe liegt jedoch bei der mittleren Probe die Spannungsdifferenz zwischen Zelle und Modul bei  $2,2 \text{ mV}$ . Dies zeigt, dass die hohen Spannungsverluste wahrscheinlich prozessbedingter Natur sind. Deshalb wurde eine Analyse der Module durchgeführt.

Die Simulation des Stromdichteverlusts von  $1 \text{ mA/cm}^2$  im Modul führt nach dem Zweidiodenmodell zu einem Spannungsverlust von ca.  $0,7 \text{ mV}$ . Der Einfluss des erhöhten Serienwiderstands im Modul wird zu  $0,04 \text{ mV}$  berechnet. Es ergibt sich damit ein simulierter Spannungsverlust von  $0,74 \text{ mV}$ . Damit liegt es nahe, dass die hohen Spannungsdifferenzen zwischen Zelle und Modul durch Unregelmäßigkeiten beim Verschaltungs- oder Laminationsprozess hervorgerufen werden. Im weiteren Verlauf der Untersuchung wurden deshalb EL-Aufnahmen der Module auf mögliche Unregel-

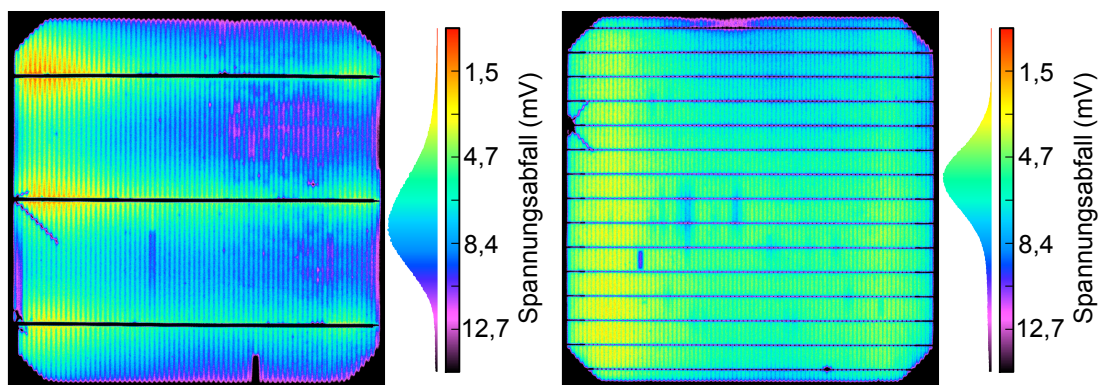


**Abb. 5.4:** Darstellung der I(U)-Parameter von Solarzellen und Ein-Zell-Modulen (3BB = 3-Busbar, MBB = Multi-Busbar mit Drahtdurchmesser). Die Zellwerte stehen in jeder Gruppe oben, unter ihnen befinden sich die Modulwerte. Der graue Balken gibt die Differenz der gebildeten Mittelwerte mit Angabe des Absolutwerts im Balken an. Trotz geringerer Zellwirkungsgrade erzielen die Multi-Busbar-Module höhere Wirkungsgrade.

mäßigkeiten hin untersucht. Es ist bekannt, dass insbesondere Risse in der Solarzelle die Betriebsspannung der Solarzelle negativ beeinflussen können [178].

In Abbildung 5.5 ist jeweils ein 3-Busbar- (links) und ein Multi-Busbar-Modul (rechts) mit Rissbildung dargestellt. Der Strom wird von der linken Seite abgegriffen. Untersucht wurden das erste Modul aus der ersten Gruppe und das erste Modul aus der dritten Gruppe. An der linken Kante des 3-Busbar-Moduls verläuft mittig ein langer Riss. Ein weiterer Riss befindet sich am unteren Ribbon links. Deutlich ist der Spannungsabfall zwischen den Busbars sichtbar. Der Spannungsverlauf zwischen dem oberen und dem mittleren Busbar auf der rechten Seite zeigt, dass der Emitter nicht homogen zurückgeätzt wurde. Einige Fingerunterbrechungen sind zusätzlich sichtbar. Die Spannungsverteilung des Multi-Busbar-Moduls ist, bedingt durch den geringeren Spannungsabfall an den Fingern, schmaler. Einige Bereiche auf der Solarzelle weisen Kontaktprobleme auf. Besonders der oberste Draht scheint im mittleren Bereich die Solarzelle unzureichend zu kontaktieren. An der linken Kante sind zwei Risse sichtbar. Eine Kombination aus unzureichender Kontaktierung der Drähte und Rissbildung ist demnach für die hohen Spannungsverluste der Multi-Busbar-Module verantwortlich.

Die Kurzschlussstromdichte, die in Abbildung 5.4 oben rechts dargestellt ist, zeigt die Vorteile der Verschaltung mit runden Drähten. Der Zell-Modul-Verlust ist bei der 3-Busbar-Gruppe höher. Dies hängt damit zusammen, dass 1,5 mm breite Ribbons auf die 1,3 mm breiten Busbars gelötet wurden und die Ribbons eine eher flache Form aufweisen. Mit dem Simulationsprogramm wird hierdurch ein Stromdichteverlust von



**Abb. 5.5:** EL- Aufnahmen eines 3-Busbar- (links) und eines Multi-Busbar-Ein-Zell-Moduls (rechts) bei  $30 \text{ mA/cm}^2$ . Deutliche Rissbildung ist an beiden Modulen sichtbar. An der Kontaktstelle zwischen Draht/Ribbon und Kante der Solarzelle bilden sich Risse aus. Zusätzlich sind in der Mitte des Multi-Busbar-Moduls einige nicht-kontaktierte Bereiche erkennbar.

$0,16 \text{ mA/cm}^2$  berechnet. Zusätzlich sind die Schwankungen der Modulströme im Vergleich zu den Solarzellenströmen stark ausgeprägt. Die geringste Zell-Modul-Differenz beträgt  $0,8 \text{ mA/cm}^2$ , die höchste  $1,2 \text{ mA/cm}^2$ . Ein Vergleich mit den Multi-Busbar-Gruppen zeigt, dass der Stromdichteverlust fast doppelt so hoch ausfällt.

Ein Vergleich der Stromdichtedifferenzen der Multi-Busbar-Gruppen untereinander zeigt, dass der Verlust durch die breiten Drähte im Mittel sogar geringer ausfällt. Dies ist unerwartet, da ein breiterer Draht eine höhere Abschattung bewirkt. Besonders auffällig ist der geringe Verlust der letzten Zelle aus der zweiten Gruppe mit einem Wert von  $0,25 \text{ mA/cm}^2$ . Bei nicht exakter Platzierung der Drähte über den Pads kann es zu einer erhöhten Abschattung kommen. Ob dies bei den untersuchten Multi-Busbar-Modulen der Fall ist, kann nicht ausgeschlossen werden. Eine optische Prüfung der Module lieferte hier keine eindeutigen Ergebnisse.

Ein Vergleich des Füllfaktors auf Zell- und Modulebene, der in Abbildung 5.4 unten links dargestellt ist, zeigt, dass sowohl die 3-Busbar- als auch die Multi-Busbar-Gruppe mit  $250 \mu\text{m}$  breiten Drähten hohe Verluste aufweisen. Bei der 3-Busbar-Gruppe beträgt der gemittelte Verlust  $3,2 \%_{\text{abs}}$ , bei Gruppe 2 sind es sogar  $3,3 \%_{\text{abs}}$  im Mittel. Die Multi-Busbar-Gruppe mit den  $300 \mu\text{m}$  breiten Drähten verzeichnet hingegen einen mittleren Verlust von  $2,3 \%_{\text{abs}}$ .

Dies spiegelt sich auch im Wirkungsgrad wieder. Dargestellt wird dieser für die drei Gruppen im Schaubild unten rechts. Für die 3-Busbar-Gruppe beträgt der Zell-Modul-Verlust  $1,3 \%_{\text{abs}}$ . Der Verlust der zweiten Gruppe ist mit  $1,1 \%_{\text{abs}}$  im Mittel etwas geringer als bei der 3-Busbar-Gruppe. Den geringsten Verlust können die Module mit den  $300 \mu\text{m}$  breiten Drähten mit  $0,8 \%_{\text{abs}}$  verzeichnen. Es zeigt sich, dass trotz der geringeren Zelleistung die Modulleistung für Gruppe 2 und 3 höher ausfällt als bei der 3-Busbar-Gruppe. Im Mittel liegt die Wirkungsgraddifferenz zwischen Gruppe 1 und 3 bei  $0,3 \%_{\text{abs}}$ . Ein Vergleich der Module mit den höchsten Wirkungsgraden der Gruppe eins und drei zeigt sogar eine Differenz von  $0,4 \%_{\text{abs}}$ . Zurückzuführen ist dies auf die bessere Lichtausbeute im Multi-Busbar-Modul, hervorgerufen durch die geringe effektive Drahtbreite (siehe Kapitel 1.2.3). Zusätzlich führt die Optimierung der Verschaltung mit breiten runden Drähten zu geringen Füllfaktorverlusten.

Jeweils ein Wafer wurde vor und nach Aufbringen der Vorderseitenmetallisierung

und nach dem Trockenschritt gewogen, um die benötigte Pastenmenge zu bestimmen. Für die 3-Busbar-Solarzelle wurde ein Pastenauftrag von ca. 140 mg ermittelt. Der Pastenauftrag der Multi-Busbar-Solarzelle wurde mit 68 mg bestimmt. Trotz einer Einsparung von 72 mg Silberpaste zeigt das beste siebgedruckte Multi-Busbar-Modul gegenüber dem besten 3-Busbar-Modul einen Wirkungsgradgewinn von 0,4 %<sub>abs</sub>. Teile diese Experiments wurden veröffentlicht [179].

#### 5.1.4 Vergleich des Experiments mit der Simulation.

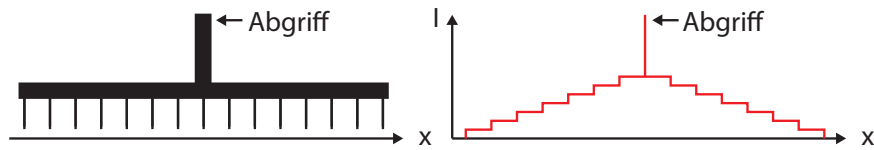
In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse des Experiments mit der Simulation verglichen. Die Simulation aus Kapitel 2 wurde an eine Referenz-Solarzelle angepasst. Hierdurch wurden die Werte für  $j_{01}$ ,  $j_{02}$ ,  $j_{ph-Abs}$  und  $R_p$  bestimmt. Für die folgende Analyse wird ähnlich verfahren. Die Geometrie des Grids der hergestellten Multi-Busbar-Solarzellen wird vermessen und für die Simulation verwendet, um den Serienwiderstand anzugeben. Die Fragestellung lautet, wie exakt mithilfe des Zweiodenmodells der Serienwiderstand einer Solarzelle im Modul bestimmt werden kann. Folgende Daten wurden für die Simulation verwendet:

- Fingerabstand: 1,8 mm, Fingerbreite: 50  $\mu\text{m}$ .
- Schichtwiderstand des selektiven Emitters: 55/115  $\Omega/\text{sq}$  .
- spezifischer Kontaktwiderstand: 1,5  $\text{m}\Omega\text{cm}^2$ .
- Die restlichen Parameter wurden aus Kapitel 1.4 übernommen.

Die Parameter wurden im Programm so angepasst, dass sie mit der I(U)-Messung der Solarzelle übereinstimmten. Der Messaufbau für die Multibusbar-Solarzellen besitzt 15 jeweils 250  $\mu\text{m}$  breite Drähte. Die Zelle hat vollflächigen Kontakt zur Rückseite. In Tabelle 5.1 sind die Messwerte und die Werte der Simulation aufgeführt. Die Simulation weist minimale Abweichungen zu den gemessenen Werten auf. Im nächsten Schritt wird die verschaltete Solarzelle simuliert. Der generierte Strom der Solarzelle im Modul wird angepasst, da das Programm die Absorption des Modulglases nicht berücksichtigt. Die Breite der Drähte wird wie im Modul auf 300  $\mu\text{m}$  erhöht. Zusätzlich werden die breiten Kupferbänder, die den Strom aus dem Modul leiten, in die Simulation integriert. Hierbei wird berücksichtigt, dass der Strom jeweils an der Schnittstelle zwischen Draht und Kupferband zunimmt, wie in Abbildung 5.6 schematisch dargelegt. An jedem Schnittpunkt zwischen Draht und Kupferband steigt der Strom an. Am Abgriff (in der Mitte) ist der Strom maximal.

**Tabelle 5.1:** Ermittelte I(U)-Parameter einer Multi-Busbar-Solarzelle mit den angepassten Werten der Simulation.

Komponente	$j_{sc}$ in ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )	$V_{oc}$ in (mV)	FF in (%)	$\eta$ in (%)
Messung	37,8	641,1	80,0	19,41
Simulation	37,8	641,1	80,0	19,39



**Abb. 5.6:** Links: Schematische Verschaltung zwischen Drähten und Kupferband einer Multi-Busbar-Solarzelle im Modul. Rechts: Stromfluss über das Kupferband. Der Strom addiert sich über die Drähte auf. Mittig fließt der Strom über ein weiteres Kupferband und wird am Ende abgegriffen.

Das Ergebnis der Simulation wurde mit den gemessenen Moduldaten verglichen und ist in Tabelle 5.2 abgebildet. Der Serienwiderstand des gemessenen Moduls wurde über den IEC-Standard (60891 Ed.2 (2009)) am ESTI bestimmt [180]. Hierbei handelt es sich um das sogenannte MLM-Verfahren (engl. Multi Light Methode), bei dem der Serienwiderstand über unterschiedliche Beleuchtungsintensitäten bestimmt wird [181].

Es wurden zwei Simulationen zum Vergleich des gemessenen Moduls durchgeführt. Bei der ersten Simulation wird die simulierte Stromdichte auf die gemessene Stromdichte angepasst, um das Reflexions- und Absorptionsverhalten von Glas- und EVA-Schicht abzubilden. In der zweiten Simulation wird zusätzlich die offene Klemmenspannung abgesenkt, da die Simulation einen Spannungsverlust von 0,4 mV berechnet. Dies wäre der Spannungsverlust bei einer perfekt verschalteten Solarzelle ohne Kontaktwiderstand zwischen Draht und Solarzelle. Wie bereits erwähnt sinkt die offene Klemmenspannung jedoch prozessbedingt stärker ab. Durch die Anpassung von  $j_{sc}$  und  $V_{oc}$  kann die Berechnung des Füllfaktors und damit die Genauigkeit der Serienwiderstandsberechnung der Simulation verifiziert werden. Der gemessene Spannungsverlust ist höher als der simulierte. Dies hängt wahrscheinlich damit zusammen, dass die Solarzellen durch den Löt- oder Laminationsprozess beschädigt wurden. Die Spannungsdifferenz zwischen der Simulation und der Messung beträgt 2,3 mV. Die Abweichung im Füllfaktor beträgt 0,36 %<sub>abs</sub>. Der flächengewichtete Serienwiderstand der Simulation liegt über dem gemessenen Ergebnis. Die Differenz beträgt  $0,026 \Omega\text{cm}^2$ .

Die Simulation überschätzt höchstwahrscheinlich den Serienwiderstandsbeitrag der verschalteten Rückseite. Dies scheint plausibel, da die Drähte nicht ausschließlich über die Zinnpads Kontakt zur Rückseite bilden. Ein vollflächiger Kontakt zwischen Draht und Rückseite würde den Serienwiderstandsbeitrag um ca.  $0,01 \Omega\text{cm}^2$  senken. Der Wirkungsgrad zwischen der ersten Simulation und Messung zeigt geringe Unterschiede. Jedoch ist zu beachten, dass die Spannung zu hoch und der Füllfaktor

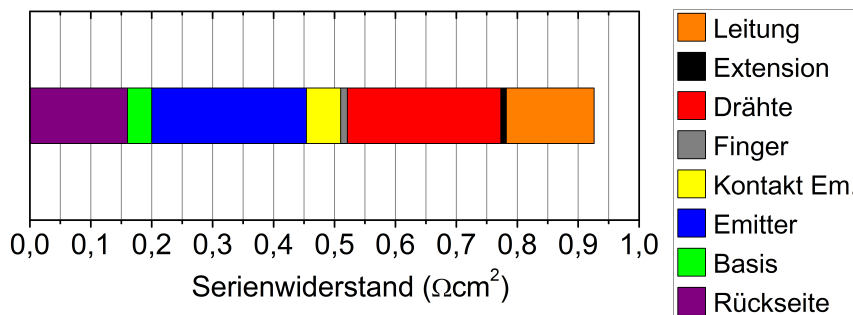
**Tabelle 5.2:** Ermittelte I(U)-Parameter der Solarzelle und angepasste Werte der Simulation. Simulation 1: Die Kurzschlussstromdichte wird angepasst. Simulation 2: Zusätzlich wird die offene Klemmenspannung angepasst.

Komponente	$j_{sc}$ in ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )	$V_{oc}$ in (mV)	FF in (%)	$\eta$ in (%)	$r_{ser}$ in ( $\Omega\text{cm}^2$ )
Messung	37,4	638,4	77,79	18,57	0,897
Simulation 1	37,4	640,7	77,43	18,56	0,923
Simulation 2	37,4	638,4	77,43	18,49	0,923

zu gering simuliert wurden. In Abbildung 5.7 sind die einzelnen Komponenten des flächengewichteten Serienwiderstands aufgelistet. Die zusätzlich an die verschaltete Solarzelle angebrachten Leitungen auf Vorder- und Rückseite (orange) erhöhen den Serienwiderstand im Modul deutlich. Besonders der Emitter und die Drähte tragen zum Gesamtserienwiderstand bei. Eine mögliche Erklärung für die Abweichung zwischen Simulation und Experiment könnte durch leicht abweichende Emitterschichtwiderstände gegeben werden. Eine Verringerung um  $5 \Omega/\text{sq}$  verringert den Serienwiderstandsbeitrag bei gegebenem Fingerabstand um  $0,014 \Omega\text{cm}^2$ . Durch das Rückätzverfahren können solche geringe Schwankungen leicht auftreten, wie Abbildung 5.5 zeigt. Bei der exakten Angabe des Emitterschichtwiderstands wird deshalb die größte Unsicherheit vermutet.

Die offene Klemmenspannung wurde, um den Effekt der erhöhten Spannung zu berücksichtigen, in der zweiten Simulation angepasst. Der Wirkungsgrad fällt minimal ab, die Wirkungsgraddifferenz zwischen Messung und Simulation 2 erhöht sich damit auf  $0,08\%_{\text{abs}}$ . Die Genauigkeit der Simulation ist vor allem der Anpassung von  $j_{\text{sc}}$  und  $V_{\text{oc}}$  geschuldet. Bedingt durch Messunsicherheiten kann von einer Variation bei der Bestimmung der Längen, Breiten und Höhen der Strukturen von  $\pm 5 \mu\text{m}$  ausgegangen werden. Eine Veränderung der gemessenen Parameter um  $5 \mu\text{m}$  erhöht den Serienwiderstand auf  $0,938 \Omega\text{cm}^2$ . Der Füllfaktor sinkt auf  $77,35\%$ . Der Wirkungsgrad liegt bei  $18,46\%$ .

Die Bestimmung des Serienwiderstands mit den verwendeten Parametern zeigt damit geringe Abweichungen. Das Modell benötigt allerdings eine Referenz-Solarzelle, um Absolutwerte zu ermitteln. Die simulierten Wirkungsgrade zeigen eine Abweichung von  $0,1\%_{\text{abs}}$  zu den experimentell ermittelten Werten.



**Abb. 5.7:** Simulierte flächengewichtete Serienwiderstandsbeiträge eines Ein-Zell-Multi-Busbar-Moduls.

## 5.2 Untersuchung von Vier-Zell-Modulen

Module, die aus mehreren Solarzellen bestehen, zeigen im Vergleich zu Ein-Zell-Modulen höhere Wirkungsgradverluste. Da aus prozesstechnischen Gründen die Solarzellen in einem Modul nicht direkt aneinander gelegt werden können, entstehen Zwischenräume. Diese Zwischenräume können nicht gänzlich vernachlässigt werden, da dort auftreffendes Licht über Reflexion auf eine benachbarte Solarzelle gelangen kann. Zusätzlich erhöhen sie die Modulfläche. Durch die Verschaltung der Solarzellen-Strings mit weiteren Kupferbändern entstehen zusätzliche Leistungsverluste. Diese

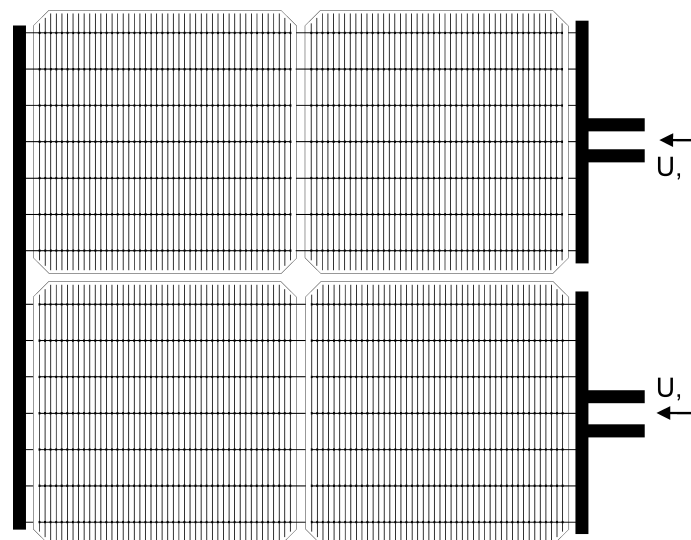
Effekte sollen im folgenden Experiment für 3-Busbar- und Multi-Busbar-Module untersucht werden.

### 5.2.1 Beschreibung des Experiments

Für das Experiment werden 3-Busbar- und Multi-Busbar-Solarzellen hergestellt. Beide untersuchte Gruppen bestehen aus Solarzellen mit selektivem Emitter und vollflächigem Aluminium BSF auf der Rückseite. Für die Vorderseitenmetallisierung wird eine silberhaltige Paste mithilfe des Siebdruckverfahrens aufgebracht. Je nach Gruppe besteht das Grid entweder aus drei 1,2 mm breiten Busbars mit senkrecht dazu angeordneten Fingern mit einem Abstand von 2 mm oder aus einem Fingergrid mit einem Fingerabstand von 1,8 mm.

Bei der Multi-Busbar-Gruppe wird jeder Finger mit 15 jeweils  $500\ \mu\text{m} \times 700\ \mu\text{m}$  breite Vorderseitenpads bedruckt. Die Busbars und Vorderseitenpads werden in einem zweiten Druckschritt aufgebracht und kontaktieren den Emitter nicht. Auf die Rückseiten der Solarzellen werden jeweils drei Zinnstreifen abgeschieden, um Lötkontakte für den Verschaltungsprozess zu bilden. Nachdem die Diodenkennlinie der Solarzellen bestimmt wurde, werden jeweils vier Solarzellen einer Gruppe in Reihe geschaltet. Jeder String besteht aus zwei Solarzellen, die mit Ribbons oder Drähten verlötet werden. Über ein zusätzliches Kupferband wird der Strom vom oberen String zum unteren String geführt. Strom und Spannung werden an den Kupferbändern am rechten Rand abgegriffen.

Schematisch ist der Aufbau eines Vier-Zell-Multi-Busbar-Moduls in Abbildung 5.8 illustriert. Aus den verschalteten Solarzellen werden anschließend Module gefertigt (siehe Kapitel 5.1.1). Es werden jeweils zwei Vier-Zell-Module pro Gruppe hergestellt. Die Verschaltung entspricht der aus dem ersten Experiment. Hierfür werden für die 3-Busbar-Solarzellen  $1,5\ \text{mm} \times 200\ \mu\text{m}$  breite Ribbons und für die Multi-Busbar-Solarzellen  $300\ \mu\text{m}$  breite Drähte verwendet. Die verwendeten Kupferbänder sind



**Abb. 5.8:** Schematischer Aufbau eines Vier-Zell-Multi-Busbar-Moduls ohne Modulglas. Jeweils zwei Solarzellen bilden einen String. Über ein breites Kupferband wird der Strom von einem String auf den benachbarten geführt.

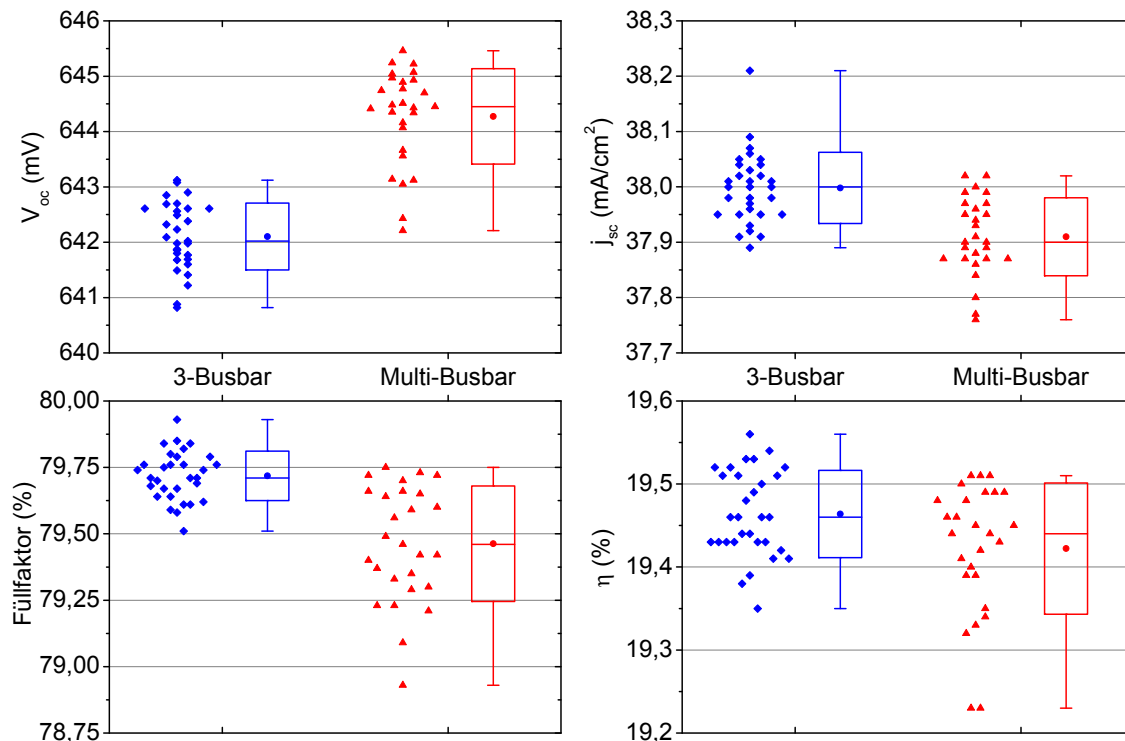
5 mm breit, 450  $\mu\text{m}$  hoch und besitzen eine dünne Zinnschicht.

Die Diodenkennlinien der Module werden am JRC-ESTI bestimmt. Zur genauen Bestimmung der Apertur werden quadratische Schattenmasken verwendet, um eine quadratische Fläche von  $(31,8\text{ cm})^2$  zu beleuchten. Der Abstand zwischen den Solarzellen beträgt 3 mm und 1,5 mm an den Außenrändern zur Schattenmaske. Die beleuchtete Fläche beträgt  $1011,24\text{ cm}^2$ , die Zellfläche  $956,48\text{ cm}^2$ .

### 5.2.2 Analyse der siebgedruckten Solarzellen

Für beide Gruppen werden die Diodenkennlinien der Solarzellen mithilfe eines Flashers der Firma Halm ermittelt. In Abbildung 5.9 werden die ermittelten Parameter vorgestellt. Die ermittelte offene Klemmenspannung ist für die 3-Busbar-Gruppe geringer, da die Vorderseitenmetallisierung den Emitter vollständig kontaktiert. Bei den Multi-Busbar-Solarzellen kontaktieren ausschließlich die Finger den Emitter. Hierdurch kann im Mittel eine offene Klemmenspannung von 644,4 mV erreicht werden. Die 3-Busbar-Solarzellen erzielen eine um 2,3 mV geringere Spannung. Im Mittel liegt diese bei 642,1 mV. Ein Vergleich der mittleren offenen Klemmenspannung mit der aus dem ersten Experiment (siehe Abbildung 5.3) zeigt eine Spannungsdifferenz von ca. 2,2 mV für die 3-Busbar-Solarzellen. Da die Spannungsdifferenz bei den Multi-Busbar-Solarzellen ähnlich ausfällt, wird vermutet, dass diese Emitter hier bedeutend stärker zurückgeätzt wurden.

Die Kurzschlussstromdichten sind im Diagramm oben rechts abgebildet. Die Ver-



**Abb. 5.9:** I(U)-Parameter der hergestellten 3-Busbar- und Multi-Busbar-Solarzellen mit Dualdruck-Vorderseitenmetallisierung. Beide Gruppen erreichen hohe Wirkungsgrade, jedoch zeigen die Multi-Busbar-Solarzellen eine hohe Variation im Füllfaktor.

teilung der einzelnen Messwerte ist bei beiden Gruppen gering, jedoch liegt der Absolutwert bei den 3-Busbar-Solarzellen mit  $38,0 \text{ mAcm}^2$  um  $0,1 \text{ mAcm}^2$  höher als bei den Multi-Busbar-Solarzellen.

Der gemittelte Füllfaktor der 3-Busbar-Gruppe, der im Schaubild unten links dargestellt ist, liegt  $0,25 \%_{\text{abs}}$  über dem Mittelwert der Multi-Busbar-Gruppe. Es ist unklar, ob der geringere Füllfaktor mit der erhöhten offenen Klemmenspannung korreliert. Da dieselbe Paste verwendet wurde und beide Gruppen bei gleicher Temperatur ge feuert wurden, ist es als unwahrscheinlich anzusehen, dass die Füllfaktordifferenz durch unterschiedliche Kontaktwiderstände zum Emitter hervorgerufen wird. Wäre der Emitter der Multi-Busbar-Gruppe jedoch stärker zurückgeätzt worden als der Emitter der 3-Busbar-Gruppe, könnte dies die Abweichung im Füllfaktor erklären. Im ersten Experiment wurde bereits gezeigt, dass mit beiden Zelldesigns Füllfaktoren über 80 % erreicht werden können.

Beide Gruppen erzielten Wirkungsgrade über 19,5 %. Den maximalen Wirkungsgrad erreicht eine 3-Busbar-Solarzelle mit 19,56 %. Der Silberverbrauch für die Vorderseitenmetallisierung wird mit 150 mg für die 3-Busbar- und mit 70 mg für die Multi-Busbar-Solarzelle bestimmt.

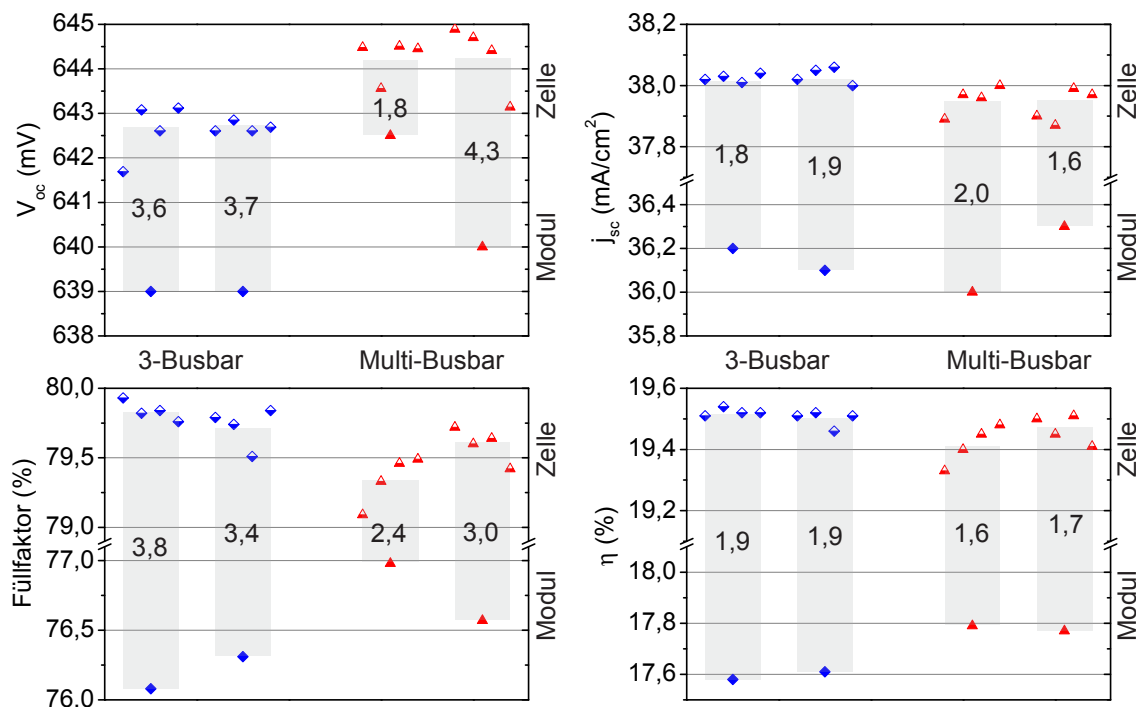
Auch hier wird wieder deutlich, dass der Metallverbrauch für die Vorderseitenmetallisierung einer Multi-Busbar-Solarzelle deutlich geringer ausfällt als der einer 3-Busbar-Solarzelle. Im Vergleich zum ersten Experiment ist aufgrund der größeren Vorderseitenpadfläche der Silberverbrauch leicht erhöht.

### 5.2.3 Analyse der Vier-Zell-Module

Jeweils acht Solarzellen werden pro Gruppe ausgewählt und zu Vier-Zell-Modul verschaltet. Die Ergebnisse auf Zell- und Modulebene werden in Schaubild 5.10 dargestellt. Ähnlich zum ersten Experiment wird die Differenz zwischen Zell- und Modulwert mit einem grauen Balken gekennzeichnet. Der angegebene Wert im Balken ergibt sich aus der Differenz des Mittelwerts der Solarzellen zum Modulwert. Für die offene Klemmenspannung der Module wird der Wert durch die Anzahl der Solarzellen im Modul geteilt, um einen direkten Vergleich vornehmen zu können. Die gemessene offene Klemmenspannung im Modul ist deshalb viermal höher als im Schaubild oben links angegeben.

Wie bei den Ein-Zell-Modulen zeigen drei der vier Module einen starken Spannungsverlust. Vermutlich kommt es durch Unregelmäßigkeiten beim Verschalten oder Laminieren zu diesen Problemen. Nur das erste Multi-Busbar-Modul zeigt eine geringe Abweichung von 1,8 mV pro Solarzelle. Ein Spannungsverlust durch einen Stromdichteabfall im Modul wird ausgeschlossen.

Die Stromdichte der vier Module liegt, bei einer Apertur von  $252,81 \text{ cm}^2$  pro Solarzelle, zwischen  $36,0\text{-}36,3 \text{ mA/cm}^2$ . Die Stromdichte berechnet auf die Zellfläche ( $239,12 \text{ cm}^2$ ) liegt jedoch bei  $38,1\text{-}38,4 \text{ mA/cm}^2$ . Da die Stromdichte im Modul höher ausfällt als auf Zellebene ist kein Spannungsverlust zu erwarten. Ein Spannungsverlust kann deshalb nur durch einen erhöhten Serienwiderstand oder einen fehlerhaften Modulherstellungsprozess entstehen. Allerdings wurde bereits gezeigt, dass der durch den Serienwiderstand hervorgerufene Spannungsverlust für Ein-Zell-Module sehr gering ist. Bei einem Vier-Zell-Modul können die Abweichungen in der Spannung ebenfalls nicht mit dem erhöhten Serienwiderstand durch die Verschaltung erklärt



**Abb. 5.10:** I(U)-Parameter der gemessenen Solarzellen und Module. Die offene Klemmenspannung der Module wurde zum besseren Vergleich durch die Anzahl der Zellen im Modul geteilt. Aus Anschauungsgründen wurden die y-Achsen teilweise unterbrochen.

werden. Es liegt deshalb nahe, dass die hohen Spannungsverluste prozesstechnisch bedingt sind. Wie bereits angesprochen können Risse oder ein hoher Kontaktwiderstand zwischen der Solarzelle und dem Verbindungsleiter die Spannung stark beeinflussen.

Die Verluste in der Kurzschlussstromdichte sind im Diagramm oben rechts aufgeführt. Bei einer Serienschaltung gibt die geringste Stromdichte der vier Solarzellen die maximale Kurzschlussstromdichte vor. Die Stromdichte ist aufgrund der Apertur geringer als bei einem Ein-Zell-Modul. Für die 3-Busbar-Module bedeutet dies eine Stromdichtereduktion von  $1,9 \text{ mA/cm}^2$  im Mittel. Im Vergleich zu den Ein-Zell-Modulen fällt hier die Stromdichte im Mittel um weitere  $0,9 \text{ mA/cm}^2$ . Die Multi-Busbar-Module zeigen einen mittleren Verlust von  $1,8 \text{ mA/cm}^2$ , jedoch ist hier die Differenz zwischen den zwei Modulwerten mit  $0,4 \text{ mA/cm}^2$  hoch. Im Vergleich zu den Ein-Zell-Modulen aus Kapitel 5.1.3 ist ein Stromdichteverlust von  $1,2 \text{ mA/cm}^2$  sichtbar. Da es sich hierbei um Solarzellen aus zwei unterschiedlichen Experimenten handelt, ist ein direkter Vergleich allerdings nicht uneingeschränkt möglich.

Die Füllfaktorverluste der vier Module sind sehr unterschiedlich. Besonders gering ist der Füllfaktorverlust des ersten Multi-Busbar-Moduls. Mit  $2,4\%_{\text{abs}}$  liegt er deutlich unter den Verlusten des zweiten Moduls mit  $3,0\%_{\text{abs}}$ . Durch die zusätzliche Verschaltung des Moduls mit einem breiten Kupferband wird der Gesamtserienwiderstand im Vergleich zu einem Ein-Zell-Modul weiter erhöht. Hierdurch wird der Füllfaktor weiter reduziert.

Die Wirkungsgrade der Multi-Busbar-Module sind trotz geringerer Zelleistungen mit  $17,8\%$  um  $0,2\%_{\text{abs}}$  höher als die der 3-Busbar-Module mit  $17,6\%$ .

Die ermittelten Werte für die Stromdichte und den Wirkungsgrad auf Zell- und

Modulebene sind in Tabelle 5.3 aufgelistet. Die Berechnung der Stromdichte auf die Zellfläche zeigt, dass die Stromdichte bei allen vier Gruppen über dem Zellniveau liegt. Das Licht aus den Randbereichen gelangt über Reflexion an der weißen Rückseitenfolie und dem Modulglas auf die aktive Zellfläche. Die Umrechnung des Modulwirkungsgrads auf die Zellfläche ergibt eine Steigerung von 1,0%<sub>abs</sub> für alle Module.

**Tabelle 5.3:** Kurzschlussstromdichte und Wirkungsgrad auf Zell- und Modulebene unter Berücksichtigung der Apertur und der Zellfläche im Modul. 3-Busbar = 3BB, Multi-Busbar = MBB.

$j_{sc}$ in (mA/cm <sup>2</sup> )	3BB 1	3BB 2	MBB 1	MBB 2
Solarzelle	38,0	38,0	37,9	37,9
Modul <sub>Apertur</sub>	36,2	36,1	36,0	36,3
Modul <sub>Zellfläche</sub>	38,4	38,3	38,2	38,5
$\eta_{Apertur}$ in (%)	17,6	17,6	17,8	17,8
$\eta_{Zellfläche}$ in (%)	18,6	18,6	18,8	18,8

Zuletzt soll ein Vergleich der Zell- und Modulleistungen Aufschlüsse über die Unterschiede zwischen 3-Busbar- und Multi-Busbar-Modulen aufzeigen. Zusätzlich wird die benötigte Silbermenge zur Vorderseitenmetallisierung der Module berechnet. Die Werte sind in Tabelle 5.4 dargestellt. Ein Vergleich zwischen den Ein-Zell-Modulen aus dem ersten Experiment und den Vier-Zell-Modulen erscheint aufgrund der Wirkungsgraddifferenzen auf Zellebene als nicht sinnvoll. Die Leistungsverluste fallen mit 3,2 % für die Multi-Busbar- und 4,7 % für die 3-Busbar-Solarzellen aufgrund des zusätzlich generierten Stroms der Umrandung gering aus. Der Gesamtverlust ist wie im ersten Experiment für die Multi-Busbar-Gruppe geringer. Der Pastenverbrauch wurde im Vergleich zur 3-Busbar-Gruppe halbiert. Für ein Solarmodul, das eine möglichst hohe Leistung pro Fläche erzielen sollte, sind die Randbereiche nicht von Vorteil und sollten deshalb minimiert werden.

**Tabelle 5.4:** Zell- und Modulleistung mit benötigter Ag-Pastenmenge für die Vorderseitenmetallisierung.

	$P_{Gesamt}$ in (W)	$P_{Solarzelle}$ in (W)	Ag-Pastenmenge in (mg)
3BB-Zelle		4,67	150
MBB-Zelle		4,65	70
3BB-Modul	17,8	4,45	600
MBB-Modul	18	4,5	280

### 5.3 Optimierung der plattierten Vorderseitenmetallisierung

Die Simulationen aus Kapitel 2 zeigen, dass durch das Multi-Busbar-Design sowohl der Wirkungsgrad der Solarzelle im Modul erhöht, als auch die benötigte Metallmenge

auf der Vorderseite reduziert werden kann.

Bereits im ersten Experiment wurde dies für eine Siebdruckmetallisierung gezeigt. Trotz zusätzlich benötigter Vorderseitenpads wurde eine Pastenreduktion über 50 % ermittelt. Im Folgenden wird experimentell ermittelt, welches Einsparpotential eine plattierte Vorderseitenmetallisierung bietet. Hierzu wird mithilfe eines Tintenstrahldruckers eine silberhaltige Saatschicht auf die  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schicht der Solarzelle aufgebracht und anschließend mittels lichtinduziertem nasschemischen Plattieren verstärkt (siehe Abschnitt 3.2.1). Es werden zusätzlich Multi-Busbar-Solarzellen ohne Vorderseitenpads hergestellt, um den Einfluss der Vorderseitenpads auf die Zelleistung und Abschattung zu untersuchen.

### 5.3.1 Beschreibung des Experiments

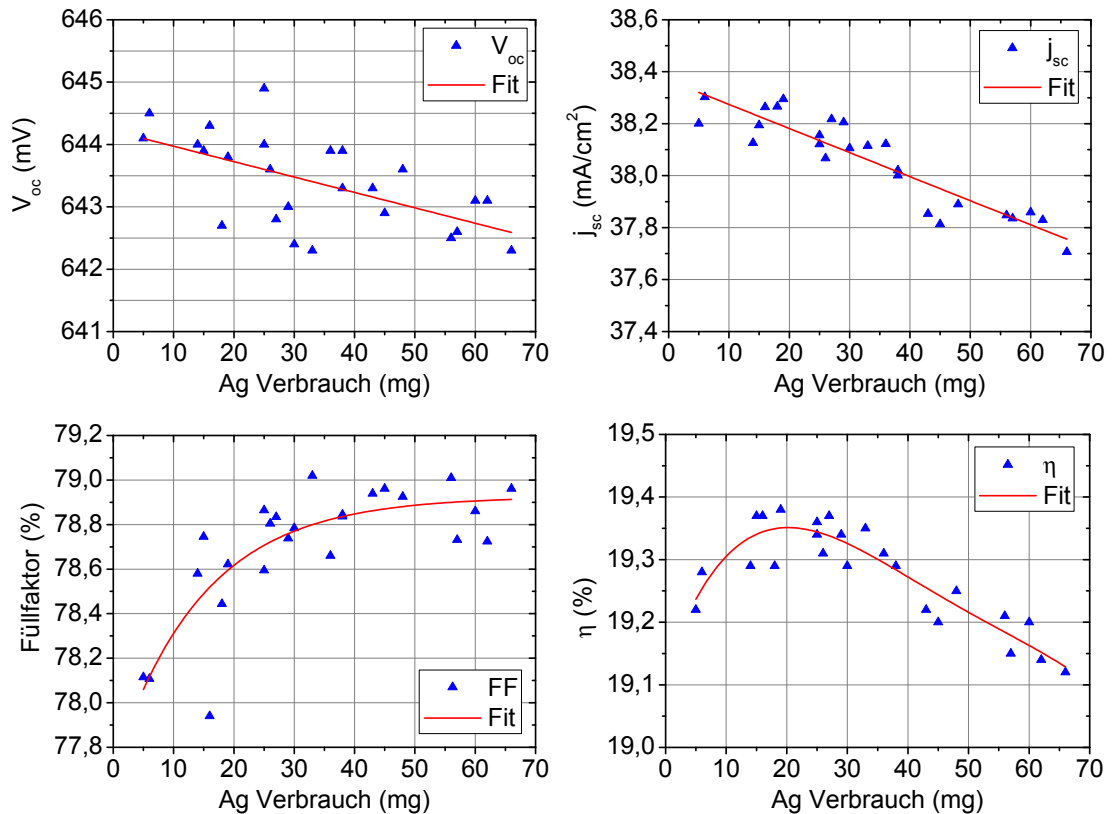
Die Zellherstellung entspricht dem Herstellungsprozess aus Abschnitt 5.1.1. Nur die siebgedruckte Vorderseitenmetallisierung wird durch eine plattierte Vorderseitenmetallisierung ersetzt. Die texturierten Wafer erhalten einen selektiven Emitter, eine  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schicht und eine vollflächig Al-bedruckte Rückseite. Nachdem die Rückseitenpaste aufgebracht und getrocknet wurde, wird mithilfe eines Tintenstrahldruckers eine Silbernanopartikel-Tinte auf dem Substrat abgeschieden und anschließend in einem Gürtelofen gefeuert. Sowohl die Vorderseitenpads, als auch die Finger kontaktieren den Emitter. Aus den vorherigen Experimenten ist ersichtlich, dass die Vorderseitenpadfläche möglichst gering gehalten werden sollte, um zusätzliche Abschattung zu vermeiden. Deshalb wird die Padfläche auf  $500\ \mu\text{m} \times 500\ \mu\text{m}$  verkleinert. Auf die Saatschicht wird anschließend mit einer Plattiervorrichtung lichtinduziert Silber abgeschieden. Die abgeschiedene Metallmenge wird variiert, um eine Korrelation zwischen aufgebrachter Metallmenge und der Zelleistung herzustellen. Zusätzlich werden Multi-Busbar-Solarzellen ohne Vorderseitenpads hergestellt, um den Effekt der Vorderseitenpads zu untersuchen.

### 5.3.2 Analyse der Multi-Busbar-Solarzellen mit Vorderseitenpads

Die gefertigten Multi-Busbar-Solarzellen werden mithilfe eines Flashers der Firma Halm charakterisiert. In Abbildung 5.11 werden die Zellparameter über die abgeschiedene Silbermenge aufgetragen. Zusätzlich wird ein Fit (in Rot) in jedes Diagramm eingefügt, um den Verlauf zu veranschaulichen. Es werden hierfür lineare und polynomiale Fits verwendet.

In Abbildung 5.11 oben links ist die offene Klemmenspannung über den Silberverbrauch aufgetragen. Mit zunehmendem Metallverbrauch sinkt die Spannung. Der Verlauf ist auf die Erhöhung der Abschattung zurückzuführen. Dies ist recht anschaulich im benachbarten Diagramm zu erkennen. Hier ist die Kurzschlussstromdichte über die abgeschiedene Metallmenge aufgetragen. Mit zunehmendem Silberverbrauch steigt die Abschattung des Grids, der generierte Strom wird reduziert. Die Simulation prognostiziert für einen Stromdichteverlust von  $0,6\ \text{mA}/\text{cm}^2$  lediglich einen Spannungsverlust von  $0,4\ \text{mV}$ . Im Experiment ist ein Spannungsabfall von ca.  $1,5\ \text{mV}$  im linken Schaubild sichtbar.

Der Füllfaktorverlauf ist im Diagramm unten links dargestellt. Die Betrachtung des polynomial-Fits lässt den erwarteten Verlauf erkennen. Bei geringem Silberverbrauch



**Abb. 5.11:** I(U)-Parameter von Multi-Busbar-Solarzellen mit plattierter Ag-Vorderseitenmetallisierung (in Blau). In jedem Diagramm ist ein Fit (in Rot) zu sehen, der den Trend vorgibt. Mit zunehmender Metallmenge sinkt die offene Klemmenspannung. Die Kurzschlussstromdichte wird über die Abschattung bei hohem Metallverbrauch stark beeinflusst. Geringe Metallmengen reduzieren den Füllfaktor. Das Optimum liegt bei ca. 20 mg.

ist der Linienwiderstand der Finger hoch und der Füllfaktor niedrig. Durch eine Erhöhung der abgeschiedenen Metallmenge wird der Linienwiderstand verringert, der Füllfaktor steigt und geht schließlich in Sättigung. Der maximal erreichbare Füllfaktor liegt bei ca. 79%. Die siebgedruckten Solarzellen aus dem vorherigen Experiment (siehe Abbildung 5.3) erzielten Füllfaktoren von 80,0% und liegen damit um 1,0%<sub>abs</sub> höher. Da erkennbar ist, dass der Füllfaktor in Sättigung geht, kann davon ausgegangen werden, dass der Linienwiderstand des Fingergrids bei hohen Metallmengen ausreichend gering ist. Die Vermutung liegt deshalb nahe, dass der Kontaktwiderstand zwischen der Metallisierung und dem Emitter zu hoch ausfällt. Eine Messung des spezifischen Kontaktwiderstands bestätigte diese Vermutung. Mithilfe des TLM-Verfahrens (siehe Kapitel 3.3.1) wurden sechs Solarzellen charakterisiert. Der spezifische Kontaktwiderstand liegt im Mittel bei 4,36 mΩcm<sup>2</sup>. Die Standardabweichung beträgt 1,35 mΩcm<sup>2</sup>.

Für die Multi-Busbar-Solarzelle mit 35 μm breiter plattierter Saatschichtmetallisierung und 500 μm × 500 μm breiten Vorderseitenpads liegt das Optimum zwischen 15-25 mg Silber. Dargestellt ist dies im rechten unteren Diagramm. Der polynomial-Fit zeigt ein klares Maximum.

Zur plattierten Silbermenge wurde das Gewicht der Ag-Saatschicht addiert, um den gesamten Silberverbrauch zu ermitteln. Der Tintenauftrag für die Saatschicht wurde

mit 12 mg bestimmt. Der totale Metallverbrauch für eine Multi-Busbar-Solarzelle mit Vorderseitenpads liegt bei 27-37 mg Silber im Optimum.

Hierdurch ergibt sich im Vergleich zur Siebdruckmetallisierung mit breiteren Vorderseitenpads eine weitere Silberersparnis von 35-45 mg. Der Wirkungsgrad liegt 0,07 %<sub>abs</sub> niedriger als bei den siebgedruckten Multi-Busbar-Solarzellen. Der geringere Wirkungsgrad ist jedoch prozessbedingt und könnte durch eine Erhöhung des Füllfaktors beziehungsweise eine Senkung des Kontaktwiderstands zwischen Emitter und Saatschicht weiter erhöht werden. Bei einem Füllfaktor von 79,5 % würde die plattierte Solarzelle einen Wirkungsgrad von 19,6 % besitzen und somit den Wirkungsgrad der siebgedruckten Solarzellen übertreffen. Dies ist durchaus realistisch, wie die folgenden Experimente zeigen werden.

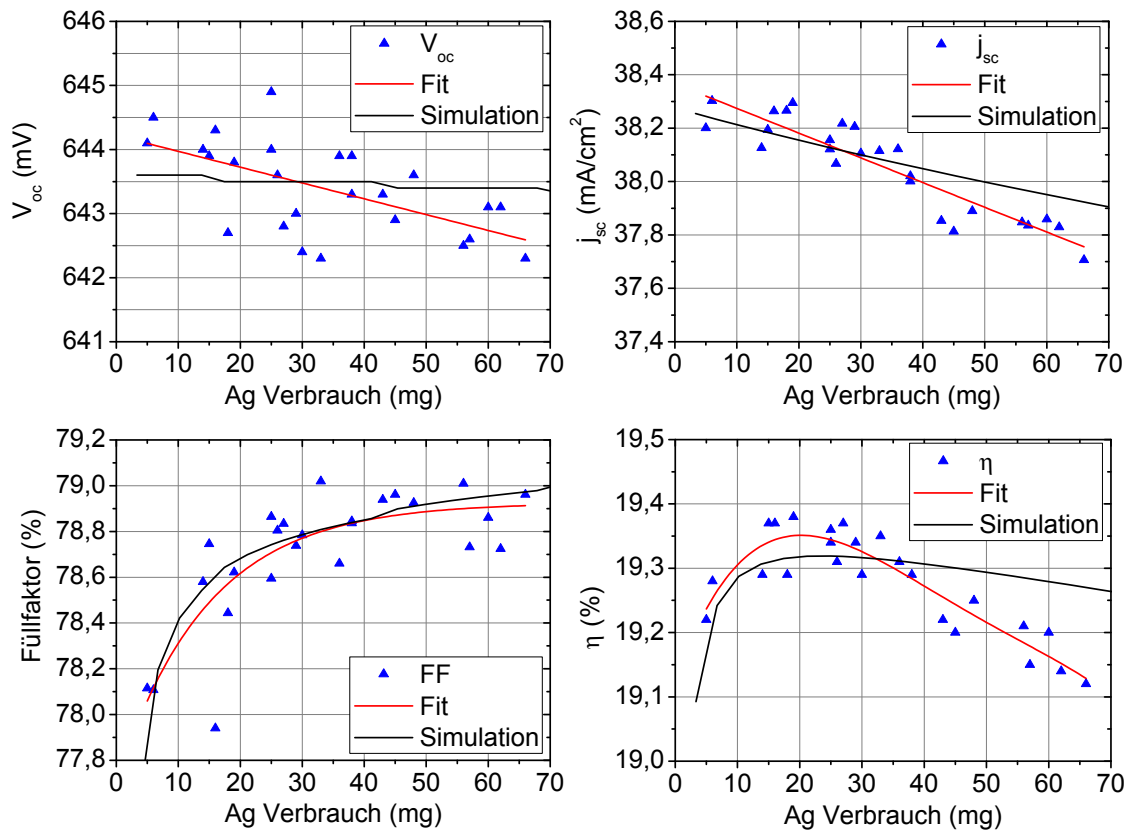
### 5.3.3 Vergleich des Experiments mit der Simulation

Abschließend soll die Simulation dem Experiment gegenübergestellt werden. Hierfür wird im Simulationsprogramm die Kurzschlussstromdichte  $j_{sc}$  und die offene Klemmenspannung  $V_{oc}$  bei einem Silberverbrauch von 30 mg vorgegeben und der Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der plattierten Silbermenge berechnet. Der spezifische Kontaktwiderstand wird auf  $4,3 \text{ m}\Omega/\text{cm}^2$  erhöht, um den geringen Füllfaktor abzubilden. Die Leitfähigkeit wird auf den ermittelten Wert von  $39 \times 10^6 \text{ S/m}$  angepasst. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.12 dargestellt.

In den vier Diagrammen sind die Ergebnisse des Experiments in Blau und die sich ergebenden Fit-Funktionen in Rot aufgetragen. Diese sind bereits aus dem vorherigen Abschnitt bekannt, lassen sich so aber deutlich einfacher mit den Ergebnissen der Simulation, die in Schwarz aufgetragen sind, vergleichen. Durch die Streuung der Messwerte wird ein Vergleich zwischen dem Experiment und der Simulation erschwert. Der Vergleich der simulierten und gemessenen offenen Klemmenspannungen ist in Abbildung 5.12 oben links dargestellt. Es ist eine Abweichung der Simulationswerte von den Messwerten an den Randbereichen erkennbar. Die Werte der Simulation wurden in 0,1 mV Schritten variiert, wodurch ein abgestufter Verlauf im Diagramm entsteht. Die Messwerte zeigen jedoch einen stärker abfallenden Verlauf. Die maximale Differenz zwischen Fit und Simulation liegt etwa bei 1 mV. Generell wird das Abnehmen der Spannung durch die Erhöhung der Abschattung in Folge des Silberverbrauchs hervorgerufen.

Die Kurzschlussstromdichte ist im oberen Diagramm rechts dargestellt. In den Randbereichen weicht die Simulation ebenfalls von den Messwerten ab, wobei die Kurzschlussstromdichte bei geringem Silberverbrauch unterschätzt und bei hohem Silberverbrauch überschätzt wird. Im Randbereich sind Abweichungen bis zu  $0,2 \text{ mA}/\text{cm}^2$  zu erkennen. Die Ergebnisse der Füllfaktorberechnung sind in Abbildung 5.12 links unten zu sehen. Die Simulationswerte zeigen hier ein zufriedenstellendes Ergebnis. Sie liegen innerhalb der Messwerte, weichen jedoch mit zunehmendem Silberverbrauch leicht vom Fit ab. Der Wirkungsgrad im rechten Bild unten gibt den Trend wieder, weicht jedoch bei hohem Silberverbrauch bis zu 0,2 %<sub>abs</sub> von den gemessenen Werten ab. Das Maximum der Simulation ist zusätzlich leicht verschoben.

Eine mögliche Erklärung für die Abweichung der Kurzschlussstromdichte, der offenen Klemmenspannung und des Füllfaktors von der Simulation könnte das in Kapitel 3.4 beschriebene Phänomen des Background Platings liefern. Die ungewollte Abscheidung



**Abb. 5.12:** I(U)-Parameter aus dem Experiment (blau) mit Fit-Funktionen (rot) und Ergebnissen der Simulation (schwarz). Die Simulation beschreibt den Verlauf der gemessenen Werte. Eine exakte Übereinstimmung ist jedoch nicht gegeben.

von Silber auf der  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schicht führt dazu, dass der Emitter partiell durch Silberpartikel kontaktiert wird. Dies erhöht die Rekombination an der Oberfläche und senkt die offene Klemmenspannung ab. Die zusätzliche Abschattung führt zu einer Reduzierung der Kurzschlussstromdichte. Es wird weniger Metall auf den Fingern abgeschieden. Der Linienwiderstand der Finger und der Füllfaktor werden deshalb in der Simulation zu hoch berechnet. Es scheint deshalb plausibel, dass eine exakte Übereinstimmung von Simulation und Messung unter Berücksichtigung des Background Platings den Verlauf genauer abbilden könnte. Leichtes Background Plating war auf den Zellen sichtbar, jedoch kann schwer abgeschätzt werden, wie groß der Einfluss dieses Effekts ist. Hierzu müsste die durch das Background Plating hervorgerufene Abschattung ermittelt werden.

Die Simulation hat gezeigt, dass sie den Verlauf der Messwerte abbilden kann. Die Differenzen zwischen Simulation und Experiment liegen zum einem an der Streuung der Messwerte, zum anderen erschwert leichtes Background Plating eine exakte Simulation. Ähnlich dem Vergleich aus dem vorherigem Kapitel ist festzuhalten, dass die Simulation den erwarteten Verlauf abbilden kann. Eine exakte Bestimmung der Absolutwerte ist jedoch aufgrund der breiten Streuung der Messwerte nicht möglich. Zusätzlich sinkt die Genauigkeit der Simulation mit weiterer Entfernung zum Referenzpunkt hin ab. Dies ist bei einer Extrapolation allerdings auch zu erwarten.

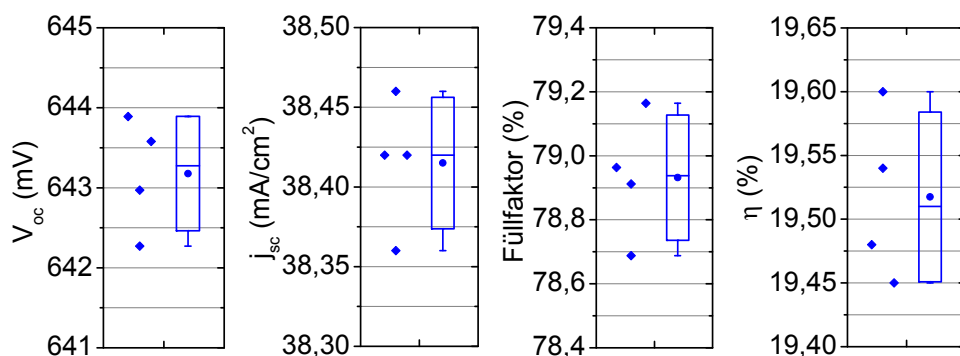
### 5.3.4 Analyse der Multi-Busbar-Solarzellen ohne Vorderseitenpads

Im zweiten Teil des Experiments wurden Multi-Busbar-Solarzellen ohne Vorderseitenpads hergestellt, um den Abschattungseffekt der Vorderseitenpads untersuchen zu können. Hierzu wurde mit dem Tintenstrahldrucker ein Fingergrid abgeschieden und anschließend plattiert. Die ermittelten I(U)-Parameter sind in Abbildung 5.13 dargestellt.

Die ermittelten offenen Klemmenspannungen liegen im Mittel bei 643,2 mV, zeigen jedoch eine Streuung von 1,6 mV. Vermutlich liegt dies an leicht unterschiedlichen Schichtwiderständen, die durch den Rückätzprozess bei der Herstellung des selektiven Emitters entstehen können.

Die mittlere Sättigungsstromdichte (zweites Schaubild) liegt bei 38,4 mA/cm<sup>2</sup>. Die Differenz zwischen Minimal- und Maximalwert liegt bei 0,10 mA/cm<sup>2</sup>. Wird als Referenz die Kurzschlussstromdichte bei einem Silberverbrauch von 16-19 mg herangezogen (siehe Abbildung 5.11), liegt diese bei 38,28 mA/cm<sup>2</sup>. Hieraus ergibt sich ein Stromdichtegewinn von 0,14 mA/cm<sup>2</sup>. Die Simulation errechnet bei einer Fingerbreite von 41 µm einen Gewinn von 0,21 mA/cm<sup>2</sup>. Die Abweichung beträgt 0,07 mA/cm<sup>2</sup>. Auch hier kann davon ausgegangen werden, dass der experimentell ermittelte Wert ohne Background Plating höher ausgefallen wäre. Die Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment wäre somit größer.

Die Füllfaktoren liegen im Mittel bei 78,9 % und werden, wie bereits oben beschrieben durch einen hohen Kontaktwiderstand limitiert. Es werden mittlere Wirkungsgrade von 19,52 % erreicht. Der maximal erreichbare Wirkungsgrad beträgt 19,6 % und liegt damit 0,2%<sub>abs</sub> höher als die beste Solarzelle mit Vorderseitenpads. Die plattierte Silbermenge beträgt 13-15 mg. Der Tintenverbrauch für die Saatschicht liegt bei 7 mg. Damit genügen 20-22 mg Silber, um eine Multi-Busbar-Solarzelle ohne Vorderseitenpads ausreichend zu metallisieren. Der Vergleich zwischen der Simulation aus Abbildung 2.21 in Kapitel 2.5.1 und dem Experiment liefert eine zufriedenstellende Übereinstimmung. Die Simulation prognostiziert einen Silberbedarf von 17 mg Silber bei einer Saatschichtbreite von 35 µm. Allerdings wurde in der Simulation von einer geringen Silberleitfähigkeit von  $30 \times 10^6$  S/m ausgegangen. Der ermittelte Linienwi-



**Abb. 5.13:** I(U)-Parameter von Multi-Busbar-Solarzellen mit plattierter Ag-Vorderseitenmetallisierung ohne Vorderseitenpads. In jedem Diagramm befinden sich links die gemessenen Werte, rechts daneben der Boxplot mit Min-/Max-Wert (Whiskers), Median, Mittelwert (Punkt) und Standardabweichung.

derstand liegt nach neun Messungen bei  $1,18 \Omega/\text{cm}$ , die Standardabweichung beträgt  $45,9 \text{ m}\Omega/\text{cm}$ . Damit ergibt sich eine Leitfähigkeit von  $39 \times 10^6 \text{ S/m}$ . Dies entspricht fast 63 % der Leitfähigkeit von kristallinem Silber.

Durch eine Anpassung des ermittelten Werts an die Simulation sinkt der Silberverbrauch in der Simulation auf ca. 13 mg. Somit wird auch hier eine Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation erreicht.

## 5.4 Optimierung des Grids für Multi-Busbar-Solarzellen

Da die Abschattung der Vorderseitenpads sowohl die Zelleistung als auch den Metallverbrauch negativ beeinflussen, wurde das Grid optimiert. Ziel war es, die Abschattung und den Metallverbrauch zu minimieren. Durch eine Reduzierung der Anzahl an Vorderseitenpads kann dies realisiert werden. Dafür müssen mehrere Finger auf ein Vorderseitenpad geführt werden. Die Fingerlänge erhöht sich dadurch leicht. Durch die Verringerung der Padanzahl sollte allerdings die benötigte Metallmenge für die Vorderseitenmetallisierung sinken.

Zusätzlich soll das neue Zelldesign für unterschiedliche Metallisierungsverfahren evaluiert werden. Hierfür wurden sowohl siebgedruckte als auch plattierte Vorderseitenmetallisierungen miteinander verglichen. Als Referenzgruppe dienen plattierte 3-Busbar-Solarzellen.

### 5.4.1 Beschreibung des Experiments

Die Solarzellen werden, wie in den vorherigen Experimenten mit einer selektiven Emitterstruktur und einem vollflächigen Al-BSF hergestellt. Es werden drei unterschiedliche Zelltypen gefertigt und elektrisch charakterisiert.

Die erste Gruppe bildeten 3-Busbar-Solarzellen. Die Vorderseitenmetallisierung wird mit dem in Kapitel 5.3 beschriebenen Seed-and-Plate-Verfahren hergestellt. Eine Silbernanopartikel-Tinte bildet die Saatschicht, die anschließend mithilfe einer lichtinduzierten nasschemischen Silberabscheidung verstärkt wird. Die Busbars weisen eine Breite von 1,2 mm auf. Der Fingerabstand wird auf 1,8 mm festgelegt.

Die zweite Gruppe besteht aus Multi-Busbar-Solarzellen, die ebenfalls eine plattierte Vorderseitenmetallisierung besitzen. Die Anzahl der Vorderseitenpads wird reduziert und die Finger zusammengeführt. Die Geometrie des neuen Grids ist in Abbildung 5.14 illustriert. Auf der linken Seite ist ein Ausschnitt des Standardgrids in Schwarz



**Abb. 5.14:** Schematischer Ausschnitt der zwei Gridstrukturen mit Fingern und Vorderseitenpads (schwarz). In Grau sind die Drähte dargestellt. Links: Standardgrid, jeder Finger wird mit Vorderseitenpads kontaktiert, die Finger sind durchgängig. Rechts: Optimiertes Grid mit Fingerunterbrechungen und reduzierter Vorderseitenpadanzahl.

abgebildet. In Grau sind Drähte sichtbar, die über die Vorderseitenpads gelegt wurden. Auf der rechten Seite ist das optimierte Grid abgebildet. Jeweils drei Finger laufen auf ein Vorderseitenpad zu. Zwischen den Fingern wird in der Mitte zusätzlich eine Unterbrechung eingefügt, um die benötigte Metallmenge weiter zu reduzieren.

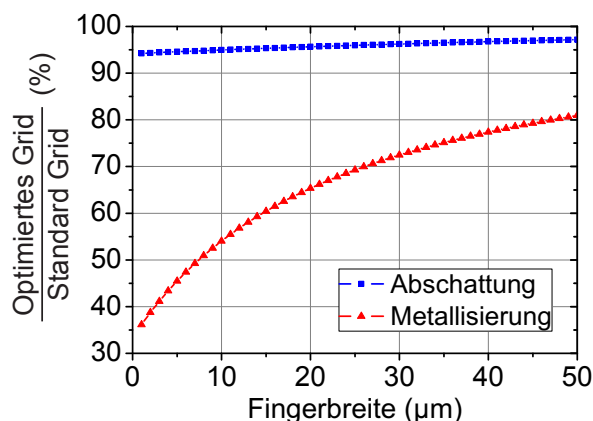
Die dritte Gruppe besteht aus Multi-Busbar-Solarzellen, bei denen das optimierte Grid nicht plattiert, sondern mithilfe des Siebdruckverfahrens hergestellt wird. Hierzu wird in einem ersten Druckschritt das Fingergrid aufgebracht, das den Kontakt zum Emitter herstellen soll. In einem zweiten Druckschritt wird anschließend die Padstruktur gedruckt. Die Fläche der gedruckten Vorderseitenpads beträgt  $500 \mu\text{m} \times 700 \mu\text{m}$ . Wie bereits in den vorherigen Experimenten gezeigt, wird hier der Silberverbrauch höher sein als bei einer plattierten Vorderseite.

### 5.4.2 Analyse der Multi-Busbar-Solarzellen mit optimiertem Grid

Ein Vergleich zwischen dem Standard- und dem optimierten Grid ist in Abbildung 5.15 dargestellt. Auf der linken y-Achse wird der Quotient aus optimiertem Grid zu Standardgrid prozentual aufgetragen. Hierbei gibt die blaue Kurve die Abschattung und die rote Kurve die Metallmenge an. Auf der x-Achse wird die Fingerbreite aufgetragen. Die Fläche der Vorderseitenpads wird auf  $500 \times 500 \mu\text{m}^2$  festgelegt.

Eine geringere Abschattung durch das optimierte Grid kann kaum erreicht werden. Durch die Breite des Drahts von  $300 \mu\text{m}$  ist der mögliche Abschattungsgewinn eher gering. Bei einer Fingerbreite von  $40 \mu\text{m}$  wird ein Abschattungsgewinn von 4 % berechnet. Dies ist auch in Abbildung 5.14 deutlich sichtbar. Jedoch wird durch das optimierte Grid die benötigte Silbermenge zur Vorderseitenmetallisierung reduziert. In Abbildung 5.15 ist dies durch die rote Kurve symbolisiert. Mit sinkender Fingerbreite sinkt die benötigte Metallmenge. Bei einer Fingerbreite von  $40 \mu\text{m}$  ist eine Silbereinsparung von 22 % im Vergleich zum Standardgrid möglich.

Die Ergebnisse der Zellmessungen sind in Abbildung 5.16 dargestellt. Die Gruppe mit den 3-Busbar-Solarzellen und dem plattierten Grid ist in Blau dargestellt und wird als 3BB-Nano bezeichnet. Die optimierten Multi-Busbar-Solarzellen, deren Vorderseite ebenfalls plattiert wurde, sind in Rot abgebildet. Ihre Bezeichnung lautet MBB Nano.



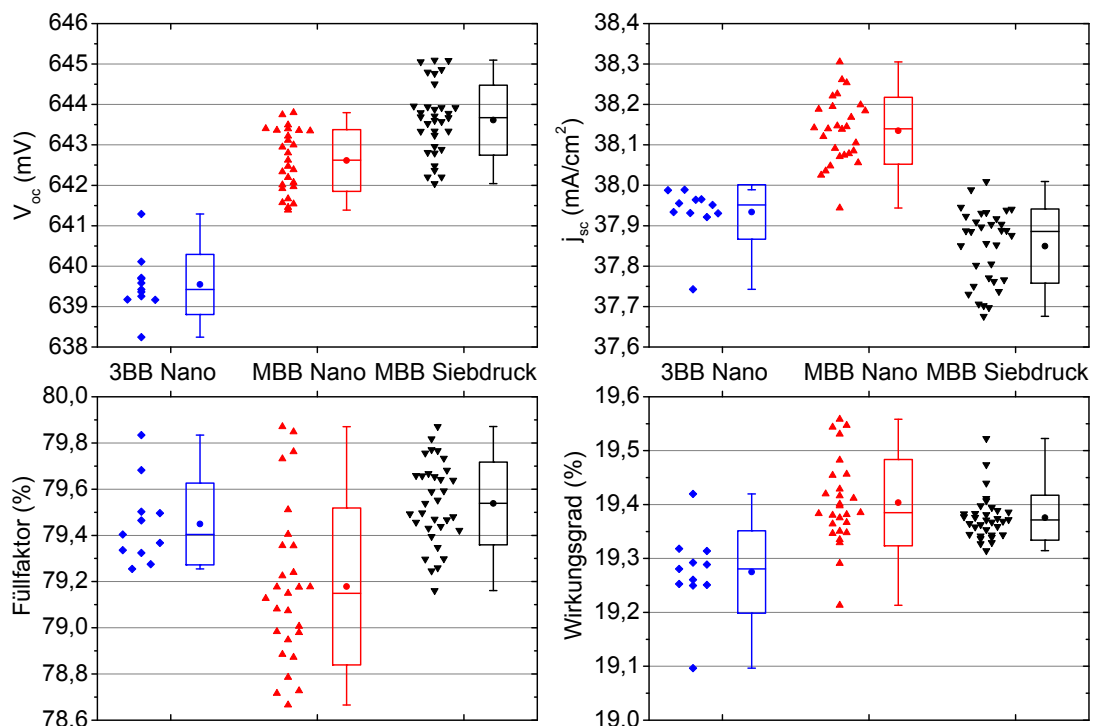
**Abb. 5.15:** Verhältnis zwischen optimiertem Grid zu Standardgrid, aufgetragen über die Fingerbreite. Die Vorteile in der Abschattung (blau) sind vernachlässigbar, jedoch ergeben sich Vorteile bei der Reduzierung der Metallmenge (rot).

Die dritte Gruppe bilden die siebgedruckten Multi-Busbar-Solarzellen mit dem optimierten Grid. Abgekürzt werden sie mit der Bezeichnung MBB Siebdruck.

Die offene Klemmenspannung ist oben links im Schaubild dargestellt. Da bei der Herstellung der 3-Busbar-Solarzellen Unregelmäßigkeiten auftraten, ist die Stückzahl reduziert. Die Spannung ist im Vergleich zu den Multi-Busbar-Gruppen reduziert und liegt im Mittel bei 639,5 mV. Die 3-Busbar-Solarzelle besitzt trotz der geringen Busbarbreite fast 40 % mehr Kontaktfläche zum Emmitter als Gruppe 2. Der daraus resultierende Spannungsverlust beträgt 3 mV. Im Mittel liegt die offene Klemmenspannung bei Gruppe 2 bei 642,6 mV. Allerdings erzielt die Siebdruckgruppe die höchsten Spannungswerte. Wie bereits erwähnt haben hier ausschließlich die Finger Kontakt zur Emmitterstruktur. Im Mittel werden so  $V_{oc}$ -Werte von 643,6 mV erreicht.

Die Kurzschlussstromdichte im Diagramm links oben zeigt den zu erwartenden Trend. Da die Abschattung für die plattierten Multi-Busbar-Solarzellen am geringsten ist, wird hier im Mittel eine Stromdichte von  $38,14 \text{ mA/cm}^2$  erreicht. Mit  $38,3 \text{ mA/cm}^2$  im Maximum reichen die Stromdichten des optimierten Designs nicht an die Werte der Solarzellen ohne Vorderseitenpads aus dem vorherigen Kapitel heran. Hier wurden im Mittel Werte über  $38,4 \text{ mA/cm}^2$  gemessen (siehe Kapitel 5.3.4). Die siebgedruckten Multi-Busbar-Solarzellen liegen hier im Mittel bei  $37,88 \text{ mA/cm}^2$ . Sie zeigen damit ähnliche Werte wie die Solarzellen aus dem zweiten Experiment (siehe Kapitel 5.2.1).

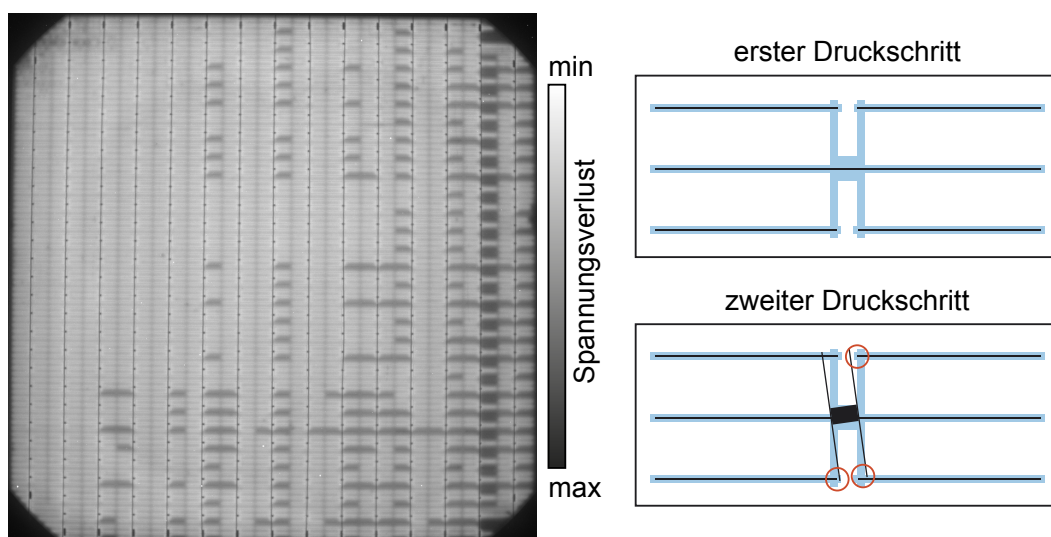
Die Füllfaktoren aller Gruppen zeigen große Schwankungen. Sie sind im unteren linken Diagramm abgebildet. Für die Multi-Busbar-Gruppen kann die Schwankung



**Abb. 5.16:** I(U)-Parameter der drei Gruppen. Gruppe 1 in Blau zeigt 3-Busbar-Solarzellen mit Seed-and-Plate Vorderseitenmetallisierung. Gruppe 2 in Rot zeigt Multi-Busbar-Solarzellen mit Seed-and-Plate Vorderseitenmetallisierung. Gruppe 3 besteht aus siebgedruckten Multi-Busbar-Solarzellen.

durch eine ungenaue Ausrichtung beim zweiten Druckschritt erklärt werden. Es war prozessbedingt notwendig, das Substrat nach dem Fingerdruck für den zweiten Druckschritt um 90 Grad zu drehen, damit die Verbindungsfinger und Vorderseitenpads gedruckt werden konnten. Bei einer ungenauen Ausrichtung der Substrate kann es hierbei zum Nichtkontaktieren der Finger kommen. Dies wirkt sich negativ auf den Füllfaktor aus. Exemplarisch für solch einen Fehldruck ist in Abbildung 5.17 links eine unskalierte EL-Aufnahme dargestellt. In den dunklen Bereichen ist der Spannungsabfall besonders hoch, da keine Verbindung zwischen den Fingern besteht. Auf der rechten Seite wird dargestellt, wie der Fehldruck beim zweiten Druckschritt entsteht. Die roten Umrandungen zeigen die nicht-kontaktierten Bereiche. Vereinzelt wurden jedoch hohe Füllfaktoren im Bereich von 79,8% für alle drei Gruppen gemessen. Die siebgedruckten Multi-Busbar-Solarzellen zeigen jedoch im Mittel deutlich höhere Füllfaktoren von 79,5%.

Im letzten Diagramm unten rechts werden die Wirkungsgrade der Solarzellen dargestellt. Aufgrund der niedrigen Spannungswerte erreichen die plattierten 3-Busbar-Solarzellen im Mittel Wirkungsgrade von 19,28%. Im Vergleich zu den siebgedruckten 3-Busbar-Solarzellen aus den Experimenten in Abschnitt 5.1.2 oder 5.2.2 liegt der Wirkungsgrad der plattierten 3-Busbar-Solarzellen im Mittel fast 0,2%<sub>abs</sub> niedriger als bei siebgedruckten 3-Busbar-Solarzellen. Dies liegt vorrangig an den geringeren  $V_{oc}$ - und Füllfaktorwerten. Die starke Streuung der Wirkungsgrade der plattierten Multi-Busbar-Solarzellen ist mit Ausrichtungsschwierigkeiten zwischen dem ersten und dem zweiten Druckschritt zu erklären. Ein größere Toleranz der Überlappungsbereiche könnte diese Problematik jedoch einfach beseitigen. Wirkungsgrade im Bereich von 19,55% können so erreicht werden. Ähnlich hohe Wirkungsgrade können auch mit einer optimierten siebgedruckten Vorderseite erreicht werden, wobei hier die höhere Abschattung durch die breiteren Finger durch einen leicht erhöhten Füllfaktor



**Abb. 5.17:** Links: Unskalierte EL-Aufnahme einer plattierten Multi-Busbar-Solarzelle mit optimiertem Grid. Durch einen Fehldruck der Saatschicht werden teilweise die Fingerstrukturen nicht mit den Vorderseitenpads verbunden. Rechts: Druck auf eine selektive Emitterstruktur (hellbraun). Durch eine ungenaue Ausrichtung beim zweiten Druckschritt können Fingerunterbrechungen entstehen.

kompensiert werden kann.

Die Ergebnisse des Silberverbrauchs der Vorderseitenmetallisierung für die drei Gruppen sind in Tabelle 5.5 abgebildet. Für die plattierten 3-Busbar-Solarzellen beträgt der Gesamtverbrauch circa 100 mg. Im Vergleich zu den siebgedruckten 3-Busbar-Solarzellen aus dem ersten Experiment lassen sich 38-44 mg Silber einsparen. Allerdings lagen die maximalen Wirkungsgrade der siebgedruckten 3-Busbar-Solarzellen um 0,2 %<sub>abs</sub> höher. Die plattierten Multi-Busbar-Solarzellen mit optimierter Vorderseite benötigen 28-34 mg Silber und liegen damit im Bereich der Multi-Busbar-Solarzellen mit Standard Design, deren Metallverbrauch mit 27-37 mg angegeben wurde. Die prognostizierte Einsparung von 22 % wird nicht erreicht. Im Vergleich zum Standard-design kann jedoch ein Wirkungsgradgewinn von knapp 0,2 % verzeichnet werden. Dieser ist allerdings nicht ausschließlich dem optimierten Design zuzuschreiben. Durch einen geringeren Kontaktwiderstand sind die Füllfaktoren teils deutlich erhöht.

Ein Vergleich des Metallverbrauchs der optimierten Siebdruckgruppe (60-65 mg) mit den Ergebnissen aus dem ersten Experiment (68 mg) zeigt eine geringe Einsparung. Experimente anderer Gruppen zeigen ähnliche Ergebnisse [182, 183]. Es wurde berichtet, dass mit einem modifizierten Tiefdruckverfahren (engl. Gravure Offset Printing) Multi-Busbar-Solarzellen mit einem Ag-Pastenverbrauch von 13,6 mg hergestellt wurden [184]. Der maximal erreichbare Wirkungsgrad ist mit 0,1 %<sub>abs</sub> leicht erhöht. Die siebgedruckten Solarzellen aus dem zweiten Experiment erzielen jedoch ähnlich hohe Wirkungsgrade. Eine weitere Optimierung des Griddesigns für beide Metallisierungsverfahren könnte durch folgende Ansätze realisiert werden [185, 186]. Teile dieser Arbeit wurden veröffentlicht [187].

**Tabelle 5.5:** Silberverbrauch für die Vorderseitenmetallisierung der drei Gruppen. 3BB = 3-Busbar, MBB = Multi-Busbar, Nano = Ag-plattiertes Grid mit Nanopartikel-Saatschicht.

Metallverbrauch in (mg)	3BB Nano	MBB Nano	MBB Siebdruck
Siebdruck Finger			30-33
Siebdruck Pads			30-32
Saatschicht	11-12	8-9	
Ag LIP	85-90	20-25	
Gesamtverbrauch	96-102	28-34	60-65

## 5.5 Zusammenfassung

In den vier Experimenten wurde gezeigt, dass Multi-Busbar-Solarzellen bei einer Verschaltung mit 15 jeweils 300  $\mu\text{m}$  dicken Drähten trotz geringerer Zelleistung höhere Wirkungsgrade als 3-Busbar-Solarzellen erzielen. Ein-Zell-Module mit 15 jeweils 250  $\mu\text{m}$  breiten Drähten erreichten einen Wirkungsgrad von 18,3 %. Durch die Verwendung von 300  $\mu\text{m}$  breiten Drähten konnte der Wirkungsgrad auf 18,6 % erhöht werden. Die 3-Busbar-Referenzgruppe erzielte hingegen bei einem um 0,2 % erhöhten Zellwirkungsgrad einen Modulwirkungsgrad von 18,2 %. Der Silberverbrauch für die siebgedruckte Vorderseitenmetallisierung lag mit 68 mg um 72 mg unter der benötigten Silbermenge einer 3-Busbar-Solarzelle. Die Simulation zeigte gute Übereinstimmung im Serienwiderstand und kann somit zur Abschätzung der relativen Wirkungsgradunterschiede verwendet werden. Wird eine Referenz-Solarzelle für die Simulation verwendet, können zusätzlich Absolutwerte berechnet werden.

Das zweite Experiment zeigte, dass die Zelleistung in Vier-Zell-Modulen unter der Verwendung von Rändern praktisch nicht abnimmt. Durch die zusätzliche Fläche wird der Gesamtwirkungsgrad des Moduls negativ beeinflusst. Es konnten Moduleleistungen bis zu 18 W mit Multi-Busbar-Vier-Zell-Modulen erreicht werden. Für die Vorderseitenmetallisierung aller Multi-Busbar-Solarzellen wurden 280 mg Silberpaste benötigt. Für die vier Solarzellen des 3-Busbar-Referenzmoduls wurden 600 mg Silberpaste verbraucht. Die Moduleleistung lag bei 17,8 W.

Im dritten Experiment wurde gezeigt, dass eine Multi-Busbar-Solarzelle mit einer plattierten Vorderseite nur 27-37 mg Silber benötigt, um hohe Wirkungsgrade von 19,4 % zu erzielen. Ohne Vorderseitenpads können Wirkungsgrade von 19,6 % auf Zellebene erreicht werden. Der Silberverbrauch sinkt auf 20-22 mg. Die Simulation prognostiziert, bei Anpassung der Leitfähigkeit, einen Silberverbrauch von 13 mg Silber. Mit 7 mg Ag für die Saatschichttinte liegt der simulierte Verbrauch bei 20 mg. Die Simulation einer plattierten Metallisierung mit Vorderseitenpads zeigte somit bei der Angabe der benötigten Silbermenge leichte Abweichungen. Durch auftretendes Background Plating kann die Abweichung der Simulation zum Experiment jedoch erklärt werden.

Durch ein optimiertes Vorderseitendesign lässt sich die benötigte Silbermenge der Multi-Busbar-Solarzellen weiter reduzieren. Es konnte demonstriert werden, dass Wirkungsgrade von 19,56 % mit einer plattierten Vorderseite erreicht werden können. Wird eine Siebdruckmetallisierung auf der Vorderseite verwendet, sind Einsparungen zum Standarddesign von 8 mg möglich. Die Solarzelle ist mit 60 mg Pastenverbrauch ausreichend metallisiert und erreicht Wirkungsgrade von 19,52 %.

# Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Leistungsverhalten von kristallinen Si-Solarzellen in Photovoltaik-Modulen analysiert, um Rückschlüsse auf die widerstandsbehafteten Leistungsverluste derselben zu ziehen. Hierfür wurde ein auf dem Zweidiodenmodell basierendes Simulationsprogramm entwickelt und die Leistungsverluste der einzelnen Komponenten einer Solarzelle auf Zell- und Modulebene wurden bestimmt. Es konnte demonstriert werden, dass durch das Multi-Busbar-Design nicht nur die benötigte Metallmenge zur Vorderseitenmetallisierung reduziert werden kann. Auch eine Erhöhung der Modulleistung wurde in Experimenten zu Referenzgruppen mit 3-Busbar-Solarzellen aufgezeigt. Da ausschließlich die Verschaltung und das Vorderseitendesign der Solarzellen angepasst werden muss, bietet das Multi-Busbar-Konzept eine vielversprechende Möglichkeit, die Modulkosten weiter zu reduzieren und gleichzeitig den Wirkungsgrad der Module zu erhöhen.

Durch eine Optimierung der Verschaltung der Solarzellen wurde belegt, dass der Wirkungsgrad der Solarzellen im Modul erhöht werden kann, ohne das Zelldesign selbst stark zu verändern. Dies gelang, indem die Anzahl und Geometrie der Verbindungsleiter variiert wurde. Alternative Ansätze zur Vorderseitenmetallisierung von Solarzellen wurden evaluiert. Besonders nasschemische Abscheideverfahren eröffnen die Möglichkeit, den Metallverbrauch für die Vorderseitenmetallisierung zu reduzieren und bieten somit Ansätze zur Kostenreduktion für die Solarzellenproduktion. In Simulationen und Experimenten wurde demonstriert, dass eine plattierte Vorderseite, im Vergleich zu einer siebgedruckten Vorderseite, zusätzlich den Wirkungsgrad der Solarzellen erhöht. Im Folgenden werden die Ergebnisse der getätigten Untersuchungen einzeln präsentiert.

Mithilfe des entwickelten Simulationsprogramms wurden Verlustleistungsanalysen verschalteter Solarzellenrückseiten durchgeführt. Diese belegten, dass eine eindimensionale Betrachtung den Serienwiderstand des Systems unzureichend widerspiegelt. Besonders für Ribbons und Drähte mit geringem Querschnitt ergaben sich große Abweichungen zu den ermittelten Werten der dreidimensionalen Simulationen.

Es wurde gezeigt, dass die gängige Methode zur Messung der Diodenkennlinie einer 3-Busbar-Solarzelle nach heutigem Standard nicht ihrer Leistung im Modul entspricht, da der Serienwiderstandsbeitrag der Ribbons vernachlässigt wird. Eine Optimierung der Drahtanzahl und des Drahtdurchmessers sowie die Veränderung des Fingerabstands und der Fingerbreite für Multi-Busbar-Solarzellen zeigte, dass eine verschaltete siebgedruckte Multi-Busbar-Solarzelle mit 10  $\mu\text{m}$  breiten Fingern durch 6 mg Silberpaste ausreichend metallisiert wird. Ein Wirkungsgrad von 19,4 % wurde ermittelt. Im Vergleich zu einer 3-Busbar-Solarzelle konnte eine Ag-Pastenreduktion über 130 mg ermittelt werden.

Im Gegensatz zu Siebdruckprozessen kann die Metallmenge bei Plattierprozessen genau definiert werden. Simulationen belegten, dass die benötigte Metallmenge von

der Breite der Saatschicht entkoppelt ist. Dies bedeutet, dass die benötigte Metallmenge zur Vorderseitenmetallisierung ausschließlich von der Drahtanzahl und der Saatschichtbreite abhängt. Die durchgeführten Simulationen ergaben, dass eine Multi-Busbar-Solarzelle mit 17 jeweils 250 µm dicken Drähten mit einer Silbermenge von 12 mg ausreichend plattiert wird. Wirkungsgrade für verschaltete Multi-Busbar-Solarzellen von 19,4% wurden ermittelt. Die 3-Busbar-Solarzelle benötigt für die Vorderseitenmetallisierung hingegen über 200 mg Silber und erzielt Wirkungsgrade von 18,9%.

Wurde Silber durch Nickel ersetzt, erhöhte sich aufgrund der geringeren Leitfähigkeit die benötigte Metallmenge für eine verschaltete Multi-Busbar-Solarzelle auf 20-25 mg, jedoch wurden ähnliche Wirkungsgrade erreicht. Für 3-Busbar-Solarzellen ist eine reine Nickelmetallisierung nicht erstrebenswert, da der Wirkungsgrad durch die große benötigte Metallmenge stark abfällt.

Untersuchungen von Ni/P-Schichten zeigten, dass der Kontaktwiderstand durch eine Temperaturbehandlung zwischen 350-500 °C in einem Rohrofen in N<sub>2</sub>-Atmosphäre stark reduziert wurde. Auf hochohmigen Emittlern mit geringer Oberflächendotierung konnten spezifische Kontaktwiderstände von 0,1 mΩcm<sup>2</sup> erreicht werden. Damit wurde bewiesen, dass auch bei geringen Fingerbreiten und hohen Emitter-Schichtwiderständen ein ausreichend geringer Kontaktwiderstand zwischen Emitter und Metallisierung durch eine Metallisierung auf Nickelbasis erreicht werden kann. Besonders für zukünftige Solarzellenkonzepte mit hohen Emitter-Schichtwiderständen und sehr schmalen Fingern bietet eine Metallisierung auf Nickelbasis deshalb eine kostengünstige Alternative zur gängigen Ag-Metallisierung.

Untersuchungen zum Background Plating, der ungewollten Metallabscheidung bei nasschemischen Plattierprozessen, wurden im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt. Mithilfe von REM-Aufnahmen, FIB-Schnitten und EDX-Analysen wurde erstmals die Ursache für die ungewollte Metallabscheidung belegt. Organische Verunreinigung und kleine Si-Partikel, die sich auf der Emitteroberfläche befanden, sowie Risse im Substrat führten zu einer Störung der SiN<sub>x</sub>:H-Schicht. Es wurde belegt, dass auf der SiN<sub>x</sub>:H-Schicht an diesen Stellen während des Plattiervorgangs Metall abgeschieden wurde.

Für gesinterte Ni/P-Schichten konnte demonstriert werden, dass Nickel durch die Risse tief in das Substrat gelangt. Hierdurch entstand eine metallische Verbindung zwischen Emitter und Basis, die zu einem Kurzschluss der Raumladungzone führt. Infolgedessen sinken sowohl die Spannung als auch der Füllfaktor der Solarzelle. Die Untersuchung lieferte somit erstmals eine Erklärung dafür, warum plattierte Solarzellen trotz einer Kantenisolation nach dem Plattiervorgang häufig einen geringen Parallelwiderstand aufweisen.

Durch eine gezielte Entfernung organischer Verunreinigungen und durch geringe mechanische Belastung konnte die ungewollte Metallabscheidung stark reduziert werden.

Experimente auf Zell- und Modulebene konnten die Vorteile des Multi-Busbar-Konzepts belegen. Obwohl die Multi-Busbar-Solarzellen im Experiment geringere Wirkungsgrade als die 3-Busbar-Solarzellen aufwiesen, konnten in Untersuchungen mit Ein-Zell-Modulen Wirkungsgradgewinne von 0,4 %<sub>abs</sub> ermittelt werden. 3-Busbar-Ein-Zell-Module mit 200 µm hohen Ribbons zeigten ähnliche Füllfaktoren wie Multi-Busbar-Module, die mit 15 jeweils 250 µm dicken Drähten verschaltet wurden. Eine

Verschaltung mit 15 jeweils 300 µm dicken Drähten erhöhte, im Gegensatz zu 15 jeweils 250 µm dicken Drähten, den Füllfaktor des Moduls um 1 %<sub>abs</sub>. So konnten im Modul Füllfaktoren von 78,0 % auf Modulebene erzielt werden. Die Ag-Pastenersparnis lag im Vergleich zu den 3-Busbar-Solarzellen bei 72 mg. Der mithilfe der Simulation ermittelte Gesamtserienwiderstand zeigte nur geringe Abweichungen zu den ermittelten Werten des Experiments.

Experimente mit Vier-Zell-Modulen belegten, dass die Solarzellen durch die Freiflächen im Modul einen höheren Strom generieren. Auch hier konnte belegt werden, dass die Multi-Busbar-Module höhere Leistungen erzielen als 3-Busbar-Module.

Wurde die Siebdruckmetallisierung auf der Vorderseite durch eine plattierte Metallisierung ersetzt, ergaben sich signifikante Einsparungen beim Metallverbrauch der Multi-Busbar-Solarzellen. Insgesamt wurden 20-22 mg Silber für eine plattierte Metallisierung mit Saatschicht benötigt. Wirkungsgrade von 19,6 % konnten erreicht werden. Die Ergebnisse der Simulation liegen in Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus dem Experiment.

Durch eine Veränderung der Fingerstruktur konnte der Verschaltungsprozess vereinfacht und gleichzeitig die Abschattung reduziert werden. Bei einer siebgedruckten Vorderseitenmetallisierung ließ sich so der Ag-Pastenverbrauch auf 60 mg reduzieren. Wirkungsgrade von 19,5 % wurden für diesen optimierten Zelltyp ermittelt.



# Literaturverzeichnis

- [1] Bundesgesetzblatt, „Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz-EEG) sowie zur Änderung des Energiewirtschaftsgesetzes und des Mineralölsteuergesetzes“, Nr. 13 , Seite 305, 31.03.2000.
- [2] Richtlinie zur Förderung der Erprobung, kleiner photovoltaischer Solarenergieanlagen (Bund/Länder-1000-Dächer-Programm), Bundesanzeiger, 22.09.1990.
- [3] Richtlinien zur Förderung von Photovoltaik-Anlagen (300 MW) durch ein „100000-Dächer-Solarstrom-Programm“, Bundesanzeiger, 17.03.2001.
- [4] <http://www.solarserver.de/service-tools/photovoltaik-preisindex.html>, 18.02.2014.
- [5] [http://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen\\_Institutionen/ErneuerbareEnergien/Photovoltaik/-Datenmeldungen/EEGVerg\\_FebApril2014.xls?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](http://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/ErneuerbareEnergien/Photovoltaik/-Datenmeldungen/EEGVerg_FebApril2014.xls?__blob=publicationFile&v=2), 18.02.2014.
- [6] S.K. Iya, „Production of ultra-high-purity polycrystalline silicon“, J. Cryst. Growth, **75**, S. 88-90, 1986.
- [7] A. Luque, S. Hegedus, „Handbook of Photovoltaic Science and Engineering“, John Wiley & Sons, 2003.
- [8] A. Schönecker, L.J. Geerligs, A. Müller, „Casting technologies for solar silicon wafers: block casting and ribbon-growth-on-substrate“, Solid State Phenom., **95-96**, S. 149-158, 2004.
- [9] T.F. Ciszek, G.H. Schwuttke, K.H. Yang, „Directionally solidified solar-grade silicon using carbon crucibles“, J. Cryst. Growth, **46 (4)**, S. 527-533, 1979.
- [10] J. Li, M. Lei, Y. Tan, L. Wen, „Effect of silicon nitride coating of quartz crucible on impurity distribution in ingot-cast multicrystalline silicon“, Int. J. Appl. Ceram. Technol., **10 (1)**, S. 40-44, 2013.
- [11] J. Czochralski, „Ein neues Verfahren zur Messung der Kristallisationsgeschwindigkeit der Metalle“, Z Phys Chem, **92**, S. 219-221, 1918.
- [12] K. Nakajima and N. Usami, „Crystal Growth of Si for Solar Cells“, Springer Verlag, 2009.
- [13] H.J. Möller, „Basic mechanisms and models of multi-wire sawing“, Advanced Engineering Materials, **6 (7)**, S. 501-513, 2004.

- [14] D. Kray, M. Schumann, A. Eyer, G.P. Willeke, R. Kübler, J. Beinert, G. Kleer, „Solar wafer slicing with loose and fixed grains“, Proc. 17th EU PVSEC, München, 2001, S. 948-951.
- [15] G. Hahn, A. Schönecker, „New crystalline silicon ribbon materials or photovoltaics“, J. Phys.: Condens. Matter, **16**, S. R1615-R1648, 2004.
- [16] H. Lange, I.A. Schwirtlich, „Ribbon growth on substrate (RGS) a new approach to high speed growth of silicon ribbons for photovoltaics“, J. Cryst. Growth, **104**, S. 108-112, 1990.
- [17] E. Vazsonyi, K. De Clercq, R. Einhaus, E. Van Kerschaver, K. Said, J. Poortmans, J. Szlufcik, J. Nijs, „Improved anisotropic etching process for industrial texturing of silicon solar cells“, Sol. Energ. Mat. Sol. Cells, **57**, S. 179-188, 1999.
- [18] J.N. Ximello, J. Junge, S. Seren, G. Hahn, E. Epple, „Up to 20% efficient solar cells on monocrystalline silicon wafers“, Proc. 26th EU PVSEC, Hamburg, 2011, S. 849-852.
- [19] K. Birmann, M. Demant, S. Rein, „Optical characterization of random pyramid texturization“, Proc. 26th EU PVSEC, Hamburg, 2011, S. 1454-1458.
- [20] A. Rohatgi, J.R. Davis, R.H. Hopkins, P. Rai-Choudhury, P.G. McMullin, „Effect of titanium, copper and iron on silicon solar cells“, Solid-State Electron., **23**, S. 415-422, 1980.
- [21] D.H. Neuhaus, A. Münzer, „Industrial silicon wafer solar cells“, Adv. Optoelectron., **2007**, ID 24521, S. 1-15, 2007.
- [22] A. Rohatgi, J.R. Davis, R.H. Hopkins, P.G. McMullin, „A study of grown-in impurities in silicon by deep-level transient spectroscopy“, Solid-State Electron., **26 (11)**, S. 1039-1051, 1983.
- [23] I. Melnyk, E. Wefringhaus, F. Delahaye, G. Vilsmeier, W. Mahler, P. Fath, „High Throughput in-line acidic texturisation and edge isolation: an industrial reality“, Proc. 20th EU PVSEC, Barcelona, 2005, S. 1403-1406.
- [24] H. Haverkamp, A. Dastgheib-Shirazi, B. Raabe, F. Book, G. Hahn, „Minimizing the electrical loss on the front side: development of a selective emitter process from a single diffusion“, Proc. 33rd IEEE PVSC, San Diego, 2008, S. 112-115.
- [25] G. Hahn, „Status of selective emitter technology“, Proc. 25th EU PVSEC / 5th WCPEC, Valencia, 2010, S. 1091-1096.
- [26] D. Kray, K. McIntosh, „Analysis of selective phosphorous laser doping in high-efficiency solar cells“, IEEE Trans. Electron Devices, **56**, S. 1645-1650, 2009.
- [27] T. Lauermann, A. Dastgheib-Shirazi, F. Book, B. Raabe, G. Hahn, H. Haverkamp, D. Habermann, C. Demberger, C. Schmid, „InSECT: an inline selective emitter concept with high efficiencies at competitive process costs improved with inkjet masking technology“, Proc. 24th EU PVSEC, Hamburg, 2009, S. 1767-1770.

- [28] A. Dastgheib-Shirazi, H. Haverkamp, B. Raabe, F. Book, G. Hahn, „Selective emitter for industrial solar cell production: a wet chemical approach using a single side diffusion process“, Proc. 23th EU PVSEC, Valencia, 2008, S. 1197-1199.
- [29] H. Haverkamp, „Kristalline Silizium Solarzellen mit selektiver Emitterstruktur: Entwicklung, Implementierung und Potential einer zukunftsweisenden Technologie“, Dissertaion, Universität Konstanz, 2009.
- [30] F. Book, Dissertation, Universität Konstanz, 2014, wird veröffentlicht.
- [31] C. Sharpe, P. Lilley, C. Elliott, T. Ambridge, „Electrochemical carrier concentration profiling in silicon“, Electron. Lett., **15 (20)**, S. 622-624, 1979.
- [32] C. Leguijt, P. Lölgen, J.A. Eikelboom, A.W. Weeber, F.M. Schuurmana, W.C. Sinke, P.F.A. Alkemade, P.M. Sarroc, C.H.M. Marée, L.A. Verhoef, „Low temperature surface passivation for silicon solar cells“, Sol. Energ. Mat. Sol. Cells, **40 (4)**, S. 297-345, 1996.
- [33] P. Doshi, G.E. Jellison, A. Rohatgi, „Characterization and optimization of absorbing plasma-enhanced chemical vapor deposited antireflection coatings for silicon photovoltaics“, Appl. Opt., **36 (30)**, S. 7826-7837, 1997.
- [34] G.E. Jellison, F.A. Modine, „Optical constants for silicon at 300 and 10 K determined from 1.64 to 4.73 eV by ellipsometry“, J. Appl. Phys., **53**, 3745, 1982.
- [35] M.M. Hilali, S. Sridharan, C. Khadilkar, A. Shaikh, A. Rohatgi, S. Kim, „ Effect of glass frit chemistry on the physical and electrical properties of thick-film Ag contacts for silicon solar cells“, J. Electron. Mater., **35 (11)**, S. 2041-2047, 2006.
- [36] G. Schubert, „Thick film metallisation of crystalline silicon solar cells-mechanisms, models and applications“, Dissertation, Universität Konstanz, 2006.
- [37] Z.G. Li, L. Liang, A.S. Ionkin, B.M. Fish, M.E. Lewittes, L.K. Cheng, K.R. Mikeska, „Microstructural comparison of silicon solar cells front-side Ag contact and the evolution of current conduction mechanisms“, J. Appl. Phys., **110**, 074304, 2011.
- [38] E. Cabrera, S. Olibet, J. Glatz-Reichenbach, R. Kopecek, D. Reinke, G. Schubert, „Experimental evidence of direct contact formation for the current transport in silver thick film metallized silicon emitters“, J. Appl. Phys., **110**, 114511, 2011.
- [39] D. Erath, A. Filipovic, M. Retzlaff, A.K. Goetz, F. Clement, D. Biro, R. Preu, „Advanced screen printing technique for high definition front side metallization of crystalline silicon solar cells“, Sol. Energ. Mat. Sol. Cells, **94**, S. 57-61, 2010.
- [40] M. König, M. Deckelmann, A. Henning, R. Hoenig, F. Clement, M. Hörteis, „Dual screen printing featuring novel framed busbar screen layout and non-contacting Ag busbar paste“, Energy Procedia, **27**, S.510-515, 2012.
- [41] M. Galiazzo, V. Furin, G. Cellere, A. Baccini, „New technologies for improvement of metallization line“, Proc. 24th EU PVSEC, Hamburg, 2009, S. 1502-1505.

- [42] M. Galiazzo, V. Furin, D. Tonini, G. Cellere, A. Baccini, „Double printing of front contact Ag in c-Si solar cells“, Proc. 25th EU PVSEC / 5th WCPEC, Valencia, 2010, S. 2338-2340.
- [43] A. Voltan, W. Tao, D. Tonini, M. Zamuner, M. Martire, O. Borsato, E. Bortoletto, C. Bottosso, X. Wang, Q. Chang, Y. Wang, M. Galiazzo, „Development of a metallization process for a super fine line printing“, Proc. 28th EU PVSEC, Paris, 2013, S. 1890-1893.
- [44] P.J. Holmes, R.G. Loasby, „Handbook of Thick Film Technology“, Electrochemical Publications Ltd, 1976.
- [45] M. Haskard, K. Pitt, „Thick Film Technology and Applications“, Electrochemical Publications Ltd, 1997.
- [46] A. Nguyen, A. Fioramonti, D. Morrissey, H. Efstathiadis, Z. Zhouying, P. Haldar, „Feasibility of improving front metallization lines for photovoltaic devices“, Proc. 34th IEEE PVSC, Philadelphia, 2009, S. 312-315.
- [47] U. Buerkling, „Industrial printed seed-layer for front side metallization of crystalline silicon solar cells“, Proc. IS&T NIP, 2013, wird veröffentlicht.
- [48] M. Hörteis, A. Mette, P.L. Richter, F. Fidorra, S.W. Glunz, „Further progress in metal aerosol jet printing for front side metallization of silicon solar cells“, Proc. 22nd EU PVSEC, Milan, 2007, S. 1039-1042.
- [49] C.E. Dubé, R.C. Gonsiorawski, „Improved contact metallization for high efficiency EFG polysilicon solar cells“, Proc. 21st IEEE PVSC, Kissimmee, 1990, S. 624-628.
- [50] F. Huster, „Investigation of the alloying process of screen printed aluminium pastes for the BSF formation on silicon solar cells“, Proc. 20th EU PVSEC, Barcelona, 2005, S. 1466-1469.
- [51] F. Huster, G. Schubert, „ECV doping profile measurements of aluminium alloyed back surface fields“, Proc. 20th EU PVSEC, Barcelona, 2005, S. 1462-1465.
- [52] P. Lölgen, „Surface and volume recombination in silicon solar cells“, Dissertation, Universität Utrecht, 1995.
- [53] J.H. Bultman, D.W.K. Eikelboom, R. Kinderman, A.C. Tip, C.J.J. Tool, M.A.C.J. van den Nieuwenhof, C. Schoofs, F.M. Schuurmans, A.W. Weeber, „Fast and easy single step module assembly for back-contacted c-Si solar cells with conductive adhesives“, Proc. 3rd WCPEC, Osaka, 2003, S. 979-982.
- [54] P. Schmitt, D. Eberlein, C.N. Ebert, M. Tranitz, U. Eitner, H. Wirth, „Adhesion of Al-metallization in ultra-sonic soldering on the Al-rear side of solar cells“, Energy Procedia, **38**, S. 380-386, 2013.
- [55] H. von Campe, S. Huber, S. Meyer, S. Reiff, J. Vietor, „Direct tin-coating of the aluminum rear contact by ultrasonic soldering“, Proc. 27th EU PVSEC, 2012, Frankfurt, S. 1150-1153.

- [56] V. Jung, F. Heinemeyer, M. Köntges, „Long-term stable encapsulated solder joints on an Al/Ni:V/Ag metallization for silicon solar cells“, *Energy Procedia*, **21**, S. 84-91, 2011.
- [57] S.M. Dasari, P. Srivastav, R. Shaw, S. Saravanan, P. Suratkar, „Optimization of cell to module conversion loss by reducing the resistive losses“, *Renewable Energy*, **50**, S. 82-85, 2013.
- [58] CAD Zeichnungen wurden von Axel Herguth erstellt.
- [59] [http://www2.dupont.com/Photovoltaics/en\\_US/assets/downloads/pdf/V5200\\_-\\_Encapsulant.pdf](http://www2.dupont.com/Photovoltaics/en_US/assets/downloads/pdf/V5200_-_Encapsulant.pdf), 18.02.2013.
- [60] N.P. Harder, U. Blieske, M. Neander, D. Neumann, E. Mahé, P. Mogensen, „Evaluation of anti-reflection coatings on cover glasses for solar modules: getting down to the nitty gritty“, *Proc. 21th IEEE PVSC, Lake Buana Vista, 2005*, S. 1792-1795.
- [61] K.R. McIntosh, J.N. Cotsell, J.S. Cumpston, A.W. Norris, N.E. Powell, B.M. Ketola, „An optical comparison of silicone and EVA encapsulants for conventional silicon pv modules: a ray tracing study“, *Proc. 34th IEEE PVSC, Philadelphia, 2009*, S. 544-549.
- [62] A.W. Blakers, „Shading losses of solar-cell metal grids“, *J. Appl. Phys.*, **71**, 5237, 1992.
- [63] D.S.H. Chan, J.C.H. Phang, „Analytical methods for the extraction of solar cell single-and double-diode model parameters from IV characteristics“, *IEEE Trans. Electron Devices*, **34 (2)**, S. 286-293, 1987.
- [64] P. Würfel, „Physik der Solarzellen“, Spektrum Akademischer Verlag, 2000.
- [65] J. Beier, B. Voß, „Humps in dark IV-curves-analysis and explanation“, *Proc. 23rd IEEE PVSC, Louisville, 1993*, S. 321-326.
- [66] A.S.H. van der Heide, A. Schönecker, J.H. Bultmann, W.C. Sinke, „Explanation of high solar cell diode factors by nonuniform contact resistance“, *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, **13**, S. 3-16, 2005.
- [67] S. Bowden, A. Rohatgi, „Rapid and accurate determination of series resistance and fill factor losses in industrial silicon solar cells, *Proc. 21th EU PVSEC, München, 2001*, S. 1802-1806.
- [68] M. Wolf, H. Rauschenbach, „Series resistance effects on solar cell measurements“, *Advanced Energy Conversion*, **3**, S.455-479, 1963.
- [69] P.O. Grabitz, U. Rau, J.H. Werner, „Modelling of spatially inhomogeneous solar cells by multi-diode approach“, *Phys. Status Solidi*, **202 (15)**, S. 2920-2927, 2005.
- [70] M.P. Godlewski, C.R. Baraona, H.W. Brandhorst, „Low-high junction theory applied to solar cells“, *Proc. 10th IEEE PVSC, Palo Alto, 1973* S. 40-48.

- [71] G. Micard, G. Hahn, „Discussion and simulation about the evaluation of the emitter series resistance“, Proc. 28th EU PVSEC, Paris, 2013, S. 815-821.
- [72] H. Mäckel, G. Micard, K. Varner, „Analytical models for the series resistance of selective emitters in silicon solar cells including the effect of busbars“, Prog. Photovolt: Res. Appl., 2014, online: DOI: 10.1002/pip.2403, im Druck.
- [73] A. Mette, „New concepts for front side metallization of industrial silicon solar cells“, Dissertation, Universität Freiburg, 2007.
- [74] L.J. Caballero, P. Sánchez-Friera, B. Laguna, J. Alonso, M.A. Vázquez, „Series resistance modelling of industrial screen-printed monocrystalline silicon solar cells and modules including the effect of spot soldering“, Proc. 4th WCPEC, Waikoloa, 2006, S. 1388-1391.
- [75] <http://www.pdesolutions.com/>, 24.11.2013.
- [76] B. Tjahjono, H. Haverkamp, V. Wu, H.T. Anditsch, W.-H. Jung, J. Cheng, J. Ting, M.J. Yang, D. Habermann, T. Sziptalak, C. Buchner, C. Schmid, B. Beilby, K.-C. Hsu, „Optimizing selective emitter technology in one year of full scale production“, Proc. 26th EU PVSEC, Hamburg, 2011, S. 901-905.
- [77] <http://www.ise.fraunhofer.de/de/servicebereiche/callab>, 24.11.2013.
- [78] W. Meissner, „Thermische und elektrische Leitfähigkeit einiger Metalle zwischen 20 und 373<sup>Å</sup> abs“, Annalen der Physik, **352 (16)**, S.1001-1058, 1915.
- [79] K.J. Bathe, „Finite-Elemente-Methoden“, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2002.
- [80] K. Krauß, F. Fertig, S. Rein, „Recombination and microstructural properties of soldering pads and their impact on solar cell performance“, Energy Procedia, **38**, S. 760-769, 2013.
- [81] F. Clement, M. Menkoe, T. Kubera, C. Harmel, R. Hoenig, W. Wolke, H. Wirth, D. Biro, R. Preu, „Industrially feasible multi-crystalline metal wrap through (MWT) silicon solar cells exceeding 16 % efficiency“, Sol. Energ. Mat. Sol. Cells, **93 (6-7)**, S. 1051-1055, 2009.
- [82] S. Braun, G. Micard, G. Hahn, „Solar cell improvement by using a multi-busbar design as front electrode“, Energy Procedia, **27**, S. 227-233, 2012.
- [83] C. Koch, M. Kutzer, „Influence of optimized solar cell interconnection on the performance of PV modules“, Proc. 26th EU PVSEC, Hamburg, 2011, S. 3397-3399.
- [84] J. Gjessing, E.S. Marstein, „Optical performance of solar modules“, Energy Procedia, **38**, S. 348-354, 2013.
- [85] H. Holst, M. Winter, M.R. Vogt, K. Bothe, M. Köntges, R. Brendel, P.P. Altermatt, „Application of a new ray tracing framework to the analysis of extended regions in Si solar cell modules“, Energy Procedia, **38**, S. 83-93, 2013.

- [86] H. Hannebauer, T. Dullweber, T. Falcon, R. Brendel, „Fineline printing options for high efficiencies and low Ag paste consumption“, *Energy Procedia*, **38**, S. 725-731, 2013.
- [87] C.-M. Chen, Y.-C. Liao, W.-M. Su, P.-S. Huang, L.-W. Chen, „Front-side metallization with high aspect ratio by stencil printing for crystal Si solar cell“, *Proc. 39th IEEE PVSC, Tampa, 2013*, wird veröffentlicht.
- [88] T. Falcon, „Ultra fine line frontside metallisation on crystalline silicon solar cells by screen & stencil printing“, *Proc. 26th EU PVSEC, Hamburg, 2011*, S. 1686-1690.
- [89] J. Hanoka, „An improved method of fabricating contacts for solar cells“, Patent, WO1989012321 A1, 1989.
- [90] J. Specht, K. Zengerle, M. Pospischil, D. Erath, J. Haunschild, F. Clement, D. Biro, „High aspect ratio front contacts by single step dispensing of metal pastes“, *Proc. 25th EU PVSEC / 5th WCPEC, Valencia, 2010*, S. 1867-1870.
- [91] M. Pospischil, K. Zengerle, J. Specht, G. Birkle, P. Koltay, R. Zengerle, A. Henning, M. Neidert, C. Mohr, F. Clement, D. Biro, „Investigations of thick-film-paste rheology for dispensing applications“, *Energy Procedia*, **8**, S. 449-454, 2011.
- [92] M. Pospischil, J. Specht, H. Gentscher, M. König, M. Hörteis, C. Mohr, R. Zengerle, F. Clement, D. Biro, „Correlations between finger geometry and dispensing paste rheology“, *Proc. 27th EU PVSEC, Frankfurt, 2012*, S. 1773-1776.
- [93] M. Pospischil, M. Klawitter, M. Kuchler, J. Specht, H. Gentscher, R. Efinger, C. Kroner, M. Luegmair, M. König, M. Hörteis, C. Mohr, L. Wende, J. Lossen, M. Weiß, O. Doll, I. Koehler, R. Zengerle, F. Clement, D. Biro, „Process development for a high-throughput fine line metallization approach based on dispensing technology“, *Proc. 4th Workshop on Metallization for Crystalline Silicon Solar Cells, 2013*, wird veröffentlicht.
- [94] T. Fellmeth, A. Born, A. Kimmerle, F. Clement, D. Biro, R. Preu, „Recombination at metal-emitter interfaces of front contact technologies for highly efficient silicon solar cells“, *Energy Procedia*, **8**, S. 115-121, 2011.
- [95] M. Hörteis, J. Bartsch, V. Radtke, A. Filipovic, S.W. Glunz, „Different aspects of seed layer-printed and light-induced plated front side contacts“, *Proc. 24th EU PVSEC, Hamburg, 2009*, S. 985-988.
- [96] S. Braun, R. Nissler, C. Ebert, D. Habermann, G. Hahn, „High efficiency multi-busbar solar cells and modules“, *IEEE Journal of Photovoltaics*, **4(1)**, S.148-153, 2014.
- [97] W.O Rogers, „Method for enhancing the solderability of nickel layers“, Patent, US4603805 A, 1986.
- [98] U.A. Ebong, M. Taouk, S. Wenham, „A low cost metallization scheme for double sided buried contact silicon solar cells“, *Sol. Energ. Mat. Sol. Cells*, **31**, S. 499-507, 1994.

- [99] A. Lennon, Y. Yao, S. Wenham, „Evolution of metal plating for silicon solar cell metallisation“, *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, **21 (7)**, S. 1454-1468, 2013.
- [100] E. Bradley, K. Banerji, „Effect of PCB finish on the reliability and wettability of ball grid array packages“, *IEEE Trans. Comp., Hybrids, Manufact. Technol.*, **19(2)**, S. 320-330, 1996.
- [101] <http://www.finanzen.net/rohstoffe/silberpreis>, 18.02.2014.
- [102] <http://www.finanzen.net/rohstoffe/nickelpreis>, 18.02.2014.
- [103] N. Kanani, „Chemische Vernicklung: Nickel-Phosphor Schichten: Herstellung, Eigenschaften, Anwendungen“, 1. Aufl., E. Leuze Verlag, 2007.
- [104] L.M. Abrantes, J.P. Correia, „On the mechanism of electroless Ni-P plating“, *J. Electrochem. Soc.*, **141**, S. 2356-2360, 1994.
- [105] J. Flis, D.J. Duquette, „Initiation of electroless nickel plating on copper, palladium-activated copper, gold, and platinum“, *J. Electrochem. Soc.*, **131 (2)**, S. 254-260, 1984.
- [106] C. Boulord, „Développement de techniques de métallisation innovantes pour cellules photovoltaïques à haut rendement“, Dissertation, Universität Lyon, 2011.
- [107] D.R. Lide, „CRC Handbook of chemistry & physics“, 85. Aufl., CRC Press, 2004.
- [108] K.S. Rajam, I. Rajagopal, R.S. Rajagopalan, „Electroless nickel deposition from triethanolamine baths. Part I. Bath characteristics.“, *Metal Finishing*, **88 (10)**, S. 41-45, 1990.
- [109] K. Hari Krishnan, S. John, K.N. Srinivasan, J. Praveen, M. Ganesan, P.M. Kavimani, „An overall aspect of electroless Ni-P depositions - a review article“, *Metall. Mater. Trans. A*, **37 (6)**, S. 1917-1926, 2006.
- [110] F.C. Walsh, M.E. Herron, „Electrocrystallization and electrochemical control of crystal growth: fundamental considerations and electrodeposition of metals“, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **24 (2)**, S. 217-225, 1991.
- [111] J.A.D. Jensen, P. Møller, T. Bruton, N. Mason, R. Russell, J. Hadley, P. Verhoeven, A. Matthewson, „Electrochemical deposition of buried contacts in high-efficiency crystalline silicon photovoltaic cells“, *J. Electrochem. Soc.*, **150 (1)**, G49-G57, 2003.
- [112] L. Durkee, „Method of plating by means of light“, Patent, US4144139 A, 1979.
- [113] T. Barnard, D. Crea, P. Nath, „Method of electro-coating a semiconductor device“, Patent, US4507181 A, 1984.
- [114] M.A. Green, „Solar cells: operating principles, technology, and system applications“, Prentice-Hall, 1982.
- [115] J. Bartsch, „Advanced front side metallizaion for crystalline silicon solar cells with electrochemical techniques“, Dissertation, Universität Freiburg 2011.

- [116] J. Bartsch, V. Radke, C. Schletter, S.W. Glunz, „Electrochemical methods to analyse the light-induced plating process“, *J. Appl. Electrochem.*, **40**, S. 757-765, 2010.
- [117] J. Bartsch, V. Radke, C. Savio, S.W. Glunz, „Progress in understanding the current paths and deposition mechanisms of light-induced plating and implications for the process“, *Proc. 24th EU PVSEC, Hamburg*, 2009, S. 1469-1474.
- [118] N. Bay, V. Radtke, M. Alemà, J. Bartsch, S.W. Glunz, „Electrolytic nickel deposition for the front side metallization of silicon solar cells“, *Proc. 24th, EU PVSEC, Hamburg*, 2009, S. 1434-1436.
- [119] A. Ibàñez, R. Escudero-Cid, P. Ocòn, E. Fatás, „Effect of the pulse plating parameters on the mechanical properties of nickel electrodeposits“, *Surf. Coating Tech.*, **212**, S. 94-100, 2012.
- [120] A. Kraft, L. Ni, A. Kalio, A. Moldovan, J. Bartsch, M. Glatthaar, S.W. Glunz, „Influence of the chemicals used in nickel and copper plating solutions on the adhesion of screen-printed silver contacts“, *Energy Procedia*, **38**, S. 753-759, 2013.
- [121] M.D. Wendling, A. Mondon, A. Karft, J. Bartsch, J. Bartscha, M. Glatthaar, S.W. Glunz, „Analysis of chemical stability of printing pastes in electrochemical plating solutions“, *Energy Procedia*, **38**, 497-502, 2013.
- [122] J. Junge, „High efficiency process development for defect-rich silicon wafer materials“, *Dissertation, Universität Konstanz*, 2012.
- [123] A. Rodofili, A. Fell, S. Hopman, K. Mayer, G.P. Willeke, D. Kray, S.W. Glunz, „Local p-type back surface fields via laser chemical processing (LCP): first experiments“, *Proc. 23rd EU PVSEC, Valencia*, 2008, S. 1808-1811.
- [124] D. Kray, N. Bay, G. Cimiotti, S. Kleinschmidt, N. Kösterke, A. Lösel, O. Lühn, M. Sailer, A. Träger, H. Kühnlein, H. Nussbaumer, A. Fell, C. Fleischmann, S. Hopman, K. Mayer, M. Mesec, A. Rodofili, F. Granek, S.W. Glunz, E. Müller, P. Sempere, A. Pauchard, B. Richerzhagen, „High-efficiency large area industrial LCP selective emitter solar cells ready for production“, *Proc. 25th EU PVSEC / 5th WCPEC, Valencia*, 2010, S. 1896-1898.
- [125] A. Focsa, G. Poulain, D. Blanc, L. Couvreur, T. Nychyporuk, C. Boulord, M. Gauthier, N. Le Quang, M. Lemiti, „Electrochemical Ni/Ag front side metallization of multi-crystalline solar cells after laser ablation of SiN<sub>x</sub>:H“, *Proc. 27th EU PVSEC, Frankfurt*, 2012, S. 1655-1659.
- [126] G. Heinrich, M. Bähr, K. Stolberg, T. Wütherich, M. Leonhardt, A. Lawerenz, „Investigation of ablation mechanisms for selective laser ablation of silicon nitride layers“, *Energy Procedia*, **8**, S. 592-597, 2011.
- [127] A. Knorz, M. Peters, A. Grohe, C. Harmel, R. Preu, „Selective laser ablation of SiN<sub>x</sub> layers on textured surfaces for low temperature front side metallizations“, *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, **17**, S. 127-136, 2009.

- [128] J. Engelhardt, „Schadenfreies Ablatieren von dielektrischen Schichten auf kristallinen Silizium-Scheiben“, Masterarbeit, Universität Konstanz, 2012.
- [129] A. Knorz, „Entwicklung und Charakterisierung strukturierender Laserverfahren für die Herstellung kristalliner Silizium-Solarzellen“, Dissertation, Universität Konstanz, 2012.
- [130] J.W. Mayer, S.S. Lau, „Electronic material science: for integrated circuits in Si and GaAs“, Macmillan Publishing, New York, 1990.
- [131] K. Tu, J.W. Mayer, L.C. Feldmann, „Electronic thin film science: for electrical engineers and material scientists“, Macmillan Publishing, New York, 1990.
- [132] E.H. Rhoderrick, R.H. Williams, „Metal-semiconductor contacts“, 2. Aufl., Oxford University Press, 1988.
- [133] A. Mondon, M.N. Jawaid, J. Bartsch, M. Glatthaar, S.W. Glunz, „Microstructure analysis of the interface situation and adhesion of thermally formed nickel silicide for plated nickel-copper contacts on silicon solar cells“, *Sol. Energ. Mat. Sol. Cells*, **117**, S. 209-213, 2013.
- [134] A. Paul, „Growth mechanism of phases, kirkendall voids, marker plane position, and indication of the relative mobilities of the species in the interdiffusion zone“, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, **22**, S. 833-837, 2011.
- [135] J. Foggiato, W. Sik Yoo, M. Ouaknine, T. Murakami, T. Fukada, „Optimizing the formation of nickel silicide“, *Mater. Sci. Eng. B*, **114-115**, S. 56-60, 2004.
- [136] K. Weinberg, T. Böhme, W.H. Müller, „Kirkendall voids in the intermetallic layers of solder joints in MEMS“, *Comput. Mater. Sci.*, **45 (3)**, S. 827-831, 2009.
- [137] J.A.D. Jensen, P. Møller, T. Bruton, N. Mason, R. Russell, J. Hadley, P. Verhoeven, A. Matthewson, „Electrochemical deposition of buried contacts in high-efficiency crystalline silicon photovoltaic cells“, *J. Electrochem. Soc.*, **150 (1)**, G49-G57, 2003.
- [138] L. Tous, D.H. van Dorp, J.-L. Hernandez, C. Allebe, M. Ngamo, H. Bender, J. Meersschaut, M. Alemàn, R. Russell, J. Poortmans, R. Mertens, „Minimizing junction damage associated with nickel silicide formation for the front side metallization of silicon solar cells“, *Proc. 26th EU PVSEC*, Hamburg, 2011, S. 1210-1215.
- [139] A. Karpour, S.R. Wenham, „A study into the formation and characterization of electroless nickel silicide for laser doped solar cells“, *Proc. 35th IEEE PVSC*, Honolulu, 2010, S. 1406-1409.
- [140] M. Rauer, A. Mondon, C. Schmiga, J. Bartsch, M. Glatthaar, S.W. Glunz, „Nickel-plated front contacts for front and rear emitter silicon solar cells“, *Energy Procedia*, **38**, S. 449-458, 2013.
- [141] D.K. Schroder, „Semiconductor material and device characterization“, 3te Aufl., John Wiley & Sons, 2006.

- [142] A.M. Goodman, „Metal-semiconductor barrier height measurement by the differential capacitance method-one carrier system“, J. Appl. Phys., **34**, S. 329-338, 1963.
- [143] C.A. Mead, „Metal-semiconductor surface barriers“, Solid-State Electron., **9**, S. 1023-1033, 1966.
- [144] W. Mönch, „Metal-semiconductor contacts: electronic properties“, Surf. Sci., **299/300**, S. 928-944, 1994.
- [145] G.S. May, S.M. Sze, „Fundamentals of semiconductor fabrication“ , John Wiley & Sons, 2007.
- [146] J. Andrews, „The role of the metal-semiconductor interface in silicon integrated circuit technology“, J. Vac. Sci. Technol, **11 (6)**, S. 972-984, 1974.
- [147] L. Tous, M. Recaman-Payo, M. Ngamo, J.L. Hernandez, J. Poortmans, R. Mertens, „Evaluation contact resistance using epitaxially grown phosphorous emitters“, Proc. 26th EU PVSEC, Hamburg, 2011, S. 1413-1417.
- [148] N. Stavitski, M.J.H. van Dal, A. Lauwers, C. Vrancken, A.Y. Kovalgin, R.A.M. Wolters, „Systematic TLM measurements of NiSi and PtSi specific contact resistance to n- and p-type Si in a broad doping range“, IEEE Electron Device Lett., **29 (4)**, S. 378-381, 2008.
- [149] S. Braun, E. Emre, B. Raabe, G. Hahn, „Electroless nickel and copper metallization: contact formation on crystalline silicon and background plating behavior on PECVD silicon SiN<sub>x</sub>:H layers“, Proc. 25th EU PVSEC / 5th WCPEC, Valencia, 2010, S. 1892-1895.
- [150] P. Saint-Cast, F. Tanay, M. Alemàn, C. Reichel, J. Bartsch, M. Hofmann, J. Rentsch, R. Preu, „Relevant pinhole characterisation methods for dielectric layers for silicon solar cells“, Proc. 24th EU PVSEC, Hamburg, 2009, S. 2084-2087.
- [151] A. Schulz, E. Häberle, M. Walker, U. Stroth, „Detection and identification of pinholes in PECVD thin film barrier coatings“, Proc. 25th EU PVSEC / 5th WCPEC, Valencia, 2010, S.650-653.
- [152] A.A. Istratov, E.R Weber, „Electrical properties and recombination activity of copper, nickel and cobalt in silicon“, Appl. Phys. A-Mater., **66 (2)**, S. 123-136, 1998.
- [153] U.A. Ebong, C. Honsberg, S.R. Wenham, M.A. Green, „Mechanically grooved, double sided, buried contact silicon solar cells“, Renewable Energy, **11 (3)**, S. 331-340, 1997.
- [154] J. Bartsch, A. Mondon, C. Schetter, M. Hörteis, S.W. Glunz, „Copper as conducting layer in advanced front side metallization processes for crystalline silicon solar cells, exceeding 20% on printed seed layers“, Proc. 35th IEEE PVSC, Honolulu, 2010, S. 1299-1303.

- [155] H. Dong, R. Barr, P. Hinkley, „Inkjet plating resist for improved cell efficiency“, Proc. 35th IEEE PVSC, Honolulu, 2010, S. 2142-2146.
- [156] J.N. Ximello Quiebras, H. Haverkamp, G. Hahn, „A new KOH-etch solution to produce a random pyramid texture on monocrystalline silicon at elevated process temperatures and shortened process times“, Proc. 24th EU PVSEC, Hamburg, 2009, S. 1958-1960.
- [157] J. Orloff, M. Utlaut, L. Swanson, „High resolution focused ion beams: FIB and its applications“, New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2003.
- [158] B.K. Agarwal, „X-ray spectroscopy: an introduction“, 2te Aufl., Springer, 1991.
- [159] S. Braun, A. Zuschlag, B. Raabe, G. Hahn, „The origin of background plating“, Energy Procedia, **8**, S. 565-570, 2011.
- [160] air mass 1.5, genormtes Spektrum der Sonnenstrahlung nach IEC 60904-3.
- [161] T. Fuyuki, H. Kondo, T. Yamazaki, Y. Takahashi, Y. Uraoka, „Photographic surveying of minority carrier diffusion length in polycrystalline silicon solar cells by electroluminescence“, Appl. Phys. Lett., **86**, 262108, 2005.
- [162] J. Giesecke, „Messung von Minoritätsladungsträger-Diffusionslängen in Silicium-Solarzellen mit Lumineszenzmethoden“, Diplomarbeit, Universität Konstanz, 2008.
- [163] D. Kiliani, „Aufbau eines Lumineszenz-Messplatzes zur Charakterisierung von Solarzellen“, Diplomarbeit, Universität Konstanz, 2009.
- [164] B. Steuer, „Aufbau eines Photolumineszenz-Messplatzes zur Charakterisierung von Wafern und Solarzellen aus kristallinem Silizium“, Diplomarbeit, Universität Konstanz, 2011.
- [165] D. Hinken, K. Ramspeck, K. Bothe, B. Fischer, R. Brendel, „Series resistance imaging of solar cells by voltage dependent electroluminescence“, Appl. Phys. Lett., **91**, 182104, 2007.
- [166] K. Ramspeck, K. Bothe, B. Fischer, J. Schmidt, R. Brendel, „Recombination current and series resistance imaging of solar cells by combined luminescence and lock-in thermography“, Appl. Phys. Lett., **90**, 153502, 2007.
- [167] R. Grischke, V. Tarasenko, V. Nebusov, B.B. Sadlik, L. Rubin, „Novel contact probes for characterization of crystalline silicon solar cells with and without busbars“, Proc. 26th EU PVSEC, 2011, Hamburg, S. 1558-1562.
- [168] D. Bätzner, L. Andreetta, W. Frammelsberger, D. Lachenal, J. Meixenberger, P. Papet, G. Wahli, J. Krause, E. Vetter, B. Strahm, T. Söderström, N. Bassi, P. Volluz, J. Levrat, A. Faes, M. Despeisse, „Smartwire connection technology“, Proc. 23rd Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells & Modules: Material and Processes, 2013, S. 42-49.

- [169] S. Braun, A. Herguth, G. Hahn, „Vorrichtung zur nicht-permanenten elektrischen Kontaktierung von Solarzellen zur Messung elektrischer Eigenschaften“, Patentanmeldung DE 10 2012 017 564.7 (2012), PCT/EP 2013/068255.
- [170] A. Herguth, S. Braun, G. Hahn, C. Pönisch, R. Nissler „Towards non-permanent contacting schemes for busbar-free solar cells“, Proc. 28th EU PVSEC, Paris, 2013, S. 846-850.
- [171] B. Sadlik, L. Rubin, V. Nebusov, „Day4<sup>TM</sup> technology for conceptually new PV module production“, Proc. 25th EU PVSEC, 2010 / 5th WCPEC, S. 4144-4147.
- [172] P. Papet, R. Efinger, B. Sadlik, Y. Andrault, D. Bätzner, D. Lachenal, B. Strahm, G. Wahli, F. Wuensch, W. Frammelsberger, W. Stein, L. Rubin, W. Schmutz, A. Buechel, B. Rau, „19% efficiency module based on Roth & Rau heterojunction solar cells and Day4<sup>TM</sup> energy module concept“, Proc. 26th EU PVSEC, 2011, S. 3336-3339.
- [173] [http://www.halm.de/fileadmin/downloads/cetisPV-XF2-Z\\_01.pdf](http://www.halm.de/fileadmin/downloads/cetisPV-XF2-Z_01.pdf), 18.02.2014.
- [174] H.A. Ossenbrink, W. Zaaiman, J. Bishop, „Do multi-flash solar simulators measure the wrong fillfactor?“, Proc. 23rd IEEE PVSC, Louisville, 1993, S. 1194-1196.
- [175] W.M. Keogh, „Accurate performance measurement of silicon solar cells“, Dissertation, The Australian National University, 2001.
- [176] [http://www2.dupont.com/Tedlar\\_PVF\\_Film/en\\_US/](http://www2.dupont.com/Tedlar_PVF_Film/en_US/), 25.01.2014.
- [177] A. Luque, S. Hegedus, „Handbook of Photovoltaic Science and Engineering“, John Wiley & Sons, 2003.
- [178] M. Köntges, I. Kunze, S. Kajari-Schröder, X. Breitenmoser, B. Bjørneklett, „Quantifying the risk of power loss in PV modules due to micro cracks“, Proc. 26th EU PVSEC, Valencia, 2010, S. 3745-3752.
- [179] S. Braun, G. Hahn, R. Nissler, C. Pönisch, D. Habermann, „Multi-busbar solar cells and modules: high efficiencies and low silver consumption“, Energy Procedia, **38**, S. 334-339, 2013.
- [180] J.H. Wohlgemuth, „Standards for PV modules and components-recent developments and challenges“, Proc. 27th EU PVSEC, 2012, S. 2976-2980.
- [181] K.C. Fong, K.R. McIntosh, A.W. Blakers, „Accurate series resistance measurement of solar cells“, Prog. Photovolt: Res. Appl., **21 (4)**, S. 490-499, 2013.
- [182] M. Edwards, R. Evans, T. Söderström, A. Sugianto, L. Koschier, S. Wenham, „High efficiency with almost no metallisation: multiple busbar wire interconnection of plated solar cells“, Proc. 28th EU PVSEC, Paris, 2013, S. 2097-2102.

- [183] M. Edwards, J. Ji, A. Sugianto, T. Söderström, R. Griske, L. Koschie, R. Evans, A. Lennon, N. Nampalli, S. Wenham, „High efficiency at module level with almost no cell metallisation: multiple wire interconnection of reduced metal solar cells“, Proc. 39th IEEE PVSC, Tampa, wird veröffentlicht.
- [184] K. Hashimoto, M. Ouchi, N. Nakamura, E. Kobayashi, Y. Watabe, „Low cost module with heterojunction solar cells applied gravure offset printing and multi-wire technologies“, Proc. 28th EU PVSEC, Paris, S. 1998-2000, 2013.
- [185] A.R. Burgers, „How to design optimal metallization patterns for solar cells“, Prog. Photovolt: Res. Appl., 7, S. 456-461, 1999.
- [186] J. Wong, „Griddler: intelligent computer aided design of complex solar cell metallization patterns“, Proc. 39th IEEE PVSC, Tampa, 2013, wird veröffentlicht.
- [187] S. Braun, R. Nissler, D. Habermann, G. Hahn, „Highly efficient multi-busbar solar cells with Ag nano-particle front side metallization“, Proc. 28th EU PVSEC, Paris, 2013, S. 1148-1151.

# Publikationsliste

- **S. Braun**, B. Raabe, D. Kohler, S. Seren, G. Hahn, „Comparison of buried contact- and screen printed 100% UMG solar cells resulting in 16.2% efficiency“, Proc. 24th EU PVSEC, Hamburg, 2009, S. 1736-1739.
- D. Kohler, B. Raabe, **S. Braun**, S. Seren, G. Hahn, „Upgraded metallurgical grade silicon solar cells: a detailed material analysis“, Proc. 24th EU PVSEC, Hamburg, 2009, S. 1758-1761.
- F. Book, **S. Braun**, A. Herguth, A. Dastgheib-Shirazi, B. Raabe, G. Hahn, „The etchback selective emitter technology and its application to multicrystalline silicon“, Proc. 35th IEEE PVSC, Honolulu, 2010, S. 1309-1314.
- **S. Braun**, E. Emre, B. Raabe, G. Hahn, „Electroless nickel and copper metallization: contact formation on crystalline silicon and background plating behavior on PECVD SiN<sub>x</sub>:H layers“, Proc. 25th EU PVSEC / 5th WCPEC, Valencia, 2010, S. 1892-1895.
- **S. Braun**, A. Zuschlag, B. Raabe, G. Hahn, „The origin of background plating“, Energy Procedia, **8**, S. 565-570, 2011.
- **S. Braun**, G. Micard, G. Hahn, „Solar cell improvement by using a multi-busbar design as front electrode“, Energy Procedia, **27**, S. 227-233, 2012.
- S. Seren, **S. Braun**, Y. Schiele, G. Hahn, B. Terheiden, „Nickel plating on p+ silicon - a characterization of contact resistivity and line resistance“, Proc. 27th EU PVSEC, Frankfurt, 2012, S. 1777-1780.
- E. Emre, **S. Braun**, G. Hahn, „The corrosive effects of alkaline nickel-phosphorus plating on crystalline silicon“, Proc. 27th EU PVSEC, Frankfurt, S. 1733-1738, 2012.
- **S. Braun**, A. Herguth, G. Micard, G. Hahn, R. Nissler, C. Ebert, C. Poenisch, H. Haverkamp, D. Habermann, „Multi-busbar approaches for solar cell and module optimization“, Proc. 22nd Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells & Modules: Materials and Processes, Vail, 2012, S.18-26.
- **S. Braun**, G. Hahn, R. Nissler, C. Pönisch, D. Habermann, „Multi-busbar solar cells and modules: high efficiencies and low silver consumption“, Energy Procedia, **38**, S. 334-339, 2013.
- **S. Braun**, G. Hahn, R. Nissler, C. Pönisch, D. Habermann, „The multi-busbar design: an overview“, Energy Procedia, **43**, S. 86-92, 2013.
- **S. Braun**, R. Nissler, C. Ebert, D. Habermann, G. Hahn, „High efficiency multi-busbar solar cells and modules“, J. Photovolt., **4(1)**, S. 148-153, 2013.

- A. Herguth, **S. Braun**, G. Hahn, C. Pönisch, R. Nissler, „Towards non-permanent contacting schemes for busbar-free solar cells“, Proc. 28th EU PVSEC, Paris, 2013, S. 846-850.
- **S. Braun**, R. Nissler, D. Habermann, G. Hahn, „Highly efficient multi-busbar solar cells with Ag nano-particle front side metallization“, Proc. 28th EU PVSEC, Paris, 2013, S. 1148-1151.

# Patente

- B. Raabe, S. Braun, G. Hahn, „Nickelhaltige und ätzende druckbare Paste sowie Verfahren zur Bildung von elektrischen Kontakten beim Herstellen einer Solarzelle“, DE 102011016335 B4, 2011.
- S. Braun, A. Herguth, G. Hahn, „Vorrichtung zur nicht-permanenten elektrischen Kontaktierung von Solarzellen zur Messung elektrischer Eigenschaften“, Patentanmeldung DE 10 2012 017 564.7 (2012), PCT/EP 2013/068255.



# Danksagung

Zum Schluß dieser Arbeit möchte ich mich bei all denen bedanken, die mich in den letzten Jahren unterstützt haben. Ohne Sie wäre diese Doktorarbeit nicht möglich gewesen. Insbesondere möchte ich folgenden Personen meinen Dank aussprechen:

Prof. Dr. Giso Hahn, der mir durch die Aufnahme in seine Arbeitsgruppe diese Promotion ermöglicht hat. Für seine Betreuung und dafür, dass er stets ein offenes Ohr für sämtliche Anliegen hatte.

Prof. Dr. Johannes Boneberg für die Übernahme der Zweitkorrektur dieser Arbeit.

Annika Zuschlag, Axel Herguth und Gabriel Micard für die hervorragende Zusammenarbeit während der gemeinsamen Projekte und für ihre Bereitschaft zu helfen wenn Not am Mann war und mal wieder alles ganz schnell gehen musste.

Erkan Emre für sein Engagement während der Bachelor- und Masterarbeit. Jojo und Eric, meinen Praktikanten, für ihren Einsatz beim Optimieren von Sinter- und Plattierprozessen, und Tom, der mir bei zahlreichen Experimenten zu Seite stand.

Der Firma Gebrüder Schmid GmbH, die das finanzielle Grundgerüst für diese Arbeit lieferte.

Den Mitarbeitern der Firma Gebrüder Schmid GmbH, ohne ihre Unterstützung wäre es nicht möglich gewesen, diese Fülle an Experimenten durchzuführen.

Der Firma DOW Chemical für die Leihgabe der Plattierbecken und besonders Wolfgang Braun und Axel Hoffmann für Ihre Unterstützung beim Thema Plattieren.

Den Kollegen anderer Forschungsinstitute, die im gleichen Themengebiet wie ich forschten, für den Wissensaustausch. Besonders Jonas, Andrew, Monica, Caroline und Loic, für die informativen Diskussionen und ihre freundliche und hilfsbereite Art.

Josh Engelhardt, für die Herstellung zahlreicher Plattierproben.

Sabine Groß-Buitenwerf, unserer Sekretärin, die dafür sorgte, dass die Bürokratie von einem ferngehalten wurde.

Sebastian Joos, für die perfekte Instandhaltung der Netzinfrastruktur.

Meinen Bürokollegen Joe, Thomas, Susanne, Patrick und Benjamin, mit denen man nicht nur über die Physik fachsimpeln konnte, sondern die auch stets für ein angeneh-

## Danksagung

---

mes Büroklima gesorgt haben.

All denen, die an der Korrektur dieser Arbeit beteiligt waren. Besonders Jörg, Toni, Felix und Sünje.

Bernd Raabe und Bernhard Herzog für den wissenschaftlichen Austausch und die netten Gespräche beim gemeinsamen Bökessen.

Meinen Arbeitskollegen, für die tolle Arbeitsatmosphäre und die gute Zusammenarbeit.

Unserem Techniker-Team, das dafür gesorgt hat, dass die Anlagen immer funktionsbereit waren und das die ganzen Abläufe koordiniert hat, die hinter einem reibungslosen Laborbetrieb stehen.

Meinen Eltern, die mir das Studium erst ermöglicht haben und ganz besonders meiner Freundin Sünje, die stets für mich da war und mir mit Rat und Tat zur Seite stand.