



Die Verantwortung für die Inhalte des Dokuments liegt im Bereich der Autoren

# **Gemeinsamer Schlussbericht zum Projekt**

## **„Hocheffiziente kristalline Solarzellen auf Basis der Metal-Wrap-Through Technik“**

**Förderkennzeichen: 03SF0420B**

**- MWT-plus -**

**01.09.2012 - 31.12.2015**

NaMLab gGmbH (Projektkoordination)

Meyer Burger (Germany) AG

Rehm Thermal Systems GmbH

ULT AG

**Fraunhofer Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS**

Fraunhofer Institut für keramische Technologien und Systeme IKTS

Institut für Luft und Kältetechnik ILK gGmbH

# Inhaltsverzeichnis

1. Aufgabenstellung.....	3
2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde .....	3
3. Planung und Ablauf des Vorhabens .....	3
4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde.....	4
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	7
6. Wissenschaftlich technische Ergebnisse .....	8
Vorwort .....	8
Projektphase 1 (09/2012 – 12/2013) .....	8
Projektphase 2 (06/2013 – 12/2014) .....	8
Projektphase 3 (06/2014 – 12/2015) .....	9
Arbeitspaket 1.1: Spezifikationen für Einzelprozesse (NaMLab gGmbH) .....	9
Arbeitspaket 1.2: Laserabtrag und -dotierung .....	11
Themenschwerpunkt 1: Herstellung von Vias in n-dotierten Siliziumwafern.....	11
Themenschwerpunkt 2: Laserdotierung.....	13
Themenschwerpunkt 3: Isolation des a-Si:H-Emitters auf Waferrückseite .....	16
Arbeitspaket 1.3: Entwicklung eines rückseitigen Heteroübergangs.....	18
Arbeitspaket 1.4: Entwicklung einer Frontseitenschicht.....	20
Themenschwerpunkt 1: Dielektrische Passivierungsschichten .....	20
Themenschwerpunkt 2: ZnO Spraypyrolyse .....	22
Arbeitspaket 1.5: Entwicklung neuartiger Metallisierungen.....	24
Themenschwerpunkt 1: Niedertemperatur-Pasten.....	24
Themenschwerpunkt 2: Zellmontage & Modulverschaltung.....	25
Themenschwerpunkt 3: Temperung in inerten Trocknungsatmosphären.....	27
Arbeitspaket 1.6: Abluftreinigung .....	28
Arbeitspaket 2.1: Entwicklung laserdotierter selektiver Emitter (SE) .....	30
Themenschwerpunkt 1: Laserdotierung von Si-Oberflächen .....	30
Themenschwerpunkt 2: Analyse von Laserabrauch .....	32
Arbeitspaket 2.2: Rückkontakt-Heterosolarzelle .....	35
Arbeitspaket 2.3: Low-cost & low-T Metallisierung .....	39
Themenschwerpunkt 1: Entwicklung Metallisierungspasten .....	39
Themenschwerpunkt 2: Modulverschaltung.....	43
Themenschwerpunkt 3: Kennlinienvermessung der MWT-plus Solarzellen .....	44
Arbeitspaket 2.4: Anlagenentwicklung Inertgasofen & Prozessabluftreinigung.....	44
Themenschwerpunkt 1: Entwicklung Intergasofen.....	44
Themenschwerpunkt 2: Reinigung Prozessabluft.....	47
Arbeitspaket 3.1 Spezifikation MWT-plus Konzept.....	50
Arbeitspaket 3.2 Prozessierung der MWT-plus Solarzelle.....	52
Themenschwerpunkt 1: MWT-plus Solarzelle mit a-Si:H Frontseite .....	52
Themenschwerpunkt 2: MWT-plus Solarzelle mit dielektrischer Frontseite.....	55
Arbeitspaket 3.3: Anlagendemonstration Inertgasofen/Laseraerosolbehandlung .....	56
7. Literatur.....	60

## **1. Aufgabenstellung**

Innerhalb des Verbundprojektes wurde ein neuartiges Zellenkonzept erforscht und entwickelt. Dieses Zellenkonzept basiert auf der Kombination eines Heteroübergangs mit einer lokalen Verbindung der Vorderseitenmetallisierung mit der Rückseite durch metallisierte Via-Löcher (MWT = metal wrap through). Dieses Konzept bietet die Möglichkeit einer deutlich erhöhten Leistungsfähigkeit, da die Abschattung der Frontseitenmetallisierung signifikant reduziert werden kann. Dafür sind neuartige Zelldesigns, Materialien und Prozesse notwendig, die zunächst einzeln entwickelt und dann in das Gesamtsystem integriert wurden. Für die Erforschung dieser Materialien und Zelldesigns wurden Methoden angewandt, wie sie aus der Elektronik und Mikroelektronik bekannt sind.

In der Photovoltaikindustrie wird zunehmend Know-How zu Zellenkonzepten und -prozessen von den Anlagenlieferanten erwartet. Durch enge Einbindung von Anlagenzulieferern in dieses Entwicklungsprojekt wird eine langfristige Verwertung in Deutschland angestrebt. Insbesondere wird erwartet, dass technologische Entwicklungen des Verbundes zügig kommerzialisiert werden können, wohingegen der grundlagenorientierte Teil auch eine langfristige Verwertung sicherstellen soll. Mit der im Projekt generierten Kompetenz sowie Anlagen- und Messtechnik wird es möglich sein auch über das Projekt hinaus aktiv an der Erforschung und Entwicklung effizienterer Technologien mitzuwirken und so den Anlagenbauern frühzeitigen Zugriff auf neue Entwicklungen zu geben.

## **2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**

Zu Beginn des Projekts gab es weder Simulationsstudien noch technologische Muster von dem angestrebtem Heteroübergang-MWT (kurz: MWT-plus) Solarzellenkonzept. Das Konsortium musste damit eine Reihe von komplexen Entwicklungsaufgaben zunächst definieren und dann in enger Abstimmung zusammen lösen. Zu diesen Aufgaben gehörten insbesondere neuartige Laserprozesse, Metallisierungs- und Passivierungsstrategien sowie die Weiterentwicklung der Anlagentechnologie für die Prozessierung und Temperung der innovativen Solarzellen einschließlich der Abgasanalytik und –reinigung. Diese umfassende Aufgabenstellung erfordert einen Zusammenschluss von spezialisierten Partnern, die in den jeweiligen Disziplinen eine hohe Expertise aufweisen. Die Zusammenstellung der Projektpartner wurde an dieser Aufgabenstellung ausgerichtet und hat sich während des Projektverlaufes als sehr leistungsstark erwiesen. Alle notwendigen Entwicklungsthemen konnten innerhalb des Konsortiums realisiert werden.

## **3. Planung und Ablauf des Vorhabens**

Das Forschungsvorhaben gliederte sich in drei Phasen. In der ersten Phase wurden innovative Einzelprozesse für die Solarzellenfertigung entwickelt. Diese Prozesse waren zum einen für die Umsetzung des MWT-plus Konzepts notwendig. Zum anderen waren diese Prozesse aber auch in industrieller Standard-Solarzellenfertigung integrierbar, um Kosteneinsparung und/oder Effizienzsteigerung zu erzielen.

In der zweiten Phase wurden die innovativen Einzelprozesse bei den Industriepartnern als Verbesserungen in bestehenden Solarzellenkonzepten getestet. Dies ermöglichte eine separate Bewertung der Entwicklungen in einem eingefahrenen Prozessablauf, noch bevor die einzelnen Neuentwicklungen zum MWT-plus Konzept zusammengeführt wurden.



zentralen Patents im Jahr 2010 verfolgen zahlreiche Unternehmen und Institute die Weiterentwicklung der a-Si/c-Si-Technologie. Innerhalb des EU-Projektes HETSI [ii] konnte eine Heteroübergang-Solarzelle mit 20,7 % Wirkungsgrad demonstriert werden. Meyer Burger (Germany) AG ist einer der führenden Anlagenhersteller für diese Technologie und erzielt auf der industriellen PRIMELINE-Plattform einen Wirkungsgrad von über 20 % auf 156x156 mm<sup>2</sup> Zellen. Trotz dieser Erfolge ist das volle Potential dieser Technologie bei Weitem nicht ausgeschöpft. Als größte Herausforderungen aus technologischer Sicht gelten die optischen und elektrischen Verluste am Frontseitenemitter (a-Si:H und TCO), sowie die Abschattung durch die Frontseitenmetallisierung [iii]. Das MWT-plus Konzept wird diese Verlustprozesse durch ein neues Zellendesign vermeiden.

Als weitere Verbesserungen für die Heteroübergangszelle verfolgen zahlreiche Arbeitsgruppen eine reine Rückseitenzelle (back junction cell), bei der keinerlei Abschattungsverluste auftreten. Auf kristallinem Silizium erlaubt dieses IBC (Interdigitated Back Contact)-Konzept höchste Wirkungsgrade; beispielsweise erreicht SunPower 24,2 % auf großflächigen Zellen [iv]. IBC-Solarzellen mit einem a-Si/c-Si Heteroübergang erreichten zu Projektbeginn nur einen Wirkungsgrad von 15,7 % im Labormaßstab [v]. Hauptgrund für die geringere Effizienz waren Schwierigkeiten bei der Strukturierung der a-Si:H-Rückseitenbeschichtung bei gleichzeitiger Gewährleistung der Passivierungswirkung. Das MWT-plus Konzept umgeht diese komplexe Strukturierung durch eine Kombination des Heteroübergangs mit einer MWT-Kontaktierung. Diese Kombination war zu Projektbeginn wissenschaftliches und technologisches Neuland. In der Literatur gab es allgemeine Denkanstöße in diese Richtung, Vorschläge für eine konkrete Umsetzung oder gar experimentelle Ergebnisse waren zu Projektbeginn aber nicht bekannt.

Die Frontseitenmetallisierung kristalliner Standardsolarzellen wird zum überwiegenden Teil über den Sintereinbrand von strukturiert abgeschiedenen Silberpasten bewältigt. Die Abscheidung der Silberpasten erfolgt häufig besonders kostengünstig über Siebdruckverfahren. Der Einbrand erfolgt in Infrarottunnelöfen innerhalb sehr kurzer Zyklen (Rapid Thermal Processing, RTP [vi]), um temperaturbedingte Diffusionen/Reaktionen der zu diesem Zeitpunkt bereits vorhandenen Emitter- und Antireflexionsschicht (ARC)-Strukturen zu vermeiden. Der Kontakt zwischen Finger und Wafer entsteht während des Einbrandes dadurch, dass sich geringe Anteile an Silber als Oxid im Pastenglas lösen und diese gelösten Anteile dann an der stark reduzierend wirkenden Si-Oberfläche wieder als Metallkolloide ausgeschieden werden [vii]. Dieser Prozess ist stark von der Chemie und damit der Zusammensetzung des verwendeten Pastenglases abhängig. Neuartige galvanische Abscheidenmethoden von Bulkmetallen (Cu, Ag) auf den Keimschichten erlauben eine besser kontrollierbare Kontaktbildung und Minimierung der ohmschen Fingerwiderstände [viii, ix].

Die bei Standardsolarzellen üblichen Kontaktierungs- bzw. Metallisierungsstrategien und Materialien lassen sich bei Heteroübergang-Solarzellen nicht anwenden. Grund dafür ist die nach Abscheidung der i-/a-Si:H-Schichten zulässige Maximaltemperatur von 200 °C, der die Zelle ausgesetzt werden kann [x]. Vor diesem Hintergrund werden zur Kontaktierung von Solarzellen mit pn-Heteroübergang meist Polymerpasten verwendet. Die Bindermatrix derartiger Pasten (z.B. Epoxidharze), verbleibt im Gegensatz zu konventionellen Pasten nach der Schichtformierung im Leiterkörper. Das innovative Metallisierungskonzept des MWT-plus Projektes bestand in der Anwendung niedrigsinternder Metallkomposite, die hochleitfähige Metallisierungen auch bei Temperaturen <200 °C zulassen. Basis hierfür sind

bekannte Bleifrei-Lote, die in der Paste als Matrixkomponente für hochleitfähige Partikel wie z. B. Ag oder Cu dienen.

Um eine Verschaltung der gegenwärtigen Zellen in Solarmodule zu realisieren, werden Busbars über Lötverfahren mit Kontaktbändchen verbunden. Zur konkreten Verlotung von Modulen werden in der PV industriell vorrangig Selektivlötverfahren auf Basis des Stempel-, zunehmend aber auch des Licht- oder Laserlötens genutzt. Diese Prozesse werden auch im industriellen Maßstab exzellent beherrscht. Ein wesentlicher Unterschied von MWT- bzw. allgemein rückseitenkontaktierten Zellen zu beidseitig kontaktierten Zellen ist die Weiterverarbeitung zu Modulen. Hierbei dominiert gegenwärtig eine Montage mittels Leitkleben oder Löten. Verbindungspartner sind hierbei wiederum die schon genannten glasgebundenen Pastensysteme, die oberhalb von 850 °C eingebrannt werden und eine hohe mechanische Festigkeit aufweisen. Für die im Rahmen des Projektes einzusetzenden Niedertemperatur-Polymerleitpasten für die Rückseitenkontaktierung stehen derartige Erfahrungen zur Montage und zur Zuverlässigkeit nicht im breiten Umfang zur Verfügung. Innerhalb des Projektes wurden geeignete massentaugliche und zuverlässige Verbindungstechniken für dieses neuartige PV-Modulkonzept entwickelt und evaluiert.

Der Laser ist im Bereich der Solarzellenherstellung ein etabliertes Werkzeug. Der Einsatz scannerbasierter Lasersysteme ermöglicht eine sehr schnelle und präzise Bearbeitung mit sehr feinen Strukturbreiten bis zu 10 µm. Der Anwendungsbereich des Lasers reicht von der klassischen Kantenisolation über die Einbringung von Vias für MWT- und emitter wrap through (EWT) Zellen, die Realisierung lokaler Kontaktpunkte mittels lasergefeuerter Kontakte (LFC) bis hin zu einer lokalen Dotierung des Si-Basismaterials. Je nach gewünschtem Dotierungsprofil werden unterschiedliche Laserwellenlängen mit entsprechenden Eindringtiefen (z.B. 1 µm für 532 nm Laserwellenlänge, 10 nm für 332 nm) sowie angepasste zeitliche Bestrahlungsprofile verwendet [xi]. Zur Vermeidung negativer Auswirkungen von lokal aufgeschmolzenen Si-Pyramiden ist es notwendig, den Laserstrahl exakt auf die Kontaktfläche zu fokussieren [xii]. Der Einsatz von Strahlteilern ermöglicht eine wirtschaftliche Prozessführung in einem industriellen Prozess [xiii]. Bei der Bearbeitung kommen hauptsächlich F-Theta-Objektive zum Einsatz, die einen schrägen Strahleinfall außerhalb des Zentrums bewirken.

Die Passivierung und Entspiegelung der Solarzellenfrontseite (n-dotiertes Si) erfolgt heute üblicherweise durch Siliziumnitrid. Die (p-dotierte) Si-Rückseite konventioneller Solarzellen wird durch ein Aluminium-Rückseitenfeld (Al-BSF) passiviert. Um die Rekombination an der Rückseite weiter zu reduzieren, wird alternativ zum Rückseitenfeld eine Aluminiumoxid (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)-Passivierungsschicht eingesetzt [xiv]. Die bisher publizierten Verfahren zur Abscheidung von Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> erzeugen qualitativ hochwertige Schichten. Hohe Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Abscheideraten bei geringen Kosten können beispielsweise mit dem „spatial ALD-Konzept“ realisiert werden, das die ALD-Zyklen räumlich trennt [xv]. Die bisherige Schichtoptimierung konzentrierte sich auf das Standardsolarzellenkonzept, also auf eine Passivierung von p-dotiertem Silizium und eine Entspiegelung eines nieder-ohmigen Emitters. Zur Passivierung und Entspiegelung von hoch-ohmigem und n-dotiertem Silizium, wie es im MWT-plus Konzept benötigt wird, wurden vergleichsweise wenig Arbeiten durchgeführt.

Die Trocknung der Metallisierungspasten auf kristallinen Solarzellen erfolgt in einem thermischen Prozess unter Luftatmosphäre. Stand der Technik ist die Verwendung von Strahlungsanlagen (Infrarotstrahlung, IR), bei denen die Solarwafer auf metallischen Geflechtsgliederbändern transportiert werden (siehe Anlagen z.B. von Despatch, BTU,

Rehm). Die Trocknung unter Konvektion, wobei zirkularstrom-erwärmte Luft die bedruckten Wafer trocknet, ist ebenfalls bekannt (siehe Anlage von Heller).

Beim Trocknungsprozess erfahren die Solarpasten einen teilweise erheblichen Gewichtsverlust, infolge dessen eine Schadgasbeladung der Prozessatmosphäre erfolgt. Dieses Schadgas (Rohgas) muss durch geeignete Verfahren abgeschieden werden, um einerseits Kontaminationen der Trocknungsanlage zu verhindern (Verringerung der Wartungsaufwendungen). Andererseits dürfen die Schadgase nicht in die Umgebungsluft der jeweiligen Anlagen gelangen (Einhaltung der gesetzlichen Vorschriften wie z.B. TA-Luft). Gegenwärtig werden zur Rohgasabscheidung verschiedene Verfahren verwendet. Weit verbreitet ist die Kondensatabscheidung, bei der mittels kalter Flächen (Wärmetauscher) die Rohgasbeladung zur Kondensation angeregt wird. Ein weiteres Verfahren wird durch die zusätzliche Verwendung von Elektrofiltern geprägt (siehe Anlage von DAS). Dadurch kann die Abscheideleistung auf ca. 97 % gesteigert werden, ohne wesentlich den Energiebedarf zu steigern. Allerdings erreicht man mit dieser Technik nicht die hinsichtlich der Konzentration flüchtiger organischer Verbindungen (VOC) geforderten gesetzlichen Limitationen. Sehr hohe Abscheideleistungen (VOC's > 99,5 %) erreicht man mittels thermischer Oxidation, bei welcher das Rohgas bei Temperaturen von ca. 850 °C verbrannt wird. Jedoch ist hier der zusätzliche Energiebedarf beinahe doppelt so groß wie bei den vorgenannten Abscheideverfahren. Im Rahmen des Verbundprojekts wurde ein Trocknungsprozesses unter einer inerten Atmosphäre entwickelt. Dies erfordert eine neue Anlagentechnik, die deutlich über den Stand der Technik hinausgeht. Insbesondere muss für die Trocknungsanlage eine neuartige Schadstoff-Abscheideeinheit entwickelt werden, da die bisherigen Lösungen (Elektrofilter und thermische Oxidation) nicht mehr unter den Bedingungen einer Stickstoffatmosphäre funktionieren.

Eine weitere Herausforderung für die Prozessgasreinigung in der Solarindustrie ist der zunehmende Einsatz von Laserprozessen, deren Rauche Anlagen und Produkte verunreinigen können. Da diese in großen Mengen entstehen, sind hier selbst-abreinigbare Absauganlagen gefordert. Die entstehenden Stoffe bei der Laserrauchabsaugung können jedoch hoch reaktiv sein, da durch die Ablation brennbare Stoffe wie Silizium plötzlich eine sehr große Oberfläche bekommen und so selbst-entzündlich oxidieren können. Inertgas könnte diese Oxidation verhindern. Eine selbst-abreinigbare Absauglösung im Inertgasbetrieb existiert jedoch noch nicht und die technischen Herausforderungen wie Gasbilanzen und Druckverhältnisse sind aktuell nur unzureichend erforscht.

## **5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Im Rahmen dieses Projekts hat die NaMLab gGmbH einen Unterauftrag an das Institut für Halbleiter- und Mikrosystemtechnik der TU Dresden vergeben. Dieser Auftrag war insbesondere nötig um einen Hochfrequenz-PECVD Prozess für die Abscheidung von amorphem Silizium auf kristallinen Silizium-Substraten zu entwickeln. Darüber hinaus unterstützte das IHM die Entwicklung vor neuen Konzepten zur Oberflächenpassivierung. Der Unterauftrag an das IHM ermöglichte somit den Zugriff auf Prozesstechnologie, welche weder an der NaMLab gGmbH noch bei den anderen Projektpartnern verfügbar war, insbesondere handelte es sich um eine 140 MHz PVCVD Anlagen, eine Blitzlicht-Sinteranlage und eine ALD-Anlage mit Gaschemie für  $\text{Al}_2\text{O}_3$  und  $\text{TiO}_2$  Abscheidung.

## 6. Wissenschaftlich technische Ergebnisse

### Vorwort

#### Projektphase 1 (09/2012 – 12/2013)

- Basierend auf Simulation und Literaturrecherche wurde die MWT-plus Solarzelle spezifiziert. Wesentliche Aspekte waren der Rückseitenemitter und die Isolation zwischen den Metallisierungsbahnen. Damit wurde Meilenstein 1 erreicht.
- FhG IWS entwickelte erfolgreich Laserprozesse für die Viabohrung, Oberflächen-dotierung und Isolation
- FhG IKTS demonstrierte erfolgreich die Via-Metallisierung mit Niedertemperatur-Pasten und evaluierte neuartige Fügetechniken für die Polymerpasten
- Rehm Thermal Systems GmbH und FhG IKTS evaluierten Trocknungsstrategien (Luft/Inertgas, Konvektion/IR, Prozesstemperatur) für unterschiedliche Pasten
- ILK gGmbH analysierte die Abluft der Pastentrocknung und der Laserbearbeitung und entwickelte zusammen mit ULT AG ein Konzept zur Abluftreinigung
- Meyer Burger (Germany) AG demonstrierte eine Hybridzelle mit einem a-Si:H Emitter auf der Rückseite und konventioneller Dotierung (front surface field) auf der Vorderseite als Vorstudie zur MWT-plus Zelle
- NaMLab gGmbH entwickelte eine universelle Passivierung für p- und n-dotiertes Silizium, eine hochwertige a-Si:H Abscheidung mittels 140 MHz PECVD (Unter-auftrag IHM) und ein Simulationsmodell für die MWT-plus Zelle
- Die erste Projektphase wurde mit vier-monatiger Verzögerung abgeschlossen. Der Meilenstein 2 wurde von allen Partnern erreicht.

#### Projektphase 2 (06/2013 – 12/2014)

- FhG IWS hat eine Vorrichtung zum Laserdotieren von kompletten Solarwafern (156x156 mm<sup>2</sup>) mit kontinuierlicher Zufuhr des Dotiermediums entworfen, konstruiert, aufgebaut und in Betrieb genommen.
- ILK gGmbH hat den Laserabverbrauch während der Verarbeitung von unterschiedlichen Materialien an einem Versuchsstand am FhG IWS analysiert. Aufbauend auf diesen Analysen hat ULT AG ein Filterkonzept entwickelt und gemeinsam mit ILK gGmbH getestet.
- Meyer Burger (Germany) AG führte erfolgreich die Rückseiten-Zelle (Emitter auf der Rückseite) ein. Die höchste Zellenwirkungsgrade lagen bei 21,7 % (5 Busbar-Zellen) und 22,7 % (busbarlose Zellen). Diese Rückseiten-Zellen sind Ausgangsbasis und Referenzsystem für die MWT-plus Solarzellen.
- FhG IKTS entwickelte ein Niedertemperatur-Metallisierungskonzept für die direkte Kontaktierung von Si-Oberflächen und konnte dabei den Kontaktwiderstand in einem akzeptablen Bereich reduzieren. Außerdem konnte die Modulmontage im Klebe- und Lötverfahren demonstriert werden.
- FhG IKTS und NaMLab gGmbH entwickelten gemeinsam einen spezifischen Probenhalter für die MWT-plus Solarzellen.
- NaMLab gGmbH entwickelte die symmetrische und Niedertemperatur-Passivierung für die flexible Anwendung in MWT-plus Solarzellen.
- Rehm Thermal Systems GmbH hat den in Inertgas betriebenen Versuchsofen weiter entwickelt und damit eine verbesserte Temperaturstabilität erreicht. In diesem Ofen wurden in Kooperation mit FhG IKTS unterschiedliche Pasten in Inertgas-Atmosphäre evaluiert.



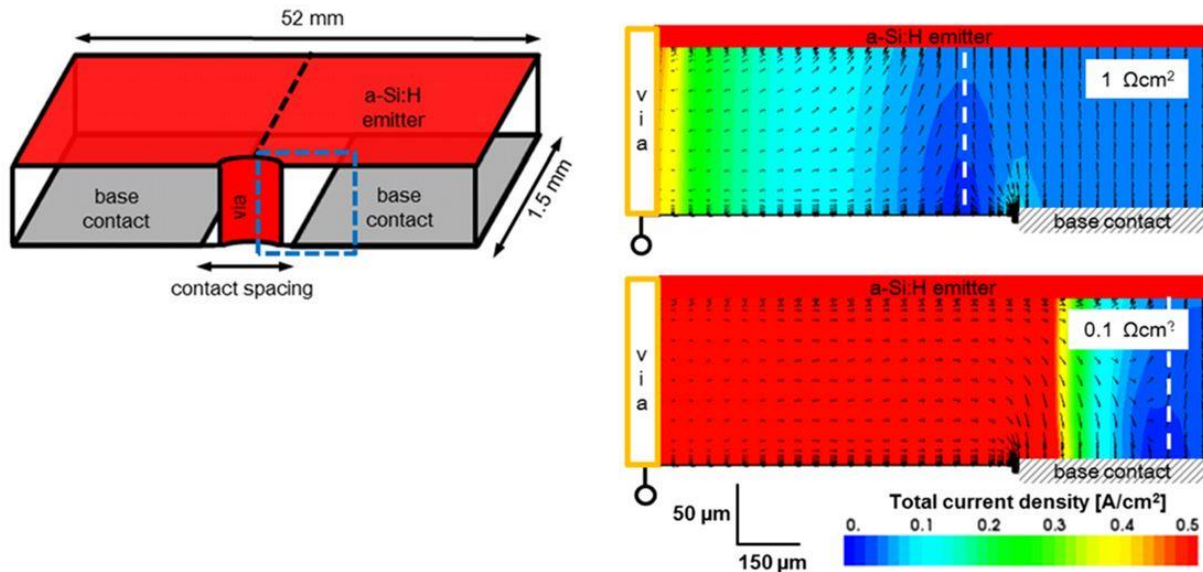
- Die zweite Projektphase wurde Ende 12/2014 mit Meilenstein 3 abgeschlossen.

### **Projektphase 3 (06/2014 – 12/2015)**

- Basierend auf den Ergebnissen der ersten beiden Projektphasen wurde die Prozesssequenz der MWT-plus Solarzelle definiert und zwar in zwei Varianten für die Frontseitenbeschichtung basierend auf einer a-Si:H und einer dielektrischen Schicht. Zentrale Innovationen waren der Rückseitenemitter, die „via first“ Sequenz und die zu integrierenden Einzelprozesse. Damit wurde der Meilenstein 4 Ende 12/2014 erreicht.
- In 10 Prozessdurchläufen wurden etwa 200 MWT-plus Solarzellen mit a-Si:H Frontseite realisiert. Bester Solarzellen-Wirkungsgrad war 14,3 % (Referenzsystem: 21 – 22 %). In der Verlustanalyse wurden drei Problemfelder identifiziert: die Rückseitenisolation, die mechanische Stabilität und das Metallisierungslayout.
- Die MWT-plus Solarzelle mit dielektrischer Frontseite hatte ein sehr hohes Innovationsniveau, insbesondere die direkte elektrische Kontaktierung der Vorderseite und die Niedertemperatur-Passivierung stellten sehr hohe Hürden dar. Die elektrischen Kennwerte aller in dieser Prozessroute gefertigten Solarzellen waren sehr schlecht.
- Der Inertgas-Durchlaufofen wurde von der Rehm Thermal Systems GmbH konstruiert, ans FhG IKTS transferiert und dort erfolgreich getestet. Die Evaluierung ergab einen deutlichen Vorteil der Heizung durch Strahlung anstelle von Konvektion und einen materialabhängigen Einfluss der Gasatmosphäre.
- Abluftanalysen ergaben, dass die im Rahmen des Projektes evaluierten Filtertechnologien für Laserabrauch und Pastentrocknung die erforderlichen Spezifikationen erreichen.
- Aufgrund der Verzögerungen in den ersten beiden Projektphasen war eine Projektverlängerung um vier Monaten erforderlich. Der erfolgreiche Projektabschluss (Meilenstein 5) erfolgte Ende 12/2015.

### **Arbeitspaket 1.1: Spezifikationen für Einzelprozesse (NaMLab gGmbH)**

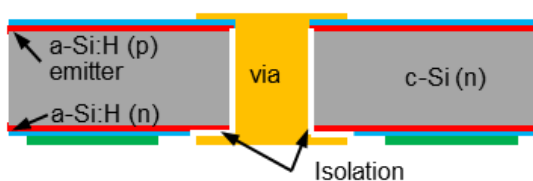
Um die Spezifikationen für die Entwicklungsarbeiten festzulegen, wurden im Rahmen dieses Arbeitspaketes erste TCAD Simulationen des MWT-plus Solarzellenkonzeptes durchgeführt (Abbildung 1). Die Simulationen basierten auf einer symmetrischen 2D-Einheitszelle um das Via Loch. Die wesentliche Erkenntnis war, dass die Zelleneffizienz sehr stark von Rekombinationsverlusten im Volumen und an der Oberfläche bestimmt wird. Zudem ergab die Simulation, dass ein unzureichend isoliertes Via-Loch zu sehr hohen elektrischen Verlusten führt, wenn sich die a-Si:H Emitterschicht auf der Vorderseite der Solarzelle befindet. Abbildung 1 (rechts) zeigt, dass der Verluststrom um das Via stark zunimmt, wenn der Kontaktwiderstand zwischen Via Metallisierung und dem Silizium Substrate unter  $1 \Omega\text{cm}^2$  fällt.



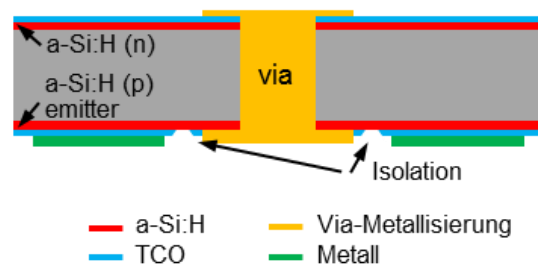
**Abbildung 1:** TCAD Simulation der elektrischen Verluste am Via Metallkontakt. (links) die Einheitszelle der Simulation, (rechts) die Stromdichtenverteilung um das Via-Loch. Bei unzureichender Isolation ( $< 1 \Omega\text{cm}^2$ ) nimmt der Verluststrom am Via stark zu.

Eine MWT-plus Solarzelle basierend auf einem Frontseitenemitter würde eine sehr aufwändige Via-Isolation benötigen (Abbildung 2a). Diese Isolation würde zusätzliche Prozessschritte und Materialien erfordern und eine industrielle Verwertung erschweren. Auf Basis der Simulation wurde entschieden, die a-Si:H Emitterschicht, entgegen dem Stand der Technik, von der Vorderseite auf die Rückseite der Solarzelle zu verlegen. In dieser Rückseiten-Emitter Konfiguration ist ebenfalls eine Zellenisolation nötig, allerdings an einer Stelle die prozesstechnisch besser zugänglich ist (Abbildung 2b). Die dafür erforderliche Rückseiten-Emitter Technologie wurde im Rahmen dieses Projektes entwickelt. Zusätzlich wurden die erhöhten Anforderungen für die dielektrische Oberflächen-Passivierung und die elektrische Kontaktierung definiert.

#### a) Emitter auf der Frontseite



#### b) Emitter auf der Rückseite



**Abbildung 2:** Zwei Realisierungs-Optionen für den Aufbau der MWT-plus Solarzelle. Das Konzept mit a-Si:H Emitter auf der Frontseite (a) erfordert eine Isolation innerhalb des Via Loches. Im Projekt wurde deshalb ein Konzept mit Rückseitenemitter verfolgt (b), bei dem die Isolation auf der besser zugänglichen Zellenrückseite realisiert werden kann.

## **Arbeitspaket 1.2: Laserabtrag und -dotierung**

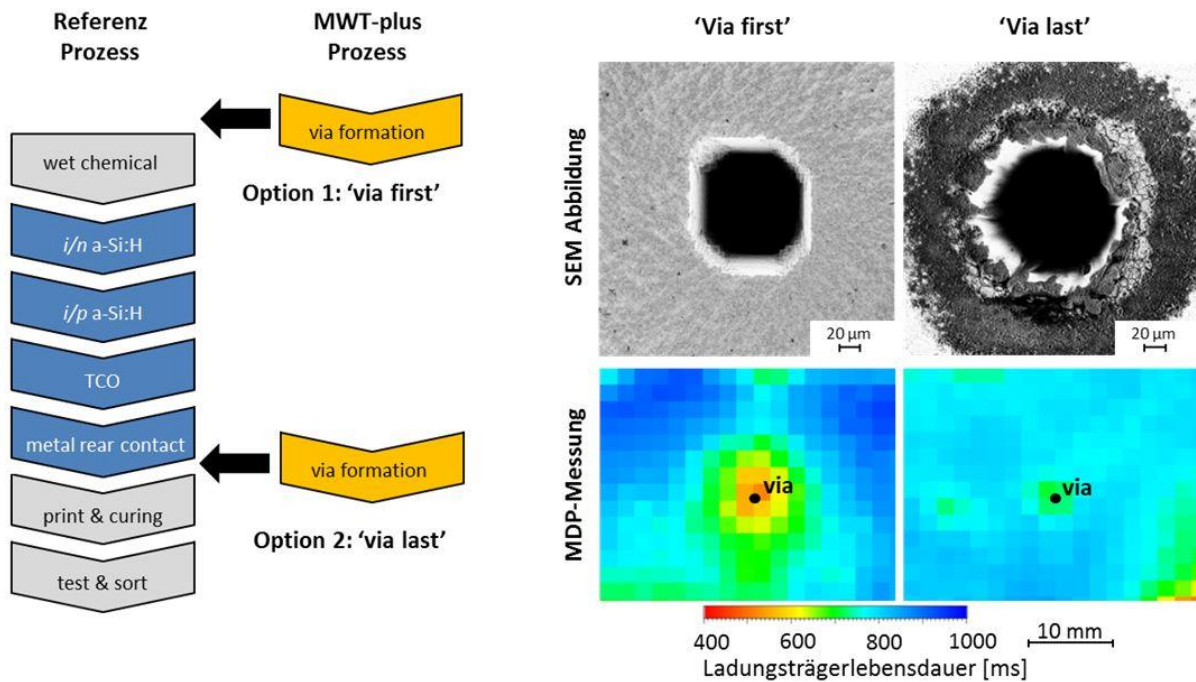
In diesem Arbeitspaket wurden am FhG IWS drei Laserprozesse entwickelt, die in der MWT-plus Solarzelle zum Einsatz kamen.

### **Themenschwerpunkt 1: Herstellung von Vias in n-dotierten Siliziumwafern**

Zunächst wurde der Einfluss von Wellenlänge und Pulsenergie auf die Schädigung des Wafermaterials untersucht. Die eingesetzten Laserwellenlängen betragen 532 nm (100 bis 20  $\mu$ J) und 355 nm (30 bis 10  $\mu$ J) bei einer Pulsdauer von 10 ps. Charakterisiert wurden die Vias (Durchkontaktierungen) durch Ladungsträgerlebensdauer-Messungen, durchgeführt beim Projektpartner NaMLab gGmbH. Der Via-Durchmesser wurde als signifikanter Einflussfaktor auf die Ladungsträgerlebensdauer identifiziert. Dagegen hatten Wellenlänge, Pulsenergie und Bohrstrategie keinen bedeutsamen Einfluss. Mit einem Laser mit einer Wellenlänge von 532 nm konnten größere Abtragraten verzeichnet werden. Deshalb wurde dieser Prozess als Standard für die MWT-plus Zellenfertigung definiert.

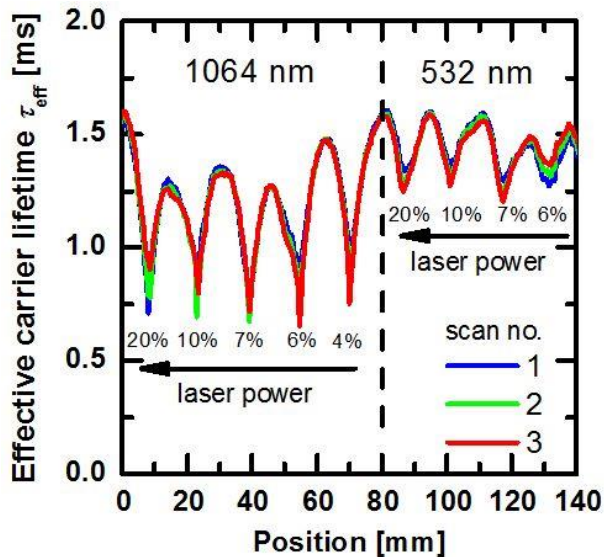
Die elektrische Evaluierung der lasergebohrten Löcher hat ergeben, dass die Rekombinationsverluste an den Seitenwänden von der Prozessintegration und von den Laserparametern abhängen. Evaluiert wurden zwei Prozessoptionen [Abbildung 3 (links)]. Im „via first“ Prozessfluss wurde die Laserbohrung vor den chemischen Reinigungsschritten und vor der KOH Oberflächentexturierung durchgeführt. Diese Sequenz ist die Standardsequenz in MWT-Solarzellen mit diffundiertem Emitter. Alternativ wurde die „via last“ Sequenz evaluiert, in der die Via Löcher erst nach der Abscheidung der Dünnschichten gebohrt wurden.

Die Auswertung vollständig prozessierter Solarzellen ist in Abbildung 3 (rechts) für beide Sequenzen gezeigt. Die „via first“ Sequenz resultiert in saubereren Via Löchern, wie in der Top-Down rasterelektronenmikroskopischen Aufnahme gezeigt. Ablagerungen während der Laserbohrung wurden in den nachfolgenden Reinigungsschritten entfernt. Insbesondere die KOH Oberflächentexturierung mit einem Materialabtrag von etwa 10  $\mu$ m hat einen deutlichen Reinigungseffekt. In der „via last“ Sequenz wird der Laserabtrag nicht entfernt, da Reinigungsschritte nach der Dünnschichtabscheidung zu Schädigungen der Zellen führen können. Die Top-Down Ansicht zeigt eine Laserablagerung über einen Radius von über 100  $\mu$ m um das Loch verteilt. Trotz dieser deutlichen Oberflächenkontamination resultiert die „via last“ Sequenz in besseren elektrischen Kenndaten. Die orts aufgelöste Ladungsträgerlebensdauer-Verteilung um das Via Loch zeigt eine relative homogene Verteilung. Die Rekombinationsverluste an der Via-Seitenwand haben wenig Einfluss auf die Lebensdauern. Via Löcher aus der „via first“ Prozesssequenz verursachten dagegen einen deutlichen Einbruch der Ladungsträgerlebensdauer aufgrund der offensichtlich schlechteren Passivierung. Der negative Einflussbereich dieses schlecht passivierten Vias hat einen Durchmesser im Millimeter Bereich. Aufgrund dieser Resultate wurde entgegen den Stand der Technik entschieden, die MWT-plus Solarzelle in einer „via last“ Sequenz zu fertigen.



**Abbildung 3:** MWT-plus Prozessequenz mit den Optionen „via first“ und „via last“ (links). SEM Abbildung und Ladungsträgerlebensdauerermessung von Via Löchern, die in „via first“ und „via last“ Prozessequenz prozessiert wurden (rechts). Die Rekombinationsverluste im „via last“ Prozess waren deutlich geringer.

Die Laserparameter hatten einen sehr starken Einfluss auf die Rekombinationsverluste. Abbildung 4 zeigt die Ladungsträgerverteilung um 9 Via Löcher, wobei die Löcher mit unterschiedlichen Laserparametern gefertigt wurden („via last“ Sequenz). Während die Laserleistung wenig Einfluss auf die Rekombinationsverluste hatte, wurde festgestellt, dass die Wellenlänge sehr kritisch ist. Mit dem grünen (532 nm) Laser konnten deutlich bessere Ergebnisse erzielt werden, die Ladungsträgerlebensdauer nahmen um die Via-Löcher lediglich um etwa 20 % ab. Der Einsatz des IR Lasers führte dagegen zu einem Einbruch der Ladungsträgerlebensdauer um mehr als 50 %. Eine genauere Analyse der Via Seitenwände ergab, dass der grüne Laser verstärkt die Bildung einer Siliziumoxidschicht an der Oberfläche bewirkte. Es wird vermutet, dass diese Schicht die Oberflächenpassivierung verbessert. Da in der „via last“ Sequenz die Via Löcher nicht mehr gereinigt werden, bestimmt der Laserprozess die Oberflächenpassivierung maßgeblich. Aufgrund dieser Vorevaluierung wurde entschieden, alle MWT-plus Solarzellen mit dem grünen (532 nm) Laserprozess zu fertigen.



**Abbildung 4:** Ortsaufgelöste Lebensdauererwartung entlang einer Reihe von 9 Via Löchern mit unterschiedlichen Laser-Prozessparametern. Die Rekombinationsverluste an den Via Löchern waren nach der Bohrung mit einem 532 nm Lasers am geringsten.

## Themenschwerpunkt 2: Laserdotierung

Für das oben beschriebene Zellenkonzept sind hochdotierte Bereiche unterhalb der Metallisierungsfinger (Grid) notwendig um den Widerstand zwischen den Metallkontakten und dem Si-Material zu minimieren. Da die Zellen aus amorphen und kristallinen Silizium besteht, dürfen die Prozesstemperaturen der Zellen 200 °C nicht übersteigen. Das Dotieren mittels Laser eignet sich besonders, weil der fokussierte Laserstrahl nur lokal das Silizium aufschmilzt und so die Dotanten oberflächennah eindiffundieren können.

Zum Dotieren (d.h. Erzeugung von oberflächennahen  $n^{++}$  Bereichen) der monokristallinen, texturierten (Pyramiden)  $n$ -dotierten (Phosphor, Grunddotierung  $1,2 \cdot 10^{15} - 2,4 \cdot 10^{15}$  Atome/cm<sup>3</sup>) Si-Solar-Wafer wurden folgende Lasertypen während des Projektes eingesetzt:

- Coherent Avia Laser, UV-Bereich (355 nm), ns
- Fuego Laser, grüner Spektralbereich (532 nm), ps
- Fuego Laser, IR-Bereich (1064 nm), ps
- Eolite Laser, grüner Spektralbereich (532 nm), ns

Variiert wurden u.a. die Laserleistung, die Repetitionsrate, der Linienabstand, die Fokusslage des Lasers. Gleichzeitig spielt die Wahl der Dotierquelle eine große Rolle für den Dotierprozess selbst. Verschiedene phosphorhaltige Dotiermedien wurden erprobt:

- kommerzielles Dotiergel P450 (Filmtronics)
- H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>-Gel: Phosphorsäure in Polymer
- Getrocknete Phosphorsäure
- Phosphorsäure (85 %ig)
- verdünnte Phosphorsäure (50 %ig)

Die entstandenen dotierten Flächen wurden hinsichtlich ihrer Schichtwiderstände (4-Punkt-Messung), Morphologie der Siliziumober- bzw. Siliziumbruchfläche nach der Dotierung (REM) und Phosphorkonzentration im oberflächennahen Bereich untersucht (SIMS). Eine

Messung von Dotierprofilen durch die elektrochemische Kapazitäts-Spannungsmessung (ECV), durchgeführt beim Projektpartner Meyer Burger (Germany) AG, zeigte die Konzentration an elektrisch aktiven Phosphor im oberflächennahen Bereich des dotierten Siliziums. Dieser ist essentiell für einen niedrigen Kontaktwiderstand zwischen Silizium und der metallischen Kontaktierung.

Die Dotierung mit dem Picosekunden-Laser im IR-Bereich (1064 nm), verbunden mit einer 50 %igen Phosphorsäure als Dotiermedium, erzielte die besten Ergebnisse. Das Aufschmelzen des Siliziums erfolgt durch Wärmeakkumulation niederenergetischer Pulse bei hoher Repetitionsrate. Des Weiteren wurden Untersuchungen zum Einfluss der Lasereinstellung „Burst“-Modus auf die Phosphorverteilung im Silizium durchgeführt. Die aussichtsreichsten Ergebnisse bezüglich der Dotierquelle brachte eine verdünnte (50 %) Phosphorsäure, die über dem Wafer zirkuliert und so die emittierten Siliziumpartikel fortspült. Die Kombination aus dem Einsatz ps-Laser im IR-Bereich mit ausgewählten Parametern und 50 %iger Phosphorsäure brachte die folgenden Ergebnisse. Die verwendeten Laserparameter sind in Tabelle 2 dargestellt. Den Schichtwiderstand nach dem Dotierprozess in Abhängigkeit von den Laserparametern zeigt Abbildung 5. Sehr gute Werte ( $<10 \Omega/\text{sq}$ ) zeigten Parameter A und B (Laser Burst Modus), sowie Parameter I (Einzelpulse).

Parameter	Repetitions rate [MHz]	Pulse innerhalb eines Laser Burst	Fluence [ $\text{J}/\text{cm}^2$ ]
A	5	2	0,156
B	7	2	0,108
C	7	3	0,108
D	7	4	0,108
E	7	5	0,107
F	7	6	0,107
G	7	7	0,107
H	7	8	0,106
I	8		0,093

Tabelle 2: Laserparameter.

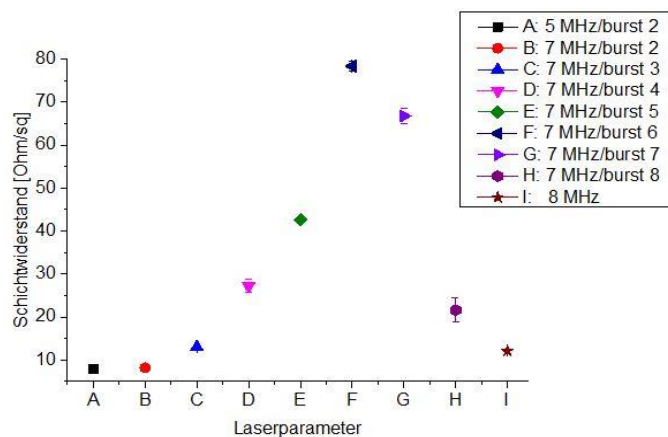
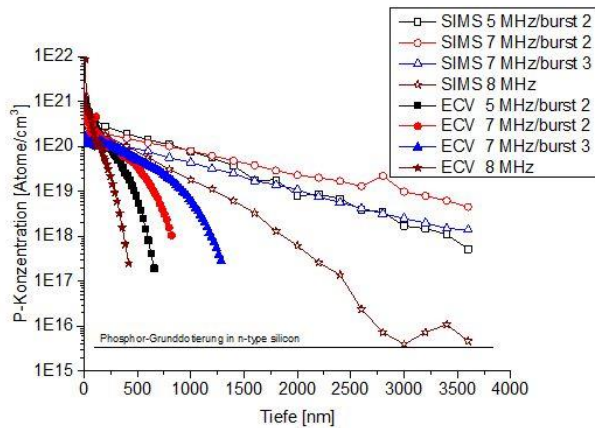


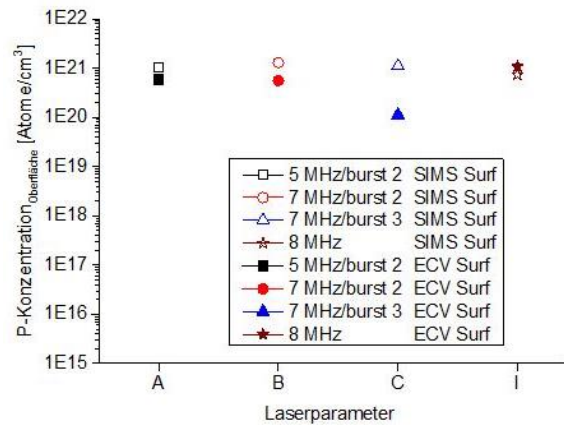
Abbildung 5: Schichtwiderstände nach Dotierung in Abhängigkeit der Laserparameter.

Sekundärionenmassenspektroskopie (SIMS) sowie ECV-Messungen wurden an den dotierten Proben mit den geringsten Schichtwiderständen durchgeführt. Beide Methoden erstellen Tiefenprofile des Phosphors in der Siliziummatrix. Während die ECV Methode den elektrisch aktiven Phosphor detektiert, wird mit SIMS der Gesamphosphorgehalt bestimmt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6 dargestellt. Eine Übersicht der Ergebnisse beider Methoden über die Phosphorkonzentration an der dotierten Siliziumoberfläche zeigt Abbildung 7.

Im Laser-Burst Modus besteht, aufgrund der erhöhten Volumenerwärmung, die Schmelze für eine längere Zeit als bei Einzelpulsen (Parameter I). Das führt zu einer höheren Phosphorkonzentration und zu einem tieferen Eindringen des Phosphors in das Silizium. Die Eindringtiefe des Phosphors ist tiefer als  $3,5 \mu\text{m}$  im Laser-Burst Modus. Im Einzelpuls Modus wird das Level der Phosphorgrunddotierung im Silizium bereits bei  $3 \mu\text{m}$  erreicht. Der höchste Einbau von aktivem Phosphor ins Silizium Material konnte mit dem Laser-Burst Modus erreicht werden. Die höchste Konzentration an elektrisch aktiven Phosphor ( $1,08 \cdot 10^{21} \text{ Atome}/\text{cm}^3$ ) nahe der Siliziumoberfläche konnte mit dem Einzelpuls-Parameter 8 MHz erreicht werden. Das Ergebnis ist konsistent mit dem niedrigen Schichtwiderstand (Abbildung 5) und wurde als aussichtsreich für die folgende Metallisierung gewertet.

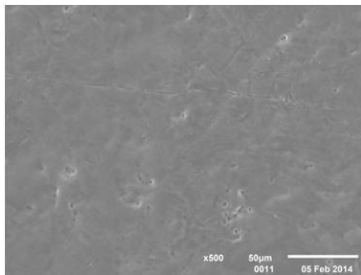


**Abbildung 6:** ECV und SIMS Messungen: Phosphorkonzentration in Abhängigkeit der Materialtiefe.

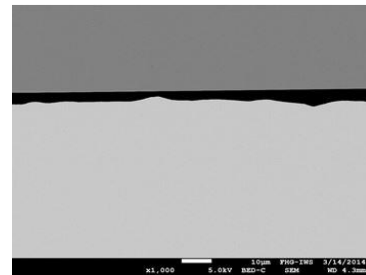


**Abbildung 7:** ECV und SIMS Messungen: Phosphorkonzentration an der Oberfläche in Abhängigkeit der Laserparameter.

Ein anderer wichtiger Punkt ist die Morphologie, damit der Übergang Metall-Silizium ohne Verluste realisiert werden kann. Die Anwendung von Parameter I führt zu einer glatten, leicht welligen Oberfläche ohne Defekte und Löcher. Die ursprünglichen Pyramiden sind komplett und homogen aufgeschmolzen. Abbildung 8 und Abbildung 9 zeigen REM Aufnahmen der dotierten Bereiche (Parameter I) in Aufsicht (Abbildung 8) und im Querschnitt (Abbildung 9).

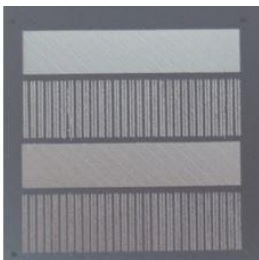


**Abbildung 8:** REM Aufnahme: Aufsicht auf dotierten Bereich.



**Abbildung 9:** REM Aufnahme: Querschnitt des dotierten Bereichs.

Die Layoutstruktur für die nachfolgende Metallisierung am FhG IKTS wurde während des Projektes, in enger Absprache, mehrfach angepasst. Für erste Versuche wurden neben dotierten Linien auch flächig dotierte Felder in die Layout-Struktur genommen um mögliche Ungenauigkeiten beim Drucken der Metallisierung auszuschließen und so genauere Werte bei den anschließenden Widerstandsmessungen zu ermöglichen. Abbildung 10 zeigt eine angepasste Layout-Struktur.

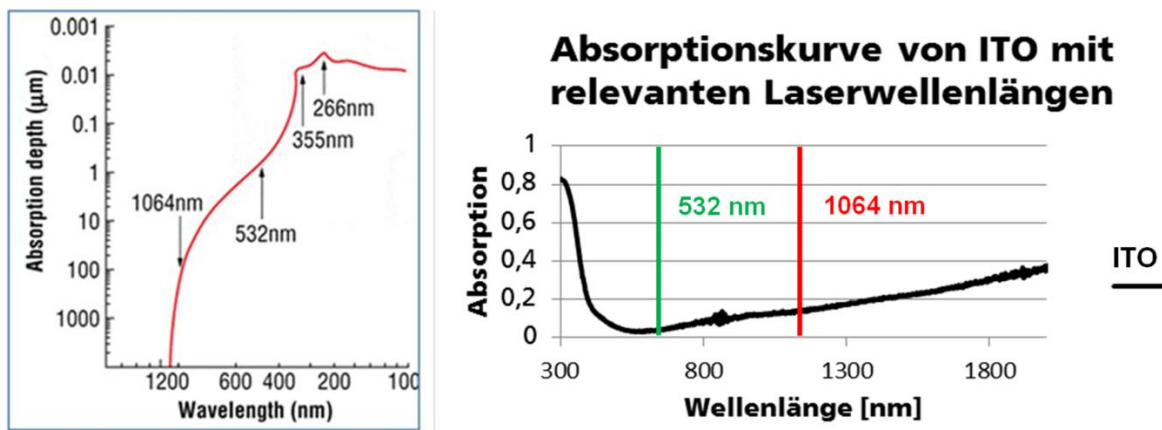


**Abbildung 10:** Angepasste Layout-Strukturen für die Metallisierung.

### Themenschwerpunkt 3: Isolation des a-Si:H-Emitters auf Waferrückseite

Es wurden Untersuchungen zum selektiven Laserabtrag von TCO-Schichten zur elektrischen Trennung der Rückseitenkontakte durchgeführt. Ziel der Untersuchung war es die darunter liegende a-Si:H-Schicht und das kristalline Silizium selbst nicht zu schädigen.

Auf Grund sehr kurzer Wechselwirkungszeiten und geringer zu erwartender thermischer Schädigung wurden die Abtragsuntersuchungen mit zwei Ultrakurzpuls-Lasersystemen mit einer Pulsdauer von 500 fs (Sci-Series von AFS Jena) und 10 ps (Fuego von Time Bandwidth Products) durchgeführt. In Abbildung 11 ist eine Übersicht der optischen Eindringtiefe von Si und das Absorptionsspektrum von ITO im Wellenlängenbereich von ca. 200 – 2000 nm dargestellt.



**Abbildung 11:** Darstellung der optischen Eindringtiefe im Si und der Absorption von 230 nm dicken ITO im Spektralbereich von 200 – 2000 nm.

Die Auswertung der spektralen Absorption legt nahe, dass ein Prozessfenster für die IR-Wellenlänge um die 1064 nm vorhanden sein sollte. Silizium absorbiert in diesem Bereich noch sehr wenig (hohe optische Eindringtiefe) und die Absorption von ITO nimmt stetig zu. Für die Wellenlänge 532 nm ist die Absorption im Si größer als im ITO. Im UV-Bereich kann für beide Materialien eine hohe Absorption (niedrige optische Eindringtiefe) aufgezeigt werden. Für beide Lasersysteme wurde der Untersuchungsschwerpunkt auf 355 nm und 1064 nm gelegt. Um die Effekte im grünen Spektralbereich aufzuzeigen wurden hier auch Untersuchungen mit dem ps-Laser umgesetzt. Ausgangspunkt der Untersuchungen war die Bestimmung der Ablationsschwelle des ITO bei den entsprechenden Laserwellenlängen (Tabelle 3).

Laserwellenlänge	Ablationsschwelle
1064 nm	0,295 J/cm <sup>2</sup>
532 nm	0,091 J/cm <sup>2</sup>
355 nm	0,071 J/cm <sup>2</sup>

**Tabelle 3:** Übersicht der ermittelten Abtragsschwellen für die untersuchten Laserwellenlängen

Trotz deutlich verminderter Absorption ist die Abtragsschwelle von ITO im grünen Spektralbereich niedriger als im IR Spektralbereich. Der physikalische Hintergrund ist, dass der Abtrag im grünen Spektralbereich durch Einkoppeln in die Grenzschicht zwischen ITO und Unterlage gegeben ist. Die Charakterisierung der Laserablation auf die Struktur der Solarzelle erfolgte durch die NaMLab gGmbH. Als Substrat wurden vollständig prozessierte Heterokontakt-Zellen von Meyer Burger (Germany) AG verwendet. Isolationsuntersuchungen



erfolgten, im Bereich der Abtragschwelle, um so auch Schädigungen des Zellaufbaus unterhalb der Abtragschwelle nachweisen zu können.

Die Charakterisierung mittels Ladungsträgerlebensdauermessungen zeigte bei allen untersuchten Laserwellenlängen eine einsetzende Reduzierung bei Leistungsstufen unterhalb der Abtragschwelle des ITOs. Die geringste Lebensdauerreduktion konnte mit der Wellenlänge 532 nm ermittelt werden. Auf Grund der Abnahme der Ladungsträgerlebensdauer im Umfeld des bestrahlten Solarzellenbereichs wurde ebenfalls eine alternative Isolationsstrategie mittels HF-Ätzung evaluiert (Arbeitspaket 3.2).

Auf Grund der Pyramidenstruktur auf der Solarzelle, und den damit verbundenen lokal stark variierenden Abtragsqualitäten (Abbildung 12 und Abbildung 13) war ein sicherer Abtrag der ITO-Schicht nur durch Verwendung stark erhöhter Fluenzen (weit oberhalb der Abtragschwelle) und einem erhöhten Pulsüberlapp von 50 % möglich. Dies führte wiederum zum lokalen Anschmelzen des Si, siehe Abbildung 12 rechts. Es ist sicher, dass die a-Si:H Schicht bei Verwendung von diesen Laserparametern mit entfernt wurde.

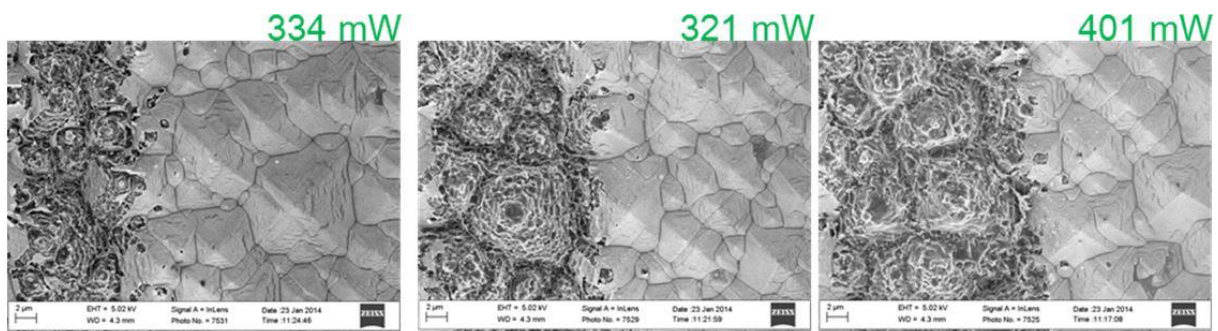


Abbildung 12: Abtragsbild von ITO mittels ps-IR Laser bei 2/3 Pulsüberlapp.

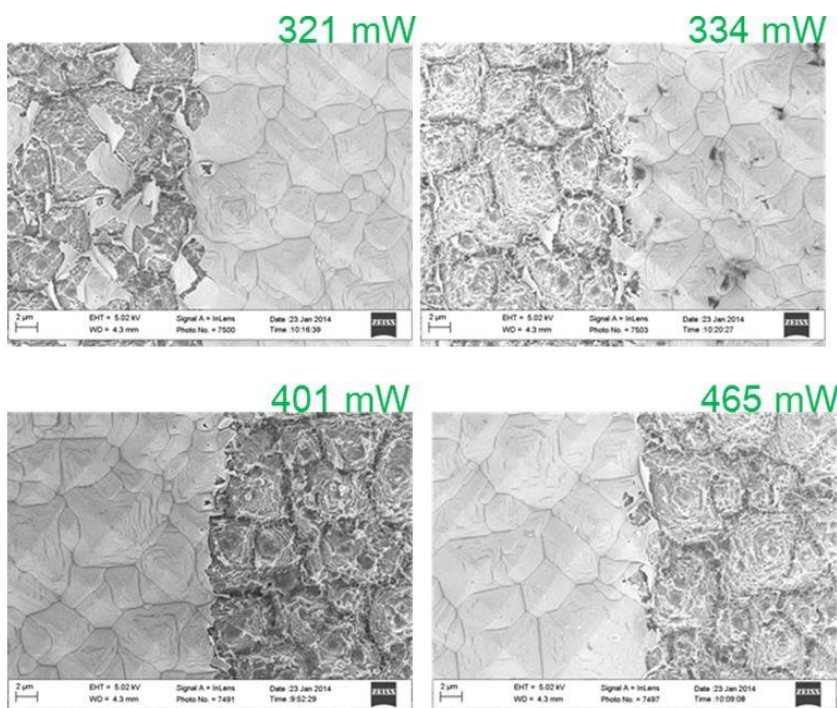


Abbildung 13: Abtragsbild von ITO mit 532 nm ps-Laser bei unterschiedlichen Leistungsstufen.

### Arbeitspaket 1.3: Entwicklung eines rückseitigen Heteroübergangs

Die Meyer Burger (Germany) AG hat sich im Rahmen dieses Arbeitspaketes intensiv mit der Entwicklung eines rückseitigen Heteroübergangs beschäftigt. Die erste zu lösende Fragestellung galt der Abhängigkeit der Passivierungsqualität der amorphen Siliziumschicht von der Oberflächenbeschaffenheit des Siliziumsubstrats. Hinweise aus der Literatur, dass es durchaus eine Rolle spielt, auf welche Kristallorientierungen das a-Si:H aufwächst, konnten nicht bestätigt werden. Die Passivierungswirkung zeigte auf einer chemisch polierten wie auf einer texturierten Oberfläche ähnliche, hervorragende Qualitäten.

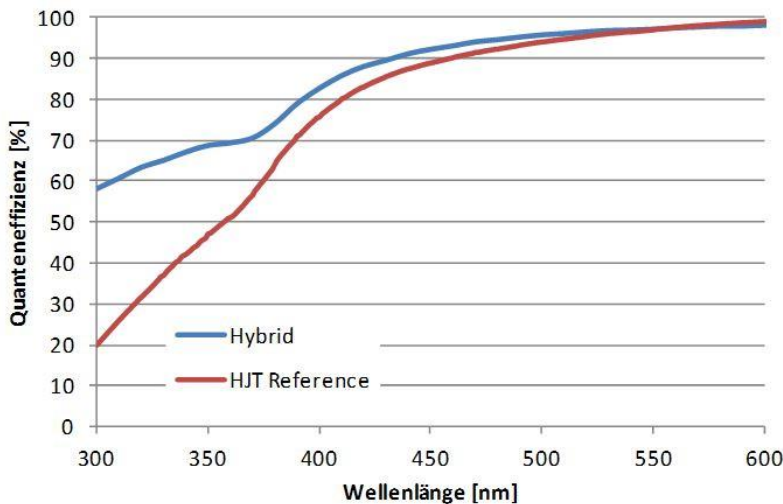
Die auf diese Ergebnisse aufbauende Entwicklung eines rückseitigen Heteroübergangs erfolgte unter dem Gesichtspunkt der Anwendbarkeit im späteren MWT-plus Zellherstellungsprozess. Als vereinfachte Vorstufe der MWT-plus Zelle wurde zunächst versucht, die Vorderseite einer Standard Solarzelle mit einem rückseitigen Heteroübergang in einer Hybridstruktur zu verknüpfen. Dies führte aufgrund der sehr begrenzten Temperaturtoleranz des Heteroübergangs bei gleichzeitiger Notwendigkeit von Hochtemperaturschritten für die Standard-Solarzelle zu sehr umfangreichen Prozessflüssen, um diese Unvereinbarkeit zu umgehen.

Abbildung 14 zeigt einen, nach mehreren Optimierungszyklen für geeignet erkannten Prozessfluss. Die hohe Anzahl an Prozessschritten für eine solche Hybridzelle macht deutlich, welche großen Herausforderungen die Verknüpfung der beiden Zelltechnologien mit sich bringt. Insbesondere eine mögliche Kontamination der Rückseite durch Fremdstoffe, die während der Prozessierung der Vorderseite auftreten kann, macht Schutzmaßnahmen für die Rückseite notwendig. Im abgebildeten Prozessflussdiagramm ist dies das Aufbringen der SiO<sub>x</sub>-Schicht in Schritt 8.

Abbildung 15 zeigt die Quanteneffizienzmessungen der ersten Hybridzellen im Vergleich zu einer herkömmlichen Heterojunction-Solarzelle. Dargestellt ist der kurzwellige Bereich des Spektrums, also der Bereich, der von photogenerierten Ladungsträgern nahe an der Vorderseite bestimmt ist. Die verbesserte Quantenausbeute für die Hybrid-Solarzelle ist deutlich zu beobachten, wodurch für dieses Zellenkonzept ein erhöhter Kurzschlussstrom zu erwarten ist.



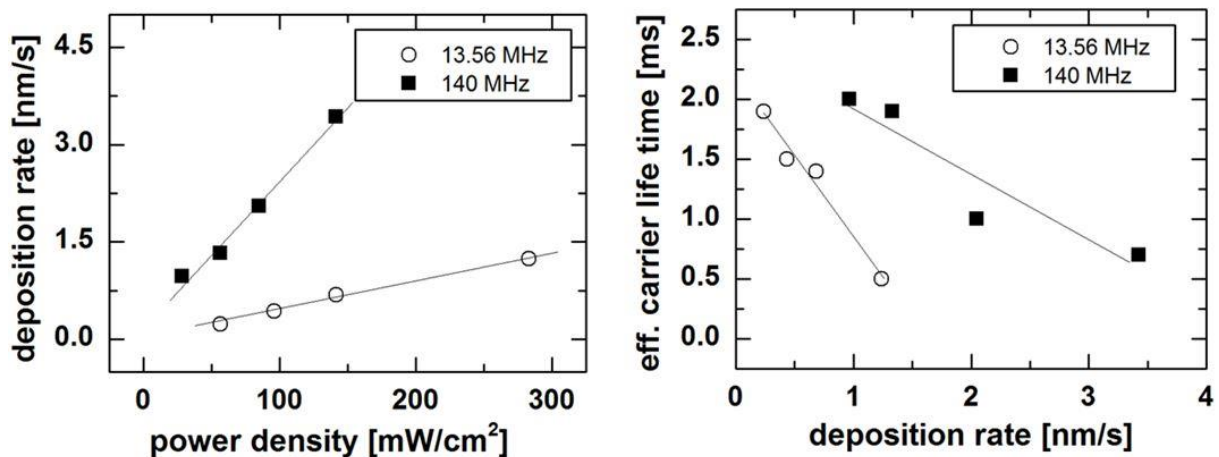
**Abbildung 14:** Prozessfluss zur Verknüpfung der Standard- mit der Heterojunction Zelltechnologie.



**Abbildung 15:** Interne Quanteneffizienzen einer Hybrid-Solarzelle (blau) im Vergleich zu einer herkömmlichen Heterojunction-Solarzelle (rot). Für kürzer werdende Wellenlängen ist ein deutlicher Vorteil für die Hybridzelle zu beobachten.

Trotz der vielversprechenden Ergebnisse wurde aufgrund der hohen Prozess-Komplexität beschlossen, diesen Ansatz nicht weiterzuverfolgen. Stattdessen wurde eine Prozesssequenz favorisiert (Arbeitspaket 3.1), in der der a-Si:H Emitter vor der dielektrischen Passivierungsschicht abgeschieden wird. Diese neue Sequenz baut auf einem neuartigen Niedertemperaturpassivierungs-Konzept auf, das im Rahmen des Arbeitspaketes 1.4 entwickelt wurde.

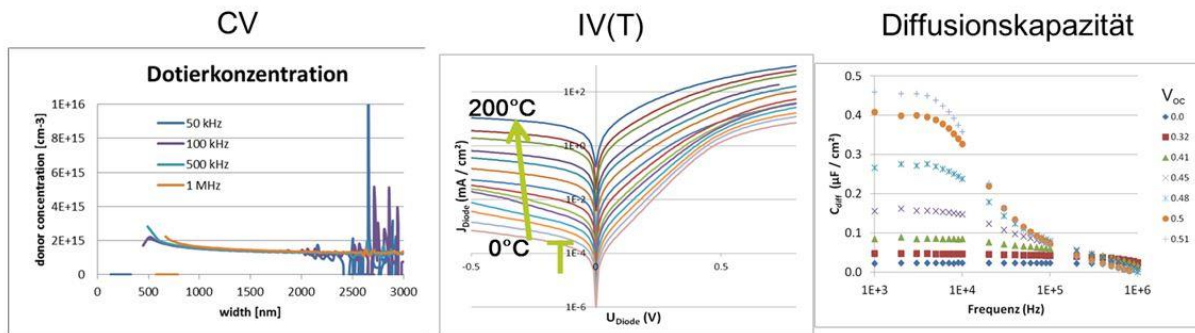
Die NaMLab gGmbH entwickelte zusammen mit dem Unterauftragnehmer IHM einen neuartigen Hochfrequenz-Plasmaprozess (VHF – very high frequency) für die Abscheidung von amorphem Silizium für Heterokontaktsolarzellen. Im Vergleich zur Standardfrequenz von 13.56 MHz ermöglicht der Einsatz von höheren Frequenzen eine höhere Abscheiderate bei vergleichbarer Schichtqualität. Dieser Vorteil wird bereits für die Hochratenabscheidung von Schichten für rein amorphem oder mikromorphem Solarzellen ausgenutzt. Die Erhöhung der Abscheiderate mit der Plasmafrequenz ist in Abbildung 16 (links) dargestellt. Durch die hohe Frequenz wird die Ionenenergie an der Siliziumoberfläche und somit die Oberflächenschädigung stark reduziert. Es konnte gezeigt werden, dass bei gleicher Abscheiderate die Passivierungswirkung von a-Si:H deutlich zunimmt [Abbildung 16 (rechts)]. Diese Verbesserung kann die Leerlaufspannung der Solarzelle weiter verbessern.



**Abbildung 16:** Hochfrequenz (140 MHz) PECVD Abscheidungen von a-Si:H ermöglicht eine erhöhte Depositionsrate (links) und verbesserte Oberflächenpassivierung auf kristallinem Silizium (rechts).

Eine wesentliche Voraussetzung für die Weiterentwicklung des Heteroübergangs ist ein detailliertes Modell der elektrischen Transportmechanismen. Dafür wurden Heterokontaktsolarzellen von Meyer Burger (Germany) AG mit der an der NaMLab gGmbH verfügbaren elektrischen Analytik charakterisiert (Abbildung 17) und mit den Messungen im Meyer Burger (Germany) AG Technikum abgeglichen.

Die Analysen zeigen, dass die IV-Kennlinien der Heterokontaktsolarzellen sehr gut mit einem Zwei-Diodenmodell, unter Berücksichtigung zweier Exponenten mit den Idealitätsfaktoren um 2 und 1, beschrieben werden können. Außerdem wurde der Einsatz von kapazitiven Messungen evaluiert. Diese Methoden ermöglichen einen Zugang zu den Grenzflächendefekten, die für die Funktion der Solarzelle sehr kritisch sind. Allerdings hat eine umfangreiche Evaluierung ergeben, dass die Datenauswertung eine verlustfreie elektrische Flächenbegrenzung der Messstrukturen erfordert. Im Rahmen des Projektes wurden mechanische, chemische oder laserbasierte Randisolationen evaluiert (Arbeitspaket 1.2). Mit den erzielten Isolationswerten konnte aber die lateralen Leckströme nicht unter einen kritischen Bereich reduziert werden. Somit konnte das hohe Potential der kapazitiven Messungen nur bedingt ausgeschöpft werden. Ausgewählte elektrische Messungen sind in Abbildung 17 dargestellt.



**Abbildung 17:** Elektrische Charakterisierung einer Heterokontaktsolarzelle von der Meyer Burger (Germany) AG.

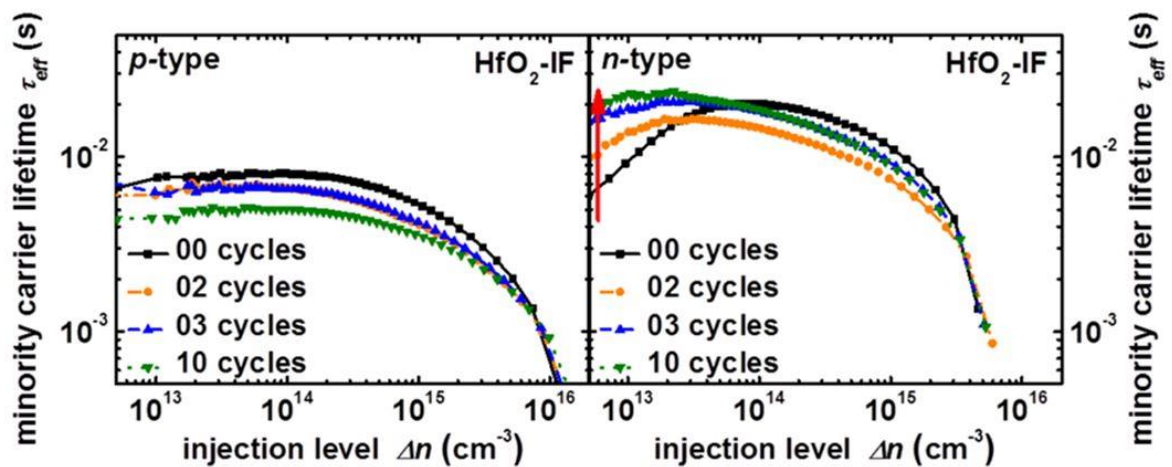
## Arbeitspaket 1.4: Entwicklung einer Frontseitenschicht

### Themenschwerpunkt 1: Dielektrische Passivierungsschichten

An der NaMLab gGmbH wurde die dielektrische  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Oberflächenpassivierung weiterentwickelt. Konventionelle  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Schichten ermöglichen eine sehr hochwertige Passivierung von p-dotiertem Silizium, allerdings ist die Passivierung von n-dotiertem Silizium (wie in der MWT-plus Solarzelle eingesetzt) ungenügend. Insbesondere im Bereich der niedrigen Ladungsträgerinjektion nehmen die Ladungsträgerlebensdauern in n-dotiertem Silizium stark ab. Der Niederinjektionsbereich ist jedoch der Arbeitsbereich der Solarzelle.

Die NaMLab gGmbH konnte eine symmetrische Passivierung demonstrieren. Diese symmetrische Passivierung basiert auf einer  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Schicht mit einer sub-nm dicken  $\text{HfO}_2$  Pufferschicht zwischen  $\text{Al}_2\text{O}_3$  und Silizium. Durch den Einsatz der Atomlagenabscheidung (ALD) konnte die  $\text{HfO}_2$  Schichtdicke in Stufen von 0.1 nm (= 1 ALD Zyklus) kontrolliert werden. Elektrische Messungen zeigten, dass die  $\text{HfO}_2$  Pufferschicht die negativen festen Ladungen im  $\text{Al}_2\text{O}_3$  kompensiert und so den Abfall der Ladungsträgerlebensdauern im Niederinjektionsbereich verhindert. Der Einfluss der Pufferschicht ist in Abbildung 18 gezeigt. Eine  $\text{HfO}_2$  Pufferschicht von 3 ALD Zyklen hat kaum Einfluss auf die Ladungsträgerlebensdauer in p-dotiertem Silizium, allerdings konnte die Ladungsträgerlebensdauer in

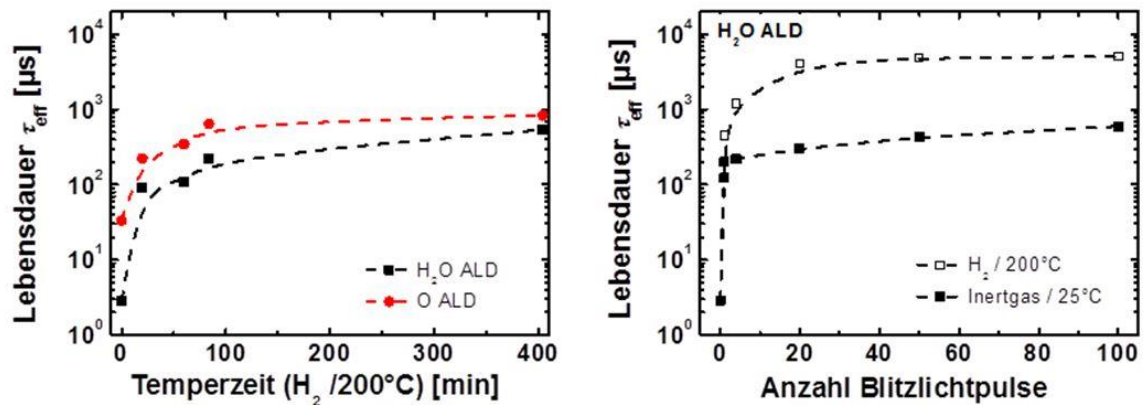
n-dotiertem Silizium um den Faktor 3 verbessert werden. Ähnliche Resultate konnten mit einer SiO<sub>2</sub> Pufferschicht erzielt werden. Dies ist insbesondere deshalb interessant, da SiO<sub>2</sub> in der Photovoltaik ein weitaus gebräuchlicheres Material als HfO<sub>2</sub> ist.



**Abbildung 18:** Symmetrische dielektrische Passivierung für p- und n-dotiertes Silizium. Eine sub-nm HfO<sub>2</sub> Pufferschicht (> 3 ALD Zyklen) an der Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Si Grenzfläche verbessert die Ladungsträgerlebensdauer von n-dotiertem Silizium ohne die Lebensdauer in p-dotiertem Silizium signifikant zu beeinflussen.

Die NaMLab gGmbH konzentrierte sich außerdem auf die Bereitstellung von Passivierungsschichten für ein beschränktes Temperaturbudget. Diese Schichten waren erforderlich für die Realisierung der Heterokontakt-MWT Solarzelle, basierend auf einer dielektrischen Frontseitenpassivierung (Prozessfluss in Tabelle 6). Standard Passivierungsschichten werden in einem Temperaturbereich von 350 – 400 °C aktiviert (post deposition anneal). Dies ist jedoch in dem anvisierten Prozessfluss nicht möglich, da der Passivierungsprozess erst nach der a-Si:H Abscheidung erfolgt. Aufgrund der Degradation von a-Si:H bei Temperaturen über 200 °C musste die Passivierungsschicht in einem Niedertemperaturprozess abgeschieden werden.

Dielektrische Niedertemperatur-Passivierungsschichten sind wissenschaftliches und technologisches Neuland. Zwei Ansätze wurden an der NaMLab gGmbH verfolgt. Zum einen wurden sehr lange Temperungen in H<sub>2</sub> Atmosphäre durchgeführt. Damit konnten auf floatzone Siliziumwafern mit 20 nm dicken Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Passivierungsschichten Lebensdauern über 100 µs erreicht werden [Abbildung 19 (links)]. Da sowohl die langen Prozesszeiten als auch die erzielten Ladungsträgerlebensdauern nicht optimal waren, wurde ein weiterer Ansatz verfolgt. Dabei wurden die Schichten in Zusammenarbeit mit dem Unterauftragnehmer IHM in unterschiedlichen Atmosphären mit Blitzlicht aktiviert. Mit diesem Ansatz konnten sehr gute Ergebnisse erzielt werden. Die Passivierungsschichten erreichten bereits nach 20 Lichtpulsen in H<sub>2</sub>-Atmosphäre Lebensdauern über 5 ms, einem Wert der vergleichbar mit der Standard-Temperung bei über 350°C ist [Abbildung 19 (rechts)]. Für den Prozess ist eine Kombination von kurzzeitigem Energieeintrag und H<sub>2</sub>-Atmosphäre entscheidend. Blitzen in Inertgas bei Raumtemperatur ergab nur Lebensdauern im 100 µs Bereich.



**Abbildung 19:** Vorversuche zur Demonstration einer Niedertemperatur (< 200 °C) Passivierung auf float-zone Siliziumwafern. Gute Lebensdauern konnten nach sehr langer H<sub>2</sub>-Temperung (links) als auch durch Blitzlichtaktivierung in H<sub>2</sub>-Atmosphäre (rechts) erreicht werden.

## Themenschwerpunkt 2: ZnO Spraypyrolyse

Ein anderer Ansatz für eine neuartige Frontseiten- (Passivierungs- & Antireflex-) Schicht wurde am FhG IWS verfolgt. Die Aufgabe bestand darin, (aluminiumdotierte) Zinkoxidschichten durch die Spray-Pyrolyse unter Atmosphärendruck-Bedingungen abzuscheiden [Abbildung 20 (links)]. Dieser Prozess hat ein hohes Kostensenkungspotential gegenüber den konventionellen ALD und PECVD Technologien, da kein Vakuum benötigt wird. Dazu wurden wasser- und/oder alkoholbasierte Lösungen aus Zink und Aluminium hergestellt. Folgende Precursoren wurden zur Herstellung einer (modifizierten) Zn-Lösung evaluiert:

- Zn-Precursor: Zinkacetat-Dihydrat, Zinknitrat-Hexahydrat
- Al-Precursor: Aluminiumnitrat, -chlorid und -acetylacetonat
- Lösungsmittel: Wasser, Ethanol, Methanol

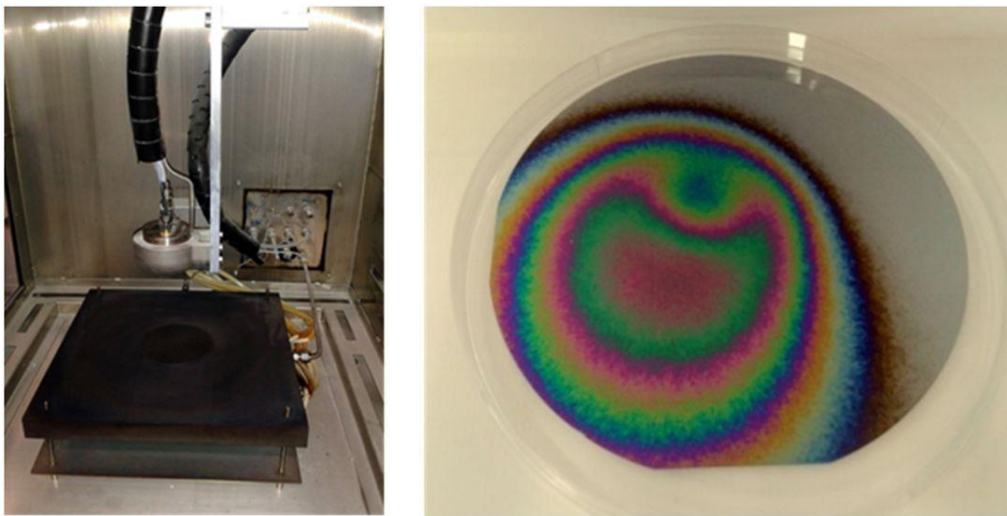
Aus diesen wurde die Precursurlösung: 0,2 M Zinkacetat-Dihydrat und 2 % Aluminium-Acetylacetonat in Methanol:Wasser:Essigsäure (3:1:0,04) ausgewählt. Die Substrate waren Cz-Silizium-Wafer (100) und als Precursordurchflussrate während der Spray-Pyrolyse wurde 1 ml/min gewählt. Mit einer in diesem Projekt angeschafften Breitstrahldüse (Abbildung 2) wurden die Zinkoxidschichten abgeschieden. Diese Düsenform hat den Vorteil, dass sie zur Beschichtung eines ganzen Solarwafers (156x156 mm<sup>2</sup>) nur in eine Richtung bewegt werden muss. Durch Zuschaltung der beiden Luftjets weitet sich der Sprühstrahl zu einem Fächer auf. Die Abscheidetemperaturen betragen 200 – 350 °C. Anschließend wurden die Proben unter folgenden Bedingungen getempert:

- Temperatur: 200 – 500 °C
- Atmosphäre: 97 % Ar, 3 % H<sub>2</sub>
- Haltezeit: 1 h

Ziel der Entwicklung war die Prozesstemperaturen unter 200 °C zu halten, da bei den MWT-plus Solarzellen durch höhere Temperaturen die amorphe Siliziumschicht geschädigt wird. Mit dieser Methode konnten folgende Ergebnisse erzielt werden:

- Die Schichten zeigen bei Abscheidetemperaturen von 200 °C sehr hohe spezifische Widerstände (vor Temperung  $3,1 \cdot 10^4 \Omega \text{cm}$ , nach Temperung bei 200 °C  $1,6 \cdot 10^2 \Omega \text{cm}$ )

- Die beste Schicht (Schichtdicke: 528 nm) erreicht einen spez. Widerstand von  $4,8 \cdot 10^{-2} \Omega \text{cm}$  bei einer Transmission von 89,5 % im sichtbaren Bereich, allerdings bei einer Abscheide- und Tempertemperatur von jeweils 300 °C.
- Die effektive Ladungsträgerlebensdauer, gemessen an der NaMLab gGmbH, beträgt homogen verteilt 40  $\mu\text{s}$  auf einseitig beschichteten Cz-Wafern (1 – 5  $\Omega \text{cm}$ , p-dotiert).
- Bei einer statischen Beschichtung entstehen inhomogene Schichten mit einer porösen Deckschicht [Abbildung 20 (links)], die durch Übergang zu einer dynamischen Beschichtung und der Zuschaltung der Luftjets homogenisierbar sind.
- XPS-Messungen zeigten, dass die Schichten aus stöchiometrisch zusammengesetztem ZnO bestehen und nur eine sehr geringe Aluminiumkonzentration aufweisen.
- Die Schichten sind nach Abscheidung teilkristallin; die Kristallinität nimmt mit steigender Tempertemperatur (bis 300 °C) zu.



**Abbildung 20:** Anlage zur Spraypyrolyse Beschichtung (links). Statisch abgeschiedene ZnO-Schicht (rechts).



**Abbildung 21:** In Spraypyrolyse-Kammer eingebaute Breitstrahldüse.

## **Arbeitspaket 1.5: Entwicklung neuartiger Metallisierungen**

### **Themenschwerpunkt 1: Niedertemperatur-Pasten**

Die für die Ausbildung des Heteroübergangs im MWT-plus Zellenkonzept notwendigen Dünnschichtprozesse limitieren die Maximaltemperatur der Folgeprozessschritte auf 200 °C. Für die Metallisierungspasten bedeutet dies, auf Hochtemperaturschritte zu verzichten. Kommerzielle Produkte, die diese Kriterien erfüllen, enthalten neben Metallpartikeln Polymere, welche bei Temperaturen unterhalb von 200 °C aushärten.

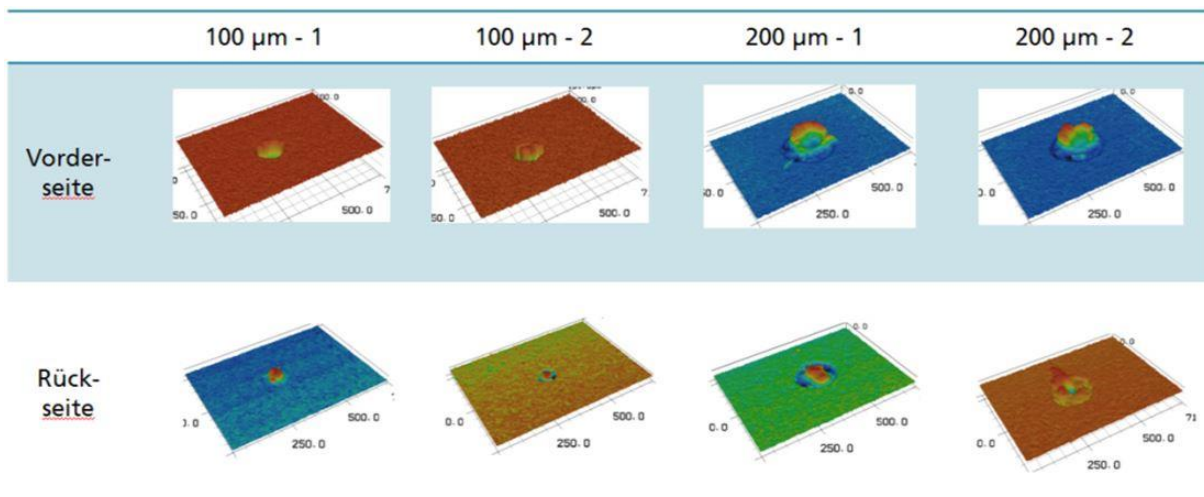
Im Rahmen dieses Themenschwerpunkts erfolgten seitens des FhG IKTS die Entwicklung und der Test von Metallisierungspasten für thermische Funktionalisierung bei 200 °C. Die Besonderheit dieser Pasten besteht darin, dass eine Sinterung reiner Metallpulver bei diesen niedrigen Temperaturen noch nicht erfolgt. Die elektrische Leitfähigkeit wird durch Perkolation von Leitpartikeln in einem thermisch härtbaren Polymer als isolierende Matrix realisiert und ist somit etwas geringer als bei gesinterten Metallschichten. Als Leitmaterialien wurden Silber und Kupfer verschiedener Partikelgrößen im Bereich von 2 – 15 µm, Partikelformen wie Flakes oder sphärische Teilchen und Klopfdichten zwischen 3,5 und 6,5 g/cm<sup>3</sup> getestet. Darüber hinaus wurden Alternativen, wie niedrigschmelzende Lote aus Kupfer-, Silber-, Zinn- und Indiumlegierungen (Schmelzpunkt < 220 °C) und magnesiumbasierte metallische Gläser mit einer Glasübergangstemperatur unter 200 °C evaluiert.

Die Haftung zum Substrat sowie den Zusammenhalt der Schicht gewährleistet ein Polymer, das in einem Temperaturbereich zwischen 150 und 200 °C aushärtet. Es wurden verschiedene kommerzielle Polymere ausgewählt und hinsichtlich Härtezeit und -temperatur getestet. Geeignete Polymere wurden mit leitfähigen Metallpulvern versetzt und zu Pasten verarbeitet. Die erreichten Feststoffgehalte lagen dabei mit > 80 Ma% über den theoretisch geforderten 72 % für eine ausreichende Perkolation in der Polymermatrix [xvi].

Als Ergebnis konnte eine silberhaltige Paste hergestellt werden, die innerhalb des gegebenen Prozessfensters aushärtet und deren Kontaktwiderstand zu ITO-beschichteten Testwafern, die durch den Projektpartner NaMLab gGmbH bereitgestellt wurden, mit ca. 1 mΩ\*cm<sup>2</sup> den kommerziellen Standards entspricht. Die Leitfähigkeit der Schicht liegt im Bereich kommerzieller Produkte und kann über die Pulverauswahl und Temperbedingungen beeinflusst werden. Die Eignung von Pasten, bei denen die Substitution eines Teils Metall durch niedrigschmelzende Legierungen erfolgte, wird im Rahmen des AP 2.3 an HJT-Zellen getestet.

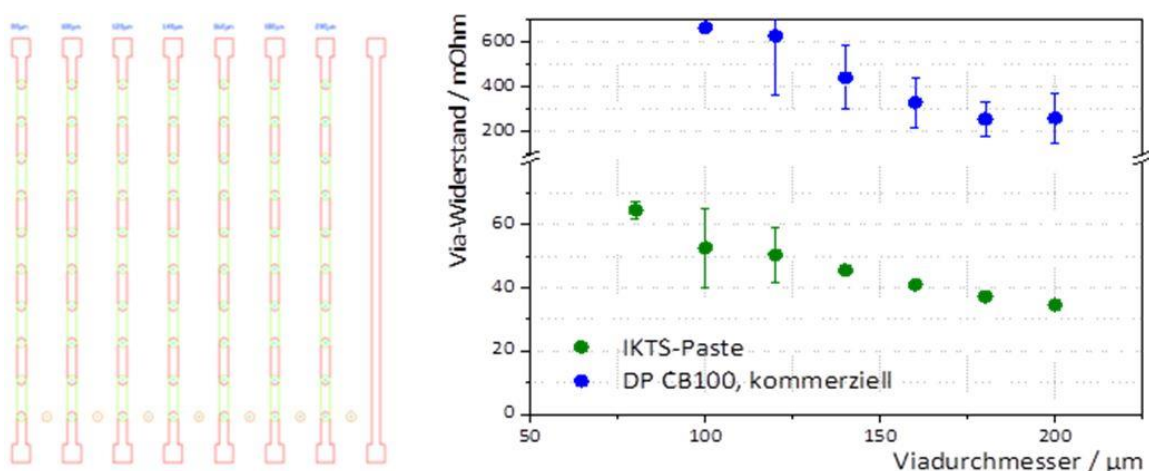
Des Weiteren wurden Pasten entwickelt, die sich zur Durchkontaktierung von Vorder- zur Rückseite einer MWT-Zelle eignen. Hierfür wurde eine Teststruktur entworfen, die Vias verschiedener Durchmesser beinhaltet. Mit einer am FhG IKTS entwickelten Paste konnten nach intensiver Anpassung von Pastenrheologie und Druckparametern Vias zwischen 100 und 200 µm Durchmesser fehlerfrei gefüllt werden. Die gefüllten Via-Metallisierungen wurden lasermikroskopisch von Vorderseite und Rückseite vermessen (Abbildung 22). Es konnte nachgewiesen werden, dass eine vollständige Via-Füllung im Testlayout erfolgreich war.





**Abbildung 22:** Ergebnis des Füllstandes von 100 und 200 µm breiten Vias nach der Metallisierung mit einer FhG IKTS-Paste und Härtung bei 200°C für 5 min.

Anschließend wurden die Vias vorder- und rückseitig kontaktiert [Abbildung 23 (links)], um die Widerstände zu vermessen. Das Ergebnis ist in Abbildung 23 (rechts) dargestellt und zeigt, dass der Widerstand innerhalb eines Vias abhängig von dessen Durchmesser zwischen 35 und 65 mΩ liegt (grüne Symbole). Im Vergleich wurde eine kommerzielle Via-Füllpaste (DuPont CB100; Abbildung 23 (rechts) blaue Symbole) getestet. Diese weist bei gleichen Prozessbedingungen einen signifikant höheren Widerstand – durchmesserabhängig – von > 200 mΩ auf.



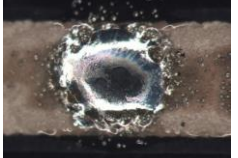
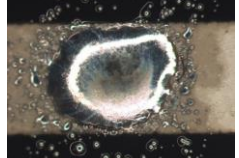
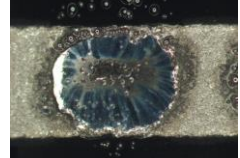
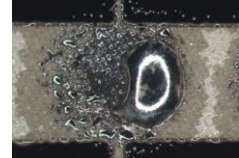
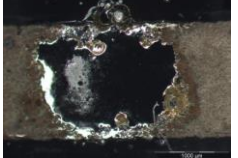
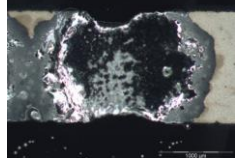
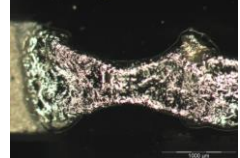
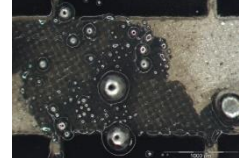
**Abbildung 23:** Vialayout für Testwafer inkl. Vorder- und Rückseitenkontaktierung (links). Via-Widerstand in Abhängigkeit des Viadurchmessers (rechts) einer kommerziellen Paste (Blau) und einer FhG IKTS-Paste (grün).

## Themenschwerpunkt 2: Zellmontage & Modulverschaltung

Die Montierbarkeit von Niedertemperatur-Metallisierungen stellt neben der elektrischen Leitfähigkeit eine Kerneigenschaft der Schicht dar. Nur wenn diese gegeben ist kann eine Verschaltung der einzelnen Solarzellen zu Solarmodulen erfolgen. Die Bestimmung der Montierbarkeit von kommerziellen und am FhG IKTS entwickelten Metallisierungen erfolgte anhand neu entwickelter bzw. aus der Elektronikfertigung adaptierten Prüfmethoden. Die Auswahl geeigneter Fügwerkstoffe erfolgte unter Berücksichtigung der maximal zulässigen Prozesstemperatur von 200 °C. In diesen Temperaturbereich können sowohl Lotwerkstoffe als auch elektrisch leitfähige Klebstoffe eingesetzt werden. Beurteilt wurden die Montageeignung (Kontaktierbarkeit der Metallisierung durch den Montagewerkstoff), Montagemöglichkeit (Erzeugbarkeit der für die Kontaktausbildung benötigten Bedingungen

an der Kontaktstelle) und Montagesicherheit (Zuverlässigkeit der erzeugten Verbindungsstelle gegenüber zu erwartenden Betriebsbedingungen).

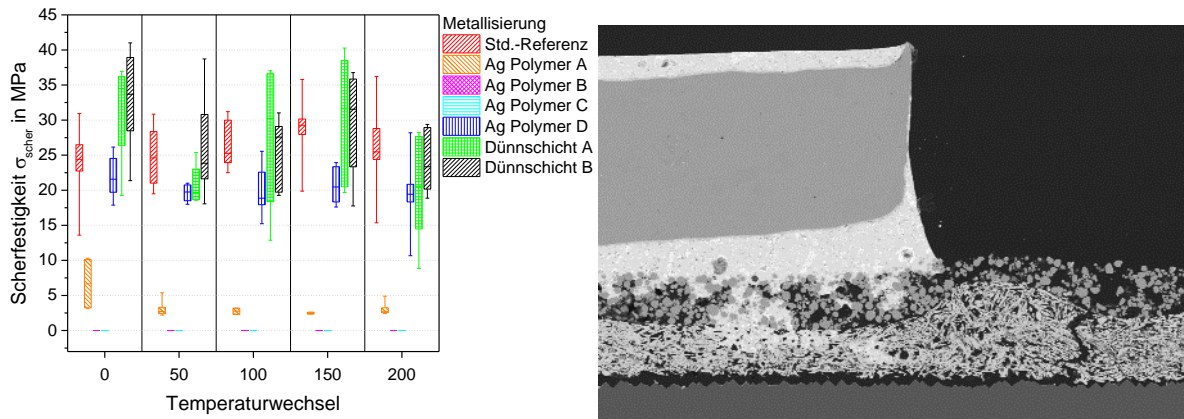
Die Montageeignung durch Lotwerkstoffe wurde durch Lotbadtauchuntersuchungen oder Umschmelzanalysen in Anlehnung an bestehende Normungen aus dem Elektronikbereich (z.B. DIN EN 41850-2) evaluiert. Beispielergebnisse nach Umschmelzanalyse von Silberpolymerpasten sind in Abbildung 24 dargestellt.

Paste Lot	Ag Polymer A	Ag Polymer B	Ag Polymer C	Ag Polymer D
SnBi 170 °C / 5 s				
SnAgCu 250 °C / 5 s				

**Abbildung 24:** Lotspreitungsanalyse nach Umschmelzversuch auf Silber Polymerpasten unter Verwendung verschiedene Lotwerkstoffe / Lötbedingungen.

Verwendet wurden verschiedene Lotwerkstoffe mit z.T. eine Schmelztemperatur > 200 °C um die Temperaturbeständigkeit der Metallisierungen zu beurteilen. Aus Abbildung 24 sind verschiedene Lotbenetzungsergebnisse ersichtlich. Diese reichen von sehr guter / guter Lotspreitung (Ag Polymer A), über partieller/vollständige Schichtablösung (Ag Polymer B und C) bis hin zur Nichtbenetzbarkeit der Metallisierung (Ag Polymer D). Die Ergebnisse wurden mit der Metallisierungszusammensetzung korreliert und in folgenden Entwicklungsschritten berücksichtigt.

Die Montagesicherheit wurde in Anlehnung an die IEC 61215 beurteilt. Die darin beschriebene Temperaturwechselprüfung ist Prüfkriterium der Bauartzulassung für jedes Solarmodul und damit zwingendes Prüfkriterium für die Fügestellenzuverlässigkeit. Als ermittelbare Prüfgröße wurde die Fügestellenscherfestigkeit  $\sigma_{\text{scher}}$  ausgewählt. Gemessen wurde diese an auf Heterojunction Wafer gedruckte Metallisierungsstrukturen, auf welche mittels Kolbenlötung vorverzinnte Kupferribbons montiert wurden. Die zuvor ermittelte Löteignung der jeweiligen Metallisierungen wurde in der Lotwerkstoffauswahl berücksichtigt. Abbildung 25 - links zeigt die Festigkeitsergebnisse in Abhängigkeit von der Metallisierung nach Temperaturwechselprüfung.



**Abbildung 25:** Lotspreitungsanalyse nach Umschmelzversuch auf Silber Polymerpasten unter Verwendung verschiedener Lotwerkstoffe / Lötbedingungen (links); Fügestellenbruch zwischen Polymer-Metallisierung und Substrat nach Temperaturwechsel (rechts).

Die Fügestelle ist unter allen Alterungszuständen am Interface zwischen Substrat und Metallisierung gebrochen (Abbildung 25 - rechts). Dabei zeigte ein Teil der Proben (Ag Polymer A – C) bereits initial sehr geringe Festigkeiten. Dies wurde auf unzureichender adhäsiver Anbindung des Polymers an das Substrat zurückgeführt und hinsichtlich Polymerauswahl in folgenden Pastenentwicklungen berücksichtigt. Es konnten Metallisierungs-Fügewerkstoffkombinationen definiert werden, mit welchen eine Festigkeit > 20 MPa erreicht wurden. Als Montagemöglichkeiten wurden basierend auf einer umfassenden Literaturrecherche die rückseitige Montage auf Ribbons oder auf Kontaktfolien definiert. Diese Konzepte werden in Arbeitspaket 2.3 betrachtet.

### Themenschwerpunkt 3: Temperung in inerten Trocknungsatmosphären

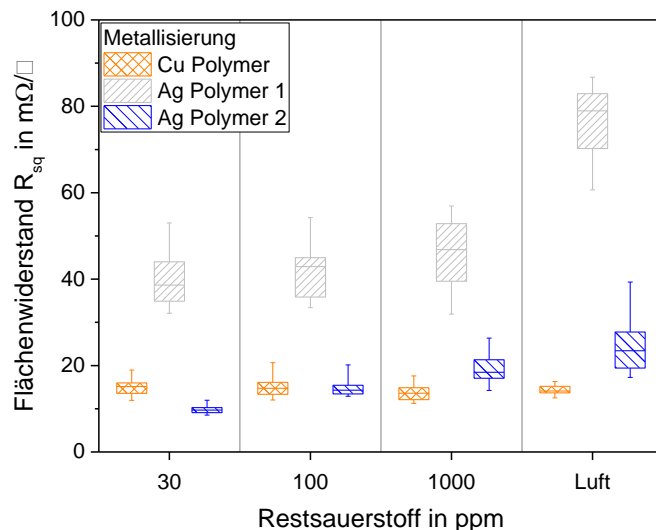
Im Rahmen der Arbeitspakete erfolgte die systematische Analyse des Einflusses einer inerten Prozessatmosphäre während der Polymerpastenhärtung. Ziel war es hierbei den technologisch bedingten höheren Widerstand von kommerziellen bzw. entwickelten Polymerpasten durch verbesserte Härtingsbedingungen in konkurrenzfähige Widerstandsbereiche zu eingebrannten Dickschichtpasten zu überführen.

Zur analytischen Bewertung des Einflusses der Härtingsbedingungen auf die Schichteigenschaften erfolgten Trocknungsversuche mit kommerziell verfügbaren Polymerpasten. Der Siebdruck und der Härtingsprozess erfolgten bei Rehm Thermal Systems GmbH, nach in Zusammenarbeit mit dem FhG IKTS, festgelegten Versuchsplänen. Dabei wurden verschiedene Trocknungsprofile auf Heterojunction-Solarzellen, die in der Meyer Burger (Germany) AG Pilotlinie hergestellt wurden, getestet:

- Variation der Trocknungsdauer
- Variation des Restsauerstoffs
- Variation des Wärmeübertragungsmediums (Infrarot, Konvektion)

Die Auswertung der Versuche erfolgte in enger Kooperation zwischen Rehm Thermal Systems GmbH und dem FhG IKTS. Die im Rahmen der Untersuchungen ermittelten Härtingsprofilbedingungen werden von der Rehm Thermal Systems GmbH zur Entwicklung des Inertgasofens in AP 2.4 verwendet. Aus den Untersuchungsergebnissen konnte ein überwiegend positiver Einfluss der inerten Schichttrocknung auf die elektrischen

Eigenschaften der Metallisierung ermittelt werden (vgl. Abbildung 26). Insbesondere konnte gezeigt werden, dass bereits im Markt befindliche Polymerpasten auf Silberbasis durch Inerthärtung um bis zu > 50 % in ihren elektrischen Eigenschaften verbessert werden konnten (vgl. Abbildung 26 - Ag Polymer 1). Als Ursache für diesen Effekt wurde die verstärkte Polymerisation des Pastenbinders als dominanter Effekt gegenüber der Oxidationsminderung der Wirkphasenpartikel bestimmt. Diese Ergebnisse wurden in der Polymerauswahl für die Pastenentwicklung berücksichtigt.



**Abbildung 26:** Flächenwiderstand unterschiedlicher Polymerpasten in Abhängigkeit von der Restgaskonzentration während des Trocknungsprozesses.

## Arbeitspaket 1.6: Abluftreinigung

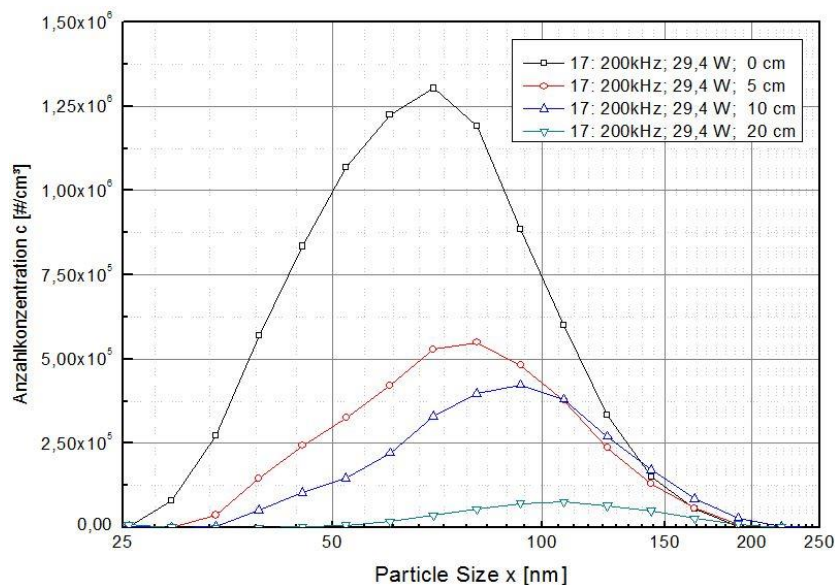
In diesem Arbeitspaket führte die ILK gGmbH Abluftanalysen an einem Trocknungsöfen für Druckpasten für Solarwafer sowie Abluftanalysen bei der Laserbearbeitung von Solarwafern durch.

Die ILK gGmbH führte experimentelle Abluftanalysen an den Testanlagen zur Pastentrocknung bei Rehm Thermal Systems GmbH in Blaubeuren und im eigenen Labor durch (Abbildung 27). Ziel war dabei die Zusammensetzung und die Volumenströme der Schadgase zu analysieren. Die Abluft der Pastentrocknung wurde hinsichtlich der organischen Verbindungen (VOC) untersucht. Diese Arbeiten wurden begleitend zur Prozessentwicklung durchgeführt um neben funktionellen Parametern auch die Energiebilanz und die Schadstoffemission der Prozesse zu beurteilen. Die Untersuchungen zum Gesamtstaub im Rohgas beim Pastendruck dokumentieren eine sehr niedrige Konzentration für den Druck von Fingerprints und Busbars. Für einen Vollflächendruck werden deutlich höhere Konzentrationen von bis zu 32 mg/m<sup>3</sup> erreicht. Die Beladung der Trocknerabluft mit Kohlenwasserstoffen ist nur beim Vollflächendruck als kritisch einzuschätzen. Hier werden hohe Konzentrationen von bis zu 45 mg/m<sup>3</sup> erreicht. Im Rohgas (Trocknerabluft) werden Partikelkonzentrationen bis zu 6000 Partikel/cm<sup>3</sup> für Partikel kleiner als 50 nm erreicht. Es ist von einer Tröpfchenbildung aus der Gasphase von Kohlenwasserstoffen auszugehen.



**Abbildung 27:** Trocknungsofen von Rehm Thermal Systems GmbH (links) mit Analysetechnik von der ILK gGmbH (rechts).

Untersuchungen zur Emission und Filterung von Siliziumstäuben fanden in enger Kooperation mit der ULT AG am FhG IWS statt. Welchen Einfluss die Entfernung des Erfassungselements von der Quelle der Si-Partikel hat, demonstriert die folgende Abbildung 28. Die Partikelemission hat einen typischen Peak zwischen 50 und 100 nm. Deutlich wird hierbei, je näher die Erfassung an der Quelle erfolgt, desto mehr Si-Staub gelangt in das Abscheidersystem und verschmutzt nicht das Arbeitsumfeld des Wafers. Dies hat einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität der weiteren Prozessierung und damit auf die Qualität des Wafers.



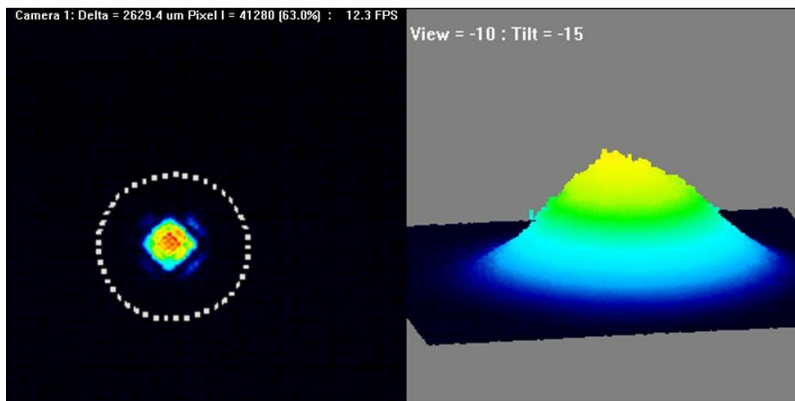
**Abbildung 28:** Abhängigkeit der Partikelerfassung vom Abstand zur Quelle

## Arbeitspaket 2.1: Entwicklung laserdotierter selektiver Emittter (SE)

### Themenschwerpunkt 1: Laserdotierung von Si-Oberflächen

In Vorversuchen (siehe Arbeitspaket 1.2, Themenschwerpunkt 2) hat sich die Nutzung eines gepulsten IR-Lasers (ps-Pulse, Wellenlänge 1064 nm) als vorteilhaft für eine oberflächen-nahe Dotierung erwiesen. Niederenergetische Pulse und eine hohe Repetitionsrate (8 MHz) führen zum Aufschmelzen des Siliziums durch Wärmeakkumulation. Die Gaußverteilung der Intensitätsverteilung des Laserstrahls führt zu einer erhöhten Temperatur im Zentrum der Bearbeitungsfläche und damit zu einer Emission von agglomerierten Silizium-Partikeln (Durchmesser > 1  $\mu\text{m}$ ).

Zur Vermeidung bzw. Reduzierung dieser Partikelemission wurden Untersuchungen mit diffraktiven optischen Elementen (DOE) durchgeführt, welche eine Änderung der Energieverteilung in der Fokusposition ermöglichen. Für die Versuche wurde ein sogenannter Gauß-to-TopHat Konverter der Firma Topag verwendet. Die Justage erfolgte mit Hilfe einer Strahlanalyse Kamera WinCamD von DataRay, welche im Rahmen des Projektes angeschafft wurde. Es hat sich gezeigt, dass die Justage des DOE sehr sensitiv ist und nur mit Hilfe einer Analysekamera erfolgreich durchgeführt werden kann. Abbildung 29 links zeigt, dass der Laserstrahl mit Hilfe des DOE's zu einem Quadrat konvertiert und die Energiespitze im Zentrum des Spots etwas abgesenkt wird [Abbildung 29 (rechts)].



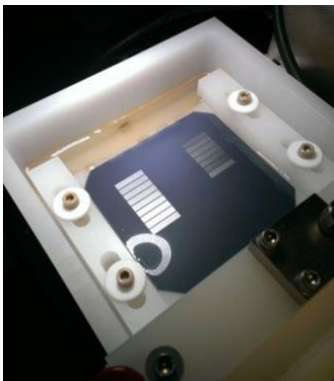
**Abbildung 29:** Energieverteilung im Laserfokus mit dem Gauß-to-TopHat DOE, (links) Draufsicht und (rechts) 3D Ansicht.

Ein reales Top-Hat Profil war mit dem DOE leider nicht erreichbar. Als Ursache dafür kann die stärkere Abweichung des realen Laserstrahls im Rohstrahldurchmesser und der Strahlqualität aus den Sollvorgaben des DOE angegeben werden. Die Auslegung eines DOE erfolgt anhand des Rohstrahldurchmessers und der Strahlqualität. Der Akzeptanzbereich für mögliche Abweichungen seitens des Lasers beträgt beim vorliegenden Element nur 5 – 10 %. Untersuchungen mit dem DOE zeigten vergleichbare Dotierergebnisse zum reinen Gaußprofil. Die Partikelemission konnte etwas reduziert aber nicht ganz vermieden werden.

In Vorversuchen wurden verschiedene Methoden der Dotiermedienzuführung evaluiert, um eine Aufkonzentration jener Partikel im Dotiermedium zu vermeiden, da dies zu einer Laserstrahlableitung führen würde. Das kontinuierliche Überströmen der Waferoberfläche mit verdünnter Phosphorsäure (50 %ig) mit geringer Viskosität erwies sich als geeignet, die während des Laserprozesses emittierten Partikel von der Bearbeitungsstelle abzuführen. Bei ersten Laborversuchen zeigte sich, dass Strömungsturbulenzen im Dotiermedium den Laserstrahl ablenken und damit Layout-Fehler erzeugt wurden, die bei späteren

Kontaktierungsversuchen beim Projektpartner FhG IKTS zu Problemen führten. Zur Behandlung kompletter Solarwafer (156x156 mm<sup>2</sup>) wurde eine Vorrichtung (Abbildung 30) zum Laserdotieren mit einer kontinuierlicher Zufuhr des Dotiermediums entworfen, konstruiert, aufgebaut und in Betrieb genommen. Ein definiert einstellbarer Verkippungswinkel des Wafers, eine geregelte Zufuhr des Dotiermediums sowie eine definiert gestalteter Strömungskanal ermöglichen eine turbulenzfreie Strömung über dem Wafer. Dieser ist Voraussetzung für eine fokussierte Einkopplung des Laserstrahls und das Erzeugen eines fehlerfreien Layouts. Die Filtrierung der Phosphorsäure war nötig, um die vom Laserstrahl ablatierten Silizium Partikel aus dem Dotiermedium zu entfernen. Phosphorsäureresistente Glasvliese (Maschengröße 5 – 10 µm) an der Ansaugstelle des Auffangbeckens mit einer mechanischen Filterhalterung fingen die Partikel auf. Ein Einfluss der Durchflussmenge oder Füllstand des Dotiermediums auf die Dotierung konnte nicht nachgewiesen werden.

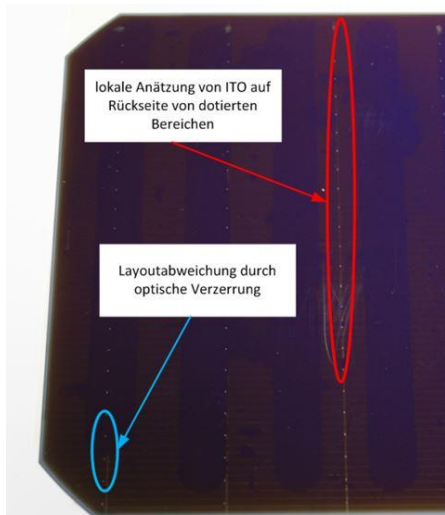
Mit der beschriebenen Vorrichtung wurden Teststrukturen gefertigt, die am FhG IKTS für Kontaktierungsversuche eingesetzt wurden (siehe AP 2.3). Im weiteren Projektverlauf wurde mit dieser Vorrichtung die MWT-Hybrid Zelle mit dielektrischer Frontseitenpassivierung prozessiert.



**Abbildung 30:** Laboraufbau zum kontinuierlichen, homogenen Überströmen des Wafers mit dem Dotiermedium.

Die Dicke der Passivierungsschicht lag zwischen 36 und 40 nm. Nach 30 min Dotierdauer wurde eine Verringerung der Schichtdicke auf 25 nm (Ätzrate von 0,4 – 0,5 nm/min) nachgewiesen. Damit einher ging eine Verschlechterung der Ladungsträgerlebensdauer um bis zu 35 % in Abhängigkeit von der Ausgangslebensdauer. Als alternatives Passivierungsmaterial wurde Hafniumoxid (HfO<sub>2</sub> als Ätzstopp) eingesetzt, da es sich chemisch inert gegenüber den meisten Säuren verhält. Versuche haben gezeigt, dass durch 50 %ige Phosphorsäure keine signifikante Schichtreduktion erfolgt.

Die Untersuchungen zum selektiven Laserdotieren wurden immer an einseitig prozessierten Wafern durchgeführt, welche auf der Rückseite keine a-Si:H und ITO Beschichtungen aufwiesen. Bei der Prozessierung der funktionalen Hybrid-Zellen wurde festgestellt, dass es zum lokalen Angriff auf die ITO Schicht während des Dotierprozesses kommt. Verursacht wird dieses Verhalten durch ein lokales Aufheizen der Phosphorsäure auf der Waferrückseite. Auf Grund einer Waferaufnahme-Fingerstruktur, eingebracht zum leichteren Ablösen des Wafers, gelangt beim Wechsel der Wafer Phosphorsäure in die Zwischenräume. Durch den Wärmeeintrag beim Dotierprozess kommt es bei diesen nicht abgedeckten Flächen zu einer verstärkten Anätzung des ITOs auf der Waferrückseite. Weiterhin kam es zu Abweichungen zwischen dem Dotierlayout und dem Via-Layout beim Dotierprozess innerhalb eines Bearbeitungsfeldes (Abbildung 31).



**Abbildung 31:** Rückseite von Laserdotierten Hybridwafer mit Anätzungen und Layoutabweichungen.

Für eine zusätzliche physikalische Zwangsbeförderung der Phosphorsäure wurde der Dotieraufbau angekippt, so dass innerhalb eines Bearbeitungsfeldes (160x160 mm<sup>2</sup>) ein Höhenunterschied von ca. 9 mm vorlag. Dabei kommt es zu optischen Verzerrungen, welche in vertikaler Richtung durch skalieren ausgeglichen werden konnten. Der Ausgleich in horizontaler Richtung war nicht möglich. Dies bedingte eine Abweichung der vertikalen Busbarstruktur zu den Via-Positionen.

Auf Grund des festgestellten Rückseitenangriffes beim Dotieren wurde die Dotierung mit dem Laser mit grüner Wellenlänge wiederholt, da diese eine stärkere Absorption in Si aufweist und komplett im Wafermaterial absorbiert wird. Gleichzeitig stand bei dieser Wellenlänge eine maximale Brennweite von 163 mm zur Verfügung, was eine deutlich kürzere Rayleighlänge als beim Standard-IR-Prozess (255 mm Brennweite) zur Folge hat. Daher wurde die Dotierkontur in 22 Einzelkonturen, bei der jeweils die Fokusposition nachgeführt wird, zerlegt. Dieser Schritt bedingt eine deutlich erhöhte Prozessdauer im Vergleich zur IR-Bearbeitung. Eine starke Schädigung der Passivierung durch den Ätzangriff bei langen Prozessdauern konnte durch das Aussparen der Busbar-Bereiche im umzusetzenden Dotierlayout erreicht werden, welches die Prozesszeit um ca. 40 % reduziert hat.

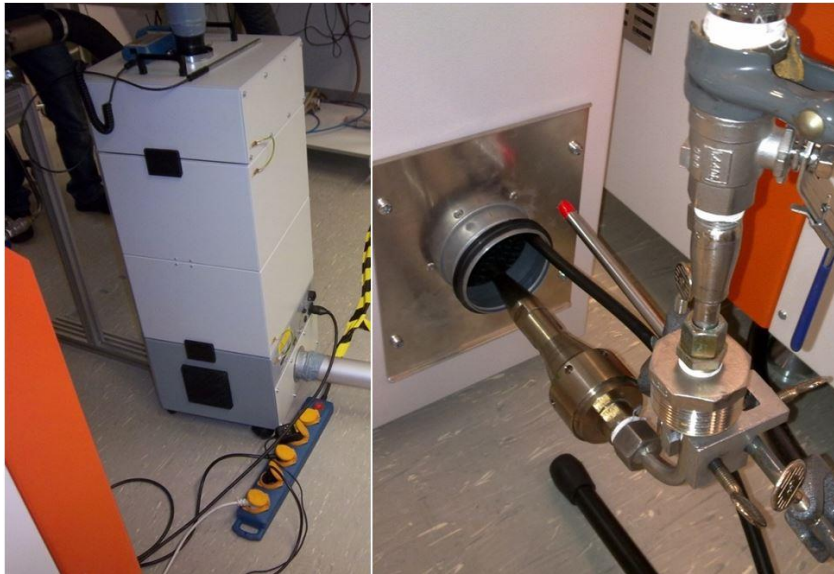
Weiterführende Untersuchungen sollten eine bessere Abstimmung der Frontseitenpassivierung mit der Dotierquelle beinhalten, mit dem Ziel eine chemische Beeinflussung der Passivierungsschicht während des Laserdotierens auszuschließen. Am günstigsten wäre aber eine Überarbeitung der Dotiervorrichtung, so dass die Säure mit der Waferrückseite nicht mehr in Kontakt kommt und diese auch beim Wechseln des Wafers trocken bleibt.

## **Themenschwerpunkt 2: Analyse von Laserbrauch**

In der Photovoltaikindustrie spielen vor allem Ultrakurzpulslaser eine entscheidende Rolle. Um ein Filtersystem optimal auslegen zu können, muss bekannt sein, durch welche Eigenschaften sich eine Emissionsquelle auszeichnet. Dafür muss Wissen über die Größe, Form und Zusammensetzung vorhanden sein. Aus diesem Grund, wurden an einer Ultrakurzpulslaseranlage, die im fs-Bereich betrieben wird, Untersuchungen gemacht. Diese fanden am FhG IWS mit einer Filtereinheit der ULT AG statt. Zum einen wurde die Partikelfraktion unter der Verwendung eines Mobilitätsspektrometers bestimmt und zum anderen wurden die abgeschiedenen Partikel mit Hilfe eines Rasterelektronenmikroskops begut-

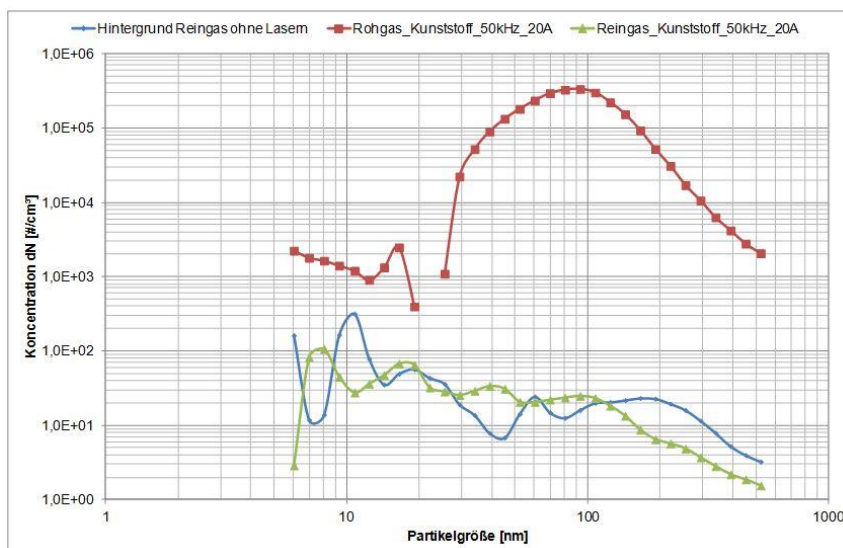


achtet. Die Gasanalysen wurden vom ILK gGmbH durchgeführt. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 32 zu sehen.

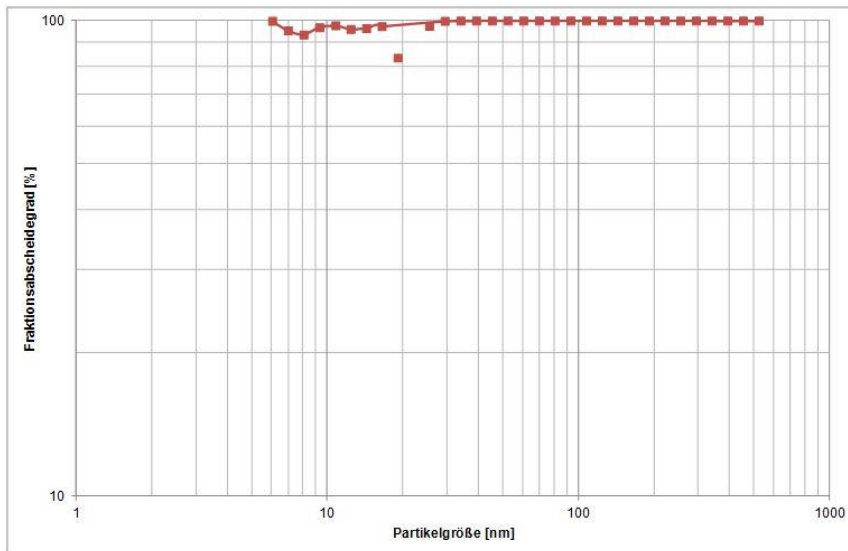


**Abbildung 32:** Versuchs-Abscheider (links) und separate Staubprobenahme am Reingas-Ausblasstutzen (rechts).

In den Versuchen wurden Edelstahl, Silizium, Kunststoff und Keramik bearbeitet. Das dabei gemessene Spektrum zeigt Abbildung 33. Es ist zu erkennen, dass sich das mittlere Partikelspektrum in einem Bereich von ca. 100 nm befindet. Partikel dieser Größe sind für den menschlichen Organismus besonders kritisch, denn ab einer Größe von ca. 300 nm kann der Staub die Lunge-Blutbarriere überwinden und in das Nervensystem eindringen. Zur Gewährleistung eines sicheren Betriebs muss auch der Abscheidegrad der verwendeten Anlage bekannt sein. Hierzu wurde zusätzlich auf der Reingasseite das Partikelspektrum aufgenommen. Der erhaltene Abscheidegrad ist in Abbildung 34 zu sehen.

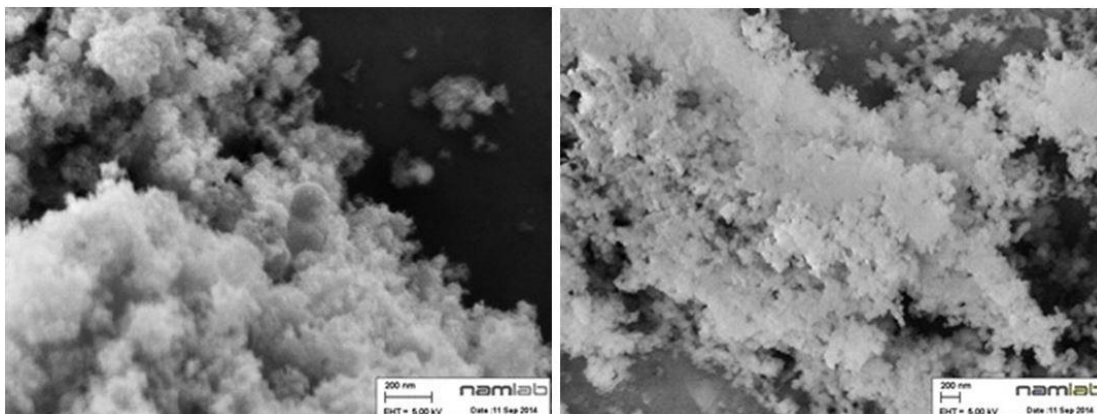


**Abbildung 33:** Partikelspektrum Rohgas bei der Kunststoffablation.



**Abbildung 34:** Abscheidegrad bei der Ablation von Kunststoff.

Aus dem Vergleich von Reingas und Rohgas ergibt sich ein Abscheidegrad von > 95 %. Das neuartige Filterkonzept von ULT AG hat sich damit als geeignet für die Filterung von Abluft der Laserprozessierung erwiesen.



**Abbildung 35:** REM-Aufnahme von Stahlpartikeln nach einer fs-Laserablation (links) und von Kunststoffpartikeln nach einer fs-Laserablation (rechts).

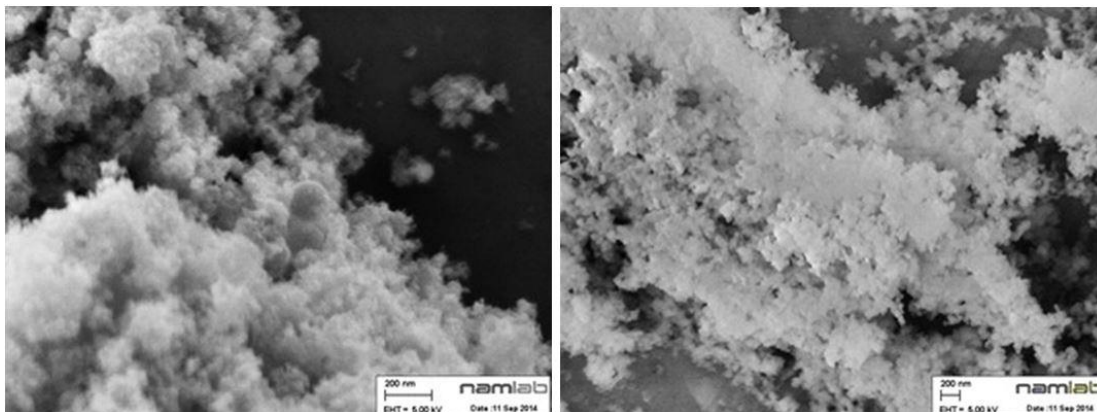


Abbildung 35 zeigt zwei REM-Aufnahmen von gefilterten Partikeln. Bei Kunststoff, wie auch bei Stahl, sind durch die kurze Pulsdauer verkettete, nicht geschmolzene Partikel entstanden, wie es aufgrund des sehr geringen Wärmeeintrages während der Laser-Bearbeitung zu erwarten ist.

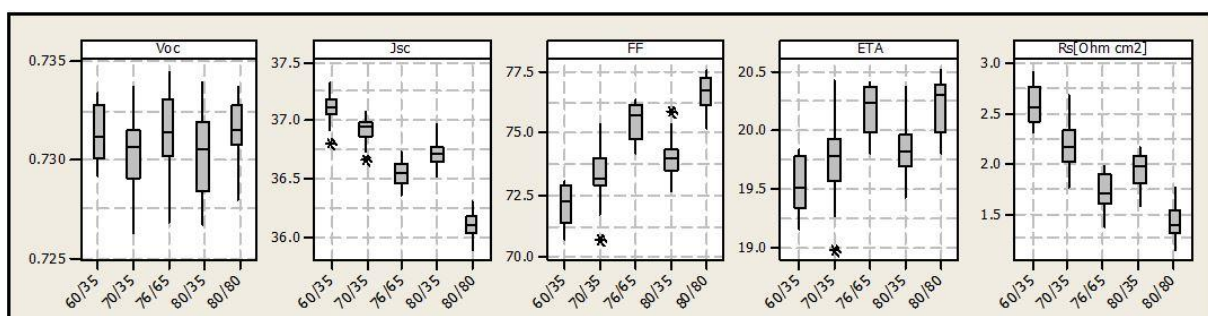
## Arbeitspaket 2.2: Rückkontakt-Heterosolarzelle

Die Entwicklung der MWT-plus Solarzelle erfordert, den Emitter auf die Rückseite der Solarzelle zu transferieren. Dieser Schritt ist hochinnovativ, denn in herkömmlichen Solarzellen mit Heterokontakt- oder diffundierten Emitter befindet sich der Emitter auf der Vorderseite der Zelle. Ein Rückseiten-Emitter hat zum einen den Vorteil, dass die optischen Optimierungen der Vorderseite von den elektrischen Anforderungen der Frontseiten-schichten (a-Si:H und TCO) entkoppelt werden; zum anderen lassen sich auf diese Weise Probleme im Bereich der Transferlöcher (Vias) umgehen.

Als erster Schritt hin zum MWT-plus Zelldesign, wurde im Rahmen des Projektes der Emitter der von der Meyer Burger (Germany) AG entwickelten Heterokontaktzelle von der Vorderseite auf die Rückseite der Zelle verlagert. Der symmetrische Aufbau einer Heterokontakt-Solarzelle bietet die Möglichkeit, ohne wesentliche Prozessänderungen, den Schritt von einem vorderseitigen zu einem rückseitigen Emitter zu vollziehen.

Durch einfaches „Wenden“ des alten Zelldesign wurde der Emitter von der Vorderseite auf die Rückseite transferiert. Beim alten Design hatte die vorderseitige TCO-Schicht die Aufgaben, sowohl die Reflexion vorderseitig zu minimieren bzw. die Transmission ausreichend zu gewährleisten als auch die notwendige Querleitfähigkeit zwischen den Fingern sicherzustellen, um die Serienwiderstandsverluste ausreichend niedrig zu halten. Da jede Erhöhung der Transparenz durch zusätzlichen Sauerstoffanteil gleichzeitig zu widerstandsbedingten Leistungsverlusten führt, musste hierbei ein Kompromiss gefunden werden, welcher weit entfernt von den jeweiligen Optima liegt. Beim neuen Design sind diese Eigenschaften weitestgehend entkoppelt. Die Optimierung der Vorderseite wird somit wesentlich vereinfacht, da die Optimierung sich fast ausschließlich auf ihre optischen Eigenschaften und den Barriere-Widerstand zum n-a-Si:H beschränkt. Die Anforderungen an die rückseitige TCO-Schicht sind zwar gestiegen, allerdings vorwiegend an die elektrischen Eigenschaften (Barriere zum p-a-Si:H und Querleitfähigkeit). Da der Großteil des relevanten Lichtspektrums bereits während des ersten Durchgangs durch den Siliziumwafer absorbiert wird, haben die optischen Eigenschaften der TCO-Schicht auf der Rückseite weit weniger Einfluss als auf der Vorderseite.

Für die Optimierung der Rück-Emitter-Heterokontakt-Zelle wurden diverse Prozess- und Schichtanpassungen bei der Meyer Burger (Germany) AG durchgeführt. Beispielhaft ist hier ein Metallisierungssplit gezeigt, der darauf abzielt, die Fingerdicke und –anzahl für das geänderte Zelldesign anzupassen. Wie in Abbildung 36 präsentiert, zeigte sich, dass bei abnehmender Breite der Metallisierungsfinger die Kurzschlussstromdichte ( $J_{sc}$ ) steigt (vgl. 80/80 zu 80/35), gleichzeitig aber der Füllfaktor sinkt, so dass im Endeffekt der Wirkungsgrad (ETA) sinkt. Ebenfalls gut zu erkennen ist die gegenläufige Abhängigkeit von  $J_{sc}$  und FF von der Anzahl der Finger bei gleicher, geringer Breite (60/35, 70/35 und 80/35).

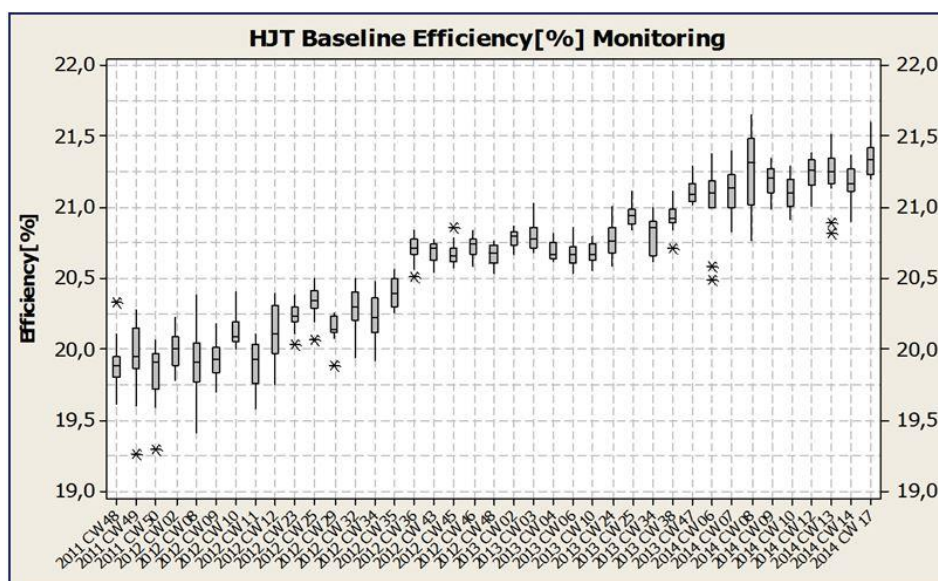


**Abbildung 36:** Zellparameter eines Experiments mit verschiedenen Fingeranzahlen (1. Zahl) und verschiedenen Fingerbreiten (2. Zahl).

Die Ergebnisse zeigen, dass für die hier verwendete Paste das Optimum bei ca. 76 Fingern mit einer jeweiligen Breite von 65  $\mu\text{m}$  liegt. Dies gilt jedoch nur für Solarzellen mit 5 Busbars und Fingerlängen von ca. 15 mm. Mit Hilfe des neuen Zelldesigns konnte eine Effizienz von 22,7 % auf 156x156  $\text{mm}^2$  erzielt werden. Die optimierten Rück-Emitter Heterokontakt-Zellen bildeten die Grundlage für die MWT-plus Solarzellen.

Ausgehend von den Ergebnissen aus AP 1.3 konnte der Rückseitenemitter in AP 2.2 für Heterokontakt-Zellen erfolgreich auf 156x156 $\text{mm}^2$ -Wafern umgesetzt werden. Die erfolgreiche Gestaltung des pn-Übergangs sowie der ausgezeichneten Passivierung durch intrinsisches, amorphes Silizium zeigt sich an den erreichten Leerlaufspannungen von bis zu 740 mV. Die stetige Weiterentwicklung der Technologie wird in Abbildung 37 anhand der Wirkungsentwicklung verdeutlicht.

Nach der erfolgreichen Etablierung der Rückseitenemitter auf 156x156  $\text{mm}^2$ -Wafern mit Durchschnittswirkungsgraden auf 5Busbar-Zellen von 21,7 % und für busbarlose Zellen 22,7 % (siehe Halbjahresbericht) wurde die Produktion von Referenz-HJT-Zellen und die Vorprozessierung für MWT-plus Zellen auf Grund der Integration neuer Beschichtungsanlagen (PECVD und PVD) vorübergehend ausgesetzt. Zusätzlich wurde der Referenzprozess auf einer neuen Siebdruckanlage durchgeführt.



**Abbildung 37:** Monitoring in der R&R Pilotlinie. Durch kontinuierliche Prozessentwicklung konnten die Solarzellenwirkungsgrade stetig gesteigert werden.

Im weiteren Verlauf des Projektes wurde die HJT-Zelle ausschließlich busbarlos und bifazial ausgeführt. Dadurch konnte der Sputterprozess zu Gunsten eines Rückseitensiebdruckes eliminiert werden, was die Kostenstruktur der Zelle enorm verbessert. Die nun benötigte dickere Ausführung des Rückseiten-TCOs kam auch den MWT-Zellen zu Gute, da der p-a-Si:H Layer dadurch besser geschützt bzw. die Zelle robuster ist. Im Rahmen dieser neugestalteten Rückseite wurden Experimente zur Gestaltung des Rückseitenkontaktes durchgeführt (Abbildung 38).

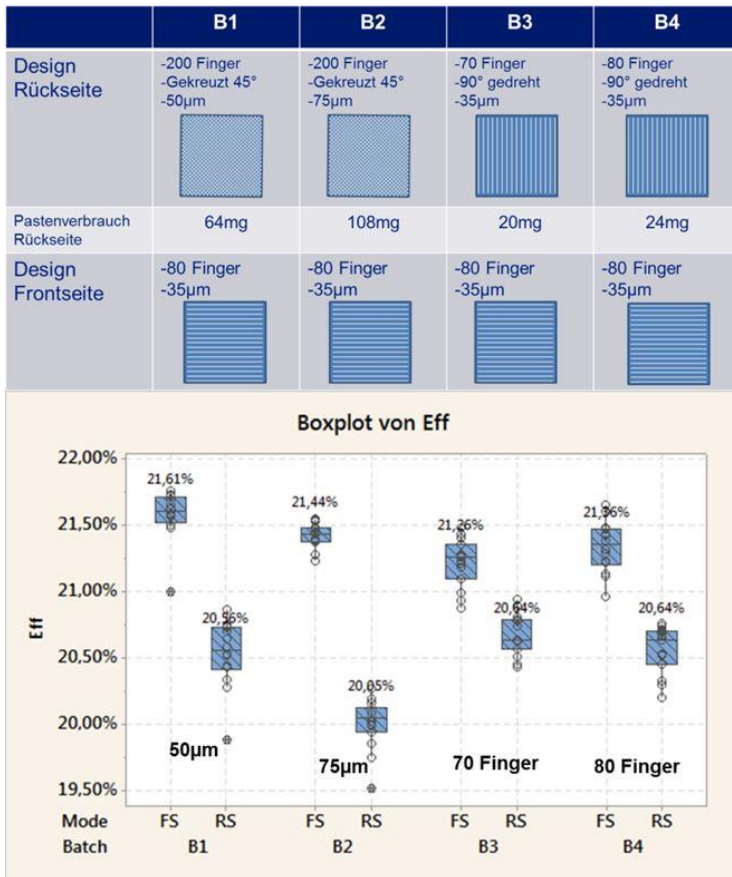


Abbildung 38: Experimentergebnisse zur bifazialen Rückseitengestaltung.

Die Effizienzentwicklung (Abbildung 39) konnte weiterhin erfolgreich fortgesetzt werden und letztendlich auch ein Wirkungsgrad von über 23 % auf busbarlosen, bifazialen Zellen erreicht werden. Von September bis November 2015 wurde die industrielle Robustheit des Prozesses über 10 Wochen bei einem Durchsatz von 100 Wafern pro Stunde getestet (Abbildung 40)

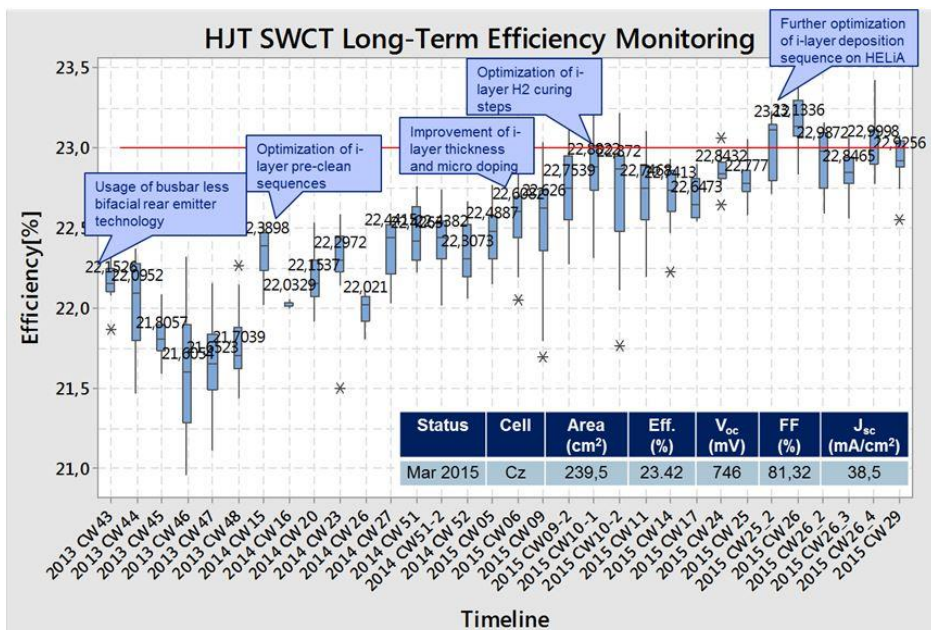
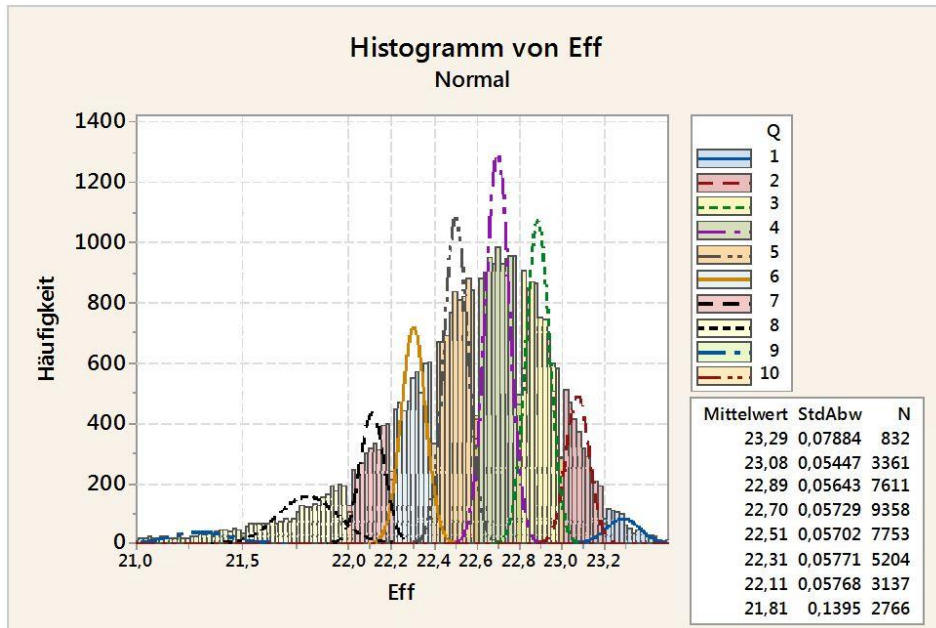
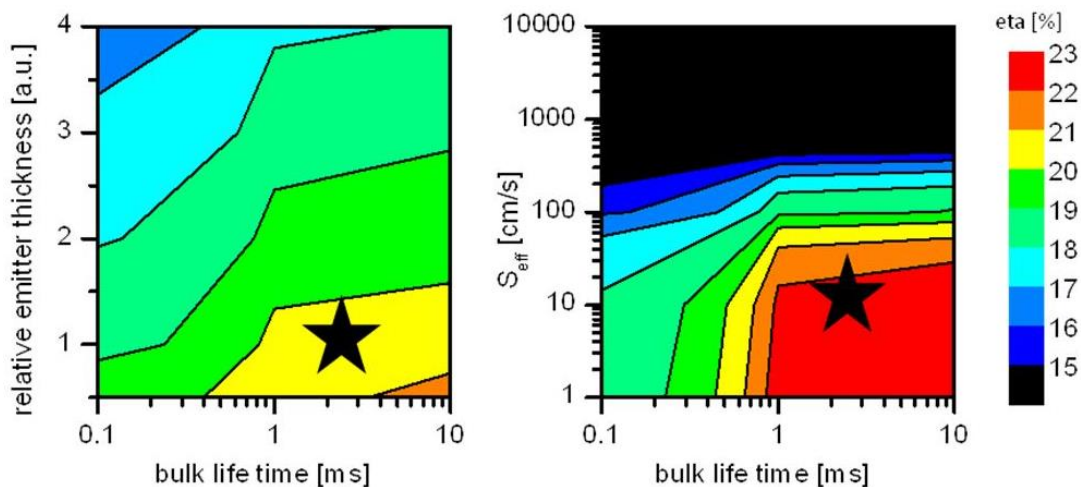


Abbildung 39: Kontinuierliche Prozessentwicklung busbarloser, bifazialer HJT-Solarzellen.



**Abbildung 40:** Effizienzverteilung im Rahmen eines Marathontests über 10 Wochen.

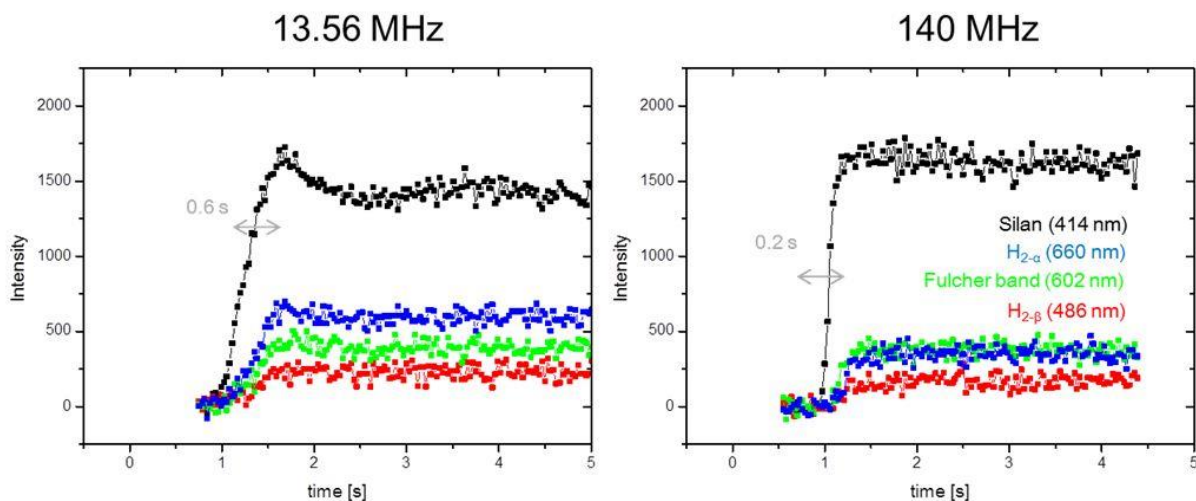
Die experimentellen Arbeiten bei der Meyer Burger (Germany) AG wurden durch Simulationsarbeiten am NaMLab unterstützt. Dafür wurden AFORS-HET Simulationen durchgeführt um die Rückkontaktsolarzelle mit der konventionellen Frontseitenzelle von Meyer Burger (Germany) AG zu vergleichen und gleichzeitig das Potential einer dielektrischen Frontseite zu evaluieren (Abbildung 41). Die Effizienz der konventionellen Zelle wird stark von Volumenrekombination und der parasitären Absorption in der Emitterschicht (simuliert als Schichtdicke) bestimmt. Die Rückkontaktzelle ermöglicht den Ersatz der ITO und a-Si:H auf der Frontseite durch eine hochtransparente Passivierungsschicht (z.B.  $\text{SiN}_x\text{:H}$  oder  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), so dass die parasitäre Absorption reduziert wird. Die Simulation dieses Konzeptes zeigt einen potentiellen Photostromgewinn von  $4 \text{ mA/cm}^2$  auf. Auf der anderen Seite ist die Rückseitenzelle sehr sensitiv gegenüber Rekombinationsverlusten im Volumen und an Grenzflächen. Mit Hilfe der Simulation konnten Grenzwerte für die Rekombinationsverluste im Volumen (Ladungsträgerlebensdauer  $> 1 \text{ ms}$ ) und an der Oberfläche (Rekombinationsgeschwindigkeit  $S_{\text{eff}} < 10 \text{ cm/s}$ ) festgelegt werden. Diese Werte waren Grundlage für die experimentelle Entwicklung der MWT-plus Solarzelle.



**Abbildung 41:** Simulation des Wirkungsgrades einer Front- (links) und Rückseitenzelle (rechts). Die Rückseitenzelle erreicht eine höhere Effizienz unter der Voraussetzung, dass die Rekombinationsverluste gering gehalten werden können. Realistische Materialparameter sind markiert (Stern).

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes hat die NaMLab gGmbH in Zusammenarbeit mit dem Unterauftragnehmer IHM die optische Plasmaspektroskopie (OES) untersucht. OES erlaubt die Untersuchung der Plasmadynamik und ermöglicht die Bewertung des a-Si:H Anfangswachstums, das entscheidend für die Grenzflächenpassivierung ist. Insbesondere wurde dabei untersucht, inwieweit der Einsatz von höheren Plasmafrequenzen zur Stabilisierung des Prozesses beiträgt. Eine erhöhte Plasmafrequenz von 140 MHz (Standard: 13,56 MHz) reduziert den Ionenbeschuss der Siliziumoberfläche und verbessert die Grenzflächenpassivierung (ZB 2013). In Abbildung 42 ist beispielhaft gezeigt, dass bei gleicher Plasmaleistung die Emission der SiH\* Verbindungen bei höherer Leistung nach Prozessbeginn schneller sättigt. Der Gleichgewichtszustand stellt sich also bei hohen Frequenzen in einem kürzeren Zeitraum ein. Da die Wachstumsrate bei 140 MHz deutlich höher ist, sind jedoch die Anfangsschichtdicken für beide Frequenzen vergleichbar.

Die OES-Messung und Interpretation wurde an der NaMLab gGmbH in Zusammenarbeit mit dem Unterauftragnehmer IHM entwickelt und intensiv mit der Meyer Burger (Germany) AG diskutiert. Insgesamt wurde die Methode als sehr interessant eingestuft. Allerdings wurde entschieden, das Verfahren zunächst nicht in die Meyer Burger (Germany) AG Anlage zu integrieren, da das im Rahmen des Projektes entwickelte Plasmamodell nicht den erhofften Informationsgewinn gegenüber bestehender Analytik erbrachte.



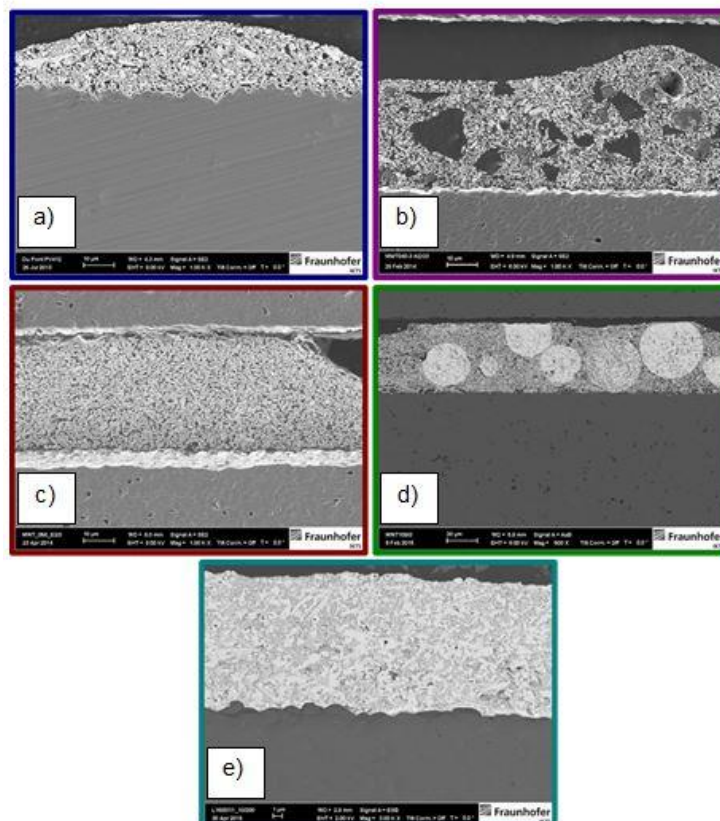
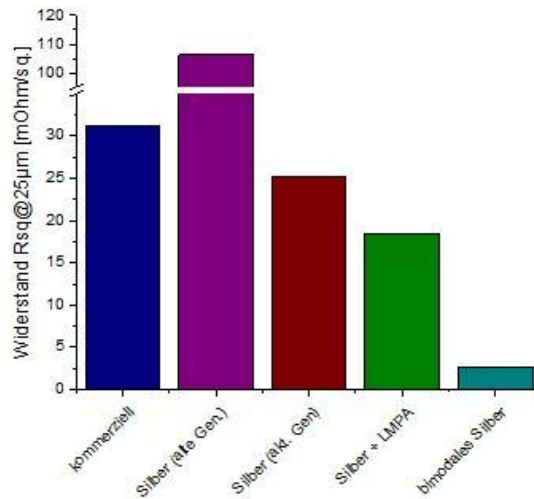
**Abbildung 42:** OES an zwei PECVD a-Si-H Abscheidungen bei 13,56 und 140 MHz. Mit dieser Messmethodik konnten Unterschiede in der Plasmadynamik deutlich nachgewiesen werden.

## Arbeitspaket 2.3: Low-cost & low-T Metallisierung

### Themenschwerpunkt 1: Entwicklung Metallisierungspasten

Innerhalb dieses Arbeitspaketes wurden am FhG IKTS die Pasten aus Arbeitspaket 1.5 hinsichtlich ihres Einsatzes in HJT-Zellen und zur Kontaktierung von laserdotiertem n<sup>+</sup>-Siliciums weiterentwickelt. Hierfür wurden Zellen, die von den Projektpartnern hergestellt und bearbeitet wurden, mit einer IKTS-Paste metallisiert und anschließend elektrisch charakterisiert.

Die in Arbeitspaket 1.5 entwickelten Pasten wiesen in ersten Versuchen einen Leitbahnwiderstand von über 100 mΩ/sq auf [Abbildung 43 – Diagramm Silber (alte Gen.); Querschliff b)]. Im Vergleich zu kommerziell erhältlichen Pasten ist der Widerstand um mehr als das Dreifache erhöht [Abbildung 43 – Diagramm kommerziell; Querschliff a)].



**Abbildung 43:** Leitbahnflächenwiderstände (Diagramm) und FESEM-Aufnahmen von Querschliffen der im Projekt entwickelten Pasten (normiert auf 25  $\mu m$  Schichtdicke). Dargestellt sind von links nach rechts: kommerzielles Pastensystem [Querschliff a)]; IKTS-Silberpaste alte Gen.; [Querschliff b)]; IKTS-Silberpaste [neue Gen.; Querschliff c)]; IKTS-LMPA-Paste [Querschliff d)]; IKTS-bimodale Silberpaste [Querschliff e)].

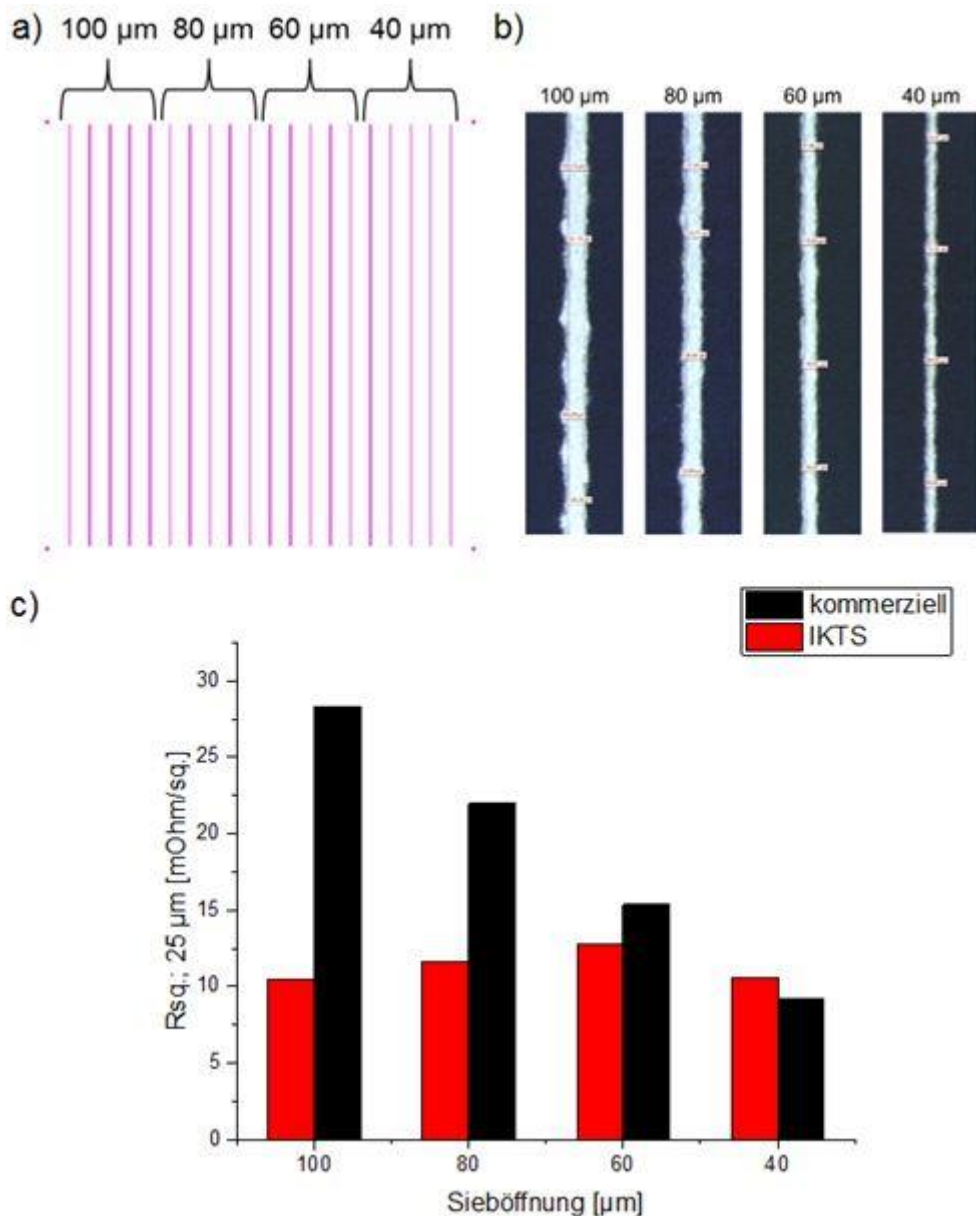
Vergleicht man die Querschliffe beider Pastensysteme, wird deutlich, dass die Packungsdichten der leitfähigen Partikel vergleichbar sind. Die Polymermatrix hingegen unterscheidet sich deutlich: das Polymer im IKTS-Pastensystem zeigt anorganische Partikel und Bereiche, in denen kein Silber dispergiert ist. Dies beeinflusst die Leitfähigkeit negativ. Durch Optimierung des Polymers konnte eine gleichmäßigere Dispergierung der Leitphase im Polymer erreicht werden [Abbildung 43 – Querschliff c)]. Der Widerstand konnte dadurch auf 22  $m\Omega/sq.$  gesenkt werden [Abbildung 43 – Diagramm Silber (akt. Gen.)]. Zur Reduzierung des kostenintensiven Silbers in den Metallisierungspasten wurde der Einsatz von LMPA-Pasten (Low Melting Point Alloy) untersucht. In den Versuchen wurde dafür ein Anteil des Silbers in den bisherigen Pasten durch ein speziell aufbereitetes Weichlot ersetzt. Durch



einen Beschichtungsschritt des LMPA-Pulvers vor der Pastenpräparation konnte ein Umschmelzen der Weichlote im Verbund erreicht werden [Abbildung 43 – Querschliff d)]. Mit dieser Paste konnte der Leitbahnwiderstand auf  $19 \text{ m}\Omega/\text{sq}$  reduziert werden [Abbildung 43 – Diagramm Silber + LMPA].

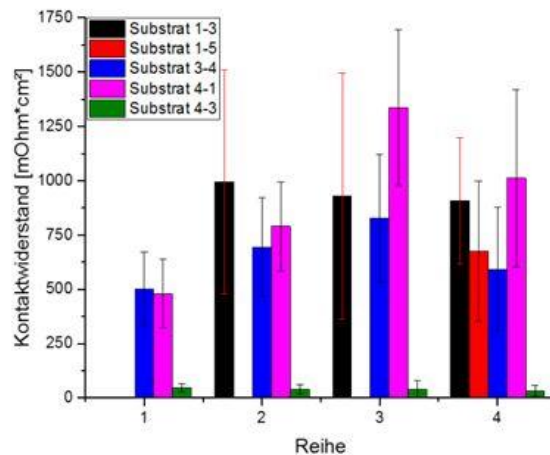
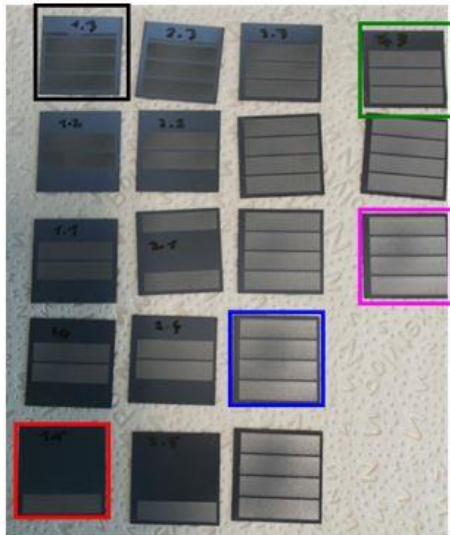
Alternativ wurden bimodale Silberpulvermischungen eingesetzt. Es werden analog konventioneller Hochtemperaturpasten Sinterprozesse während der thermischen Härtung induziert. Die Leitfähigkeit ist in einem solchen Schichtverbund dann nicht mehr allein abhängig von Perkolationspfaden. Damit sind Schichtwiderstände von  $2,7 \text{ m}\Omega/\text{sq}$  (Abbildung 43 – Diagramm bimodales Silber) und ein homogenes Gefüge realisierbar [Abbildung 43 – Querschliff e)].

Für hocheffiziente Solarzellen ist neben der Kontaktausbildung zudem die Abschattung auf der Vorderseite entscheidend. Um diesen Einfluss beim zukünftigen Grid-Design optimieren zu können, wurden am FhG IKTS Tests für einen potentiellen Finline-Druck durchgeführt [Layout Abbildung 44 a)]. Die Linienbreite und Druckauflösung wurde im Lichtmikroskop bestimmt [Abbildung 44 b)]. Für alle Linienbreiten konnte ein unterbrechungsfreier Druck erhalten werden. Während es bei der  $100 \mu\text{m}$  Linienbreite zu einem Leaching-Effekt kam, sind bei der  $40 \mu\text{m}$  Linienbreite Einschnürungen (Perlenschnur) erkennbar. Der Leaching-Effekt kann mit optimierter Pastenviskosität noch verringert werden, während die Einschnürungen mit einer Sieboptimierung nahezu komplett reduziert werden können. Der elektrische Widerstand wurde gemessen und auf  $25 \mu\text{m}$  Schichtdicke normiert [Abbildung 44 c)]. Als Referenz wurde eine kommerzielle Paste mitgeführt. Während die Referenzpaste einen Abfall des Widerstandes mit Linienbreite aufweist, ist der Widerstand der FhG IKTS-Paste nahezu unabhängig von der gedruckten Linienbreite.



**Abbildung 44:** a) Sieblayout der Teststruktur mit abnehmender Linienbreite in 20 µm Schritten. b) gedruckte Linien der IKTS-Paste. c) normierter Flächenwiderstand einer kommerziellen (schwarze Balken) und der FhG IKTS-Paste (rote Balken) in Abhängigkeit der nominellen Sieb-Linienbreite.

Für die Prozessierung des Zellenkonzeptes mit dielektrischer Frontseite muss die Kontaktierbarkeit vom laserdotierten n-Typ Silicium gegeben sein. Dafür wurden vom FhG IKTS entworfene Teststrukturen am FhG IWS selektiv dotiert, am FhG IKTS mit eigenentwickelten Pasten kontaktiert und anschließend elektrisch charakterisiert. Dabei wurden in Anbetracht des späteren Prozesses des Laserdotierens die Teststrukturen über einen ganzen Wafer verteilt, um ortsabhängige Effekte später reduzieren zu können. In jeder Spalte wurde dabei die Fokussierung des Lasers beim Dotieren gezielt variiert, um den Einfluss der Verkippung des Wafers beim Lasern zu untersuchen (AP2.1). Anschließend wurde das Substrat in kleinere Proben geteilt [Abbildung 45 – (links)]. Die Kontaktwiderstände der Proben sind in Abbildung 45 – (rechts) dargestellt. Die spezifischen Kontaktwiderstände sind, bis auf Substrat 4-3, mit Werten von  $> 500 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$  außerhalb des geforderten Bereiches. Anhand des Substrates 4-3 konnte die Machbarkeit der Kontaktierung mit Kontaktwiderständen um  $50 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$  demonstriert werden. Allerdings war aufgrund von mechanischer Instabilitäten die erreichte Reproduzierbarkeit nicht befriedigend.

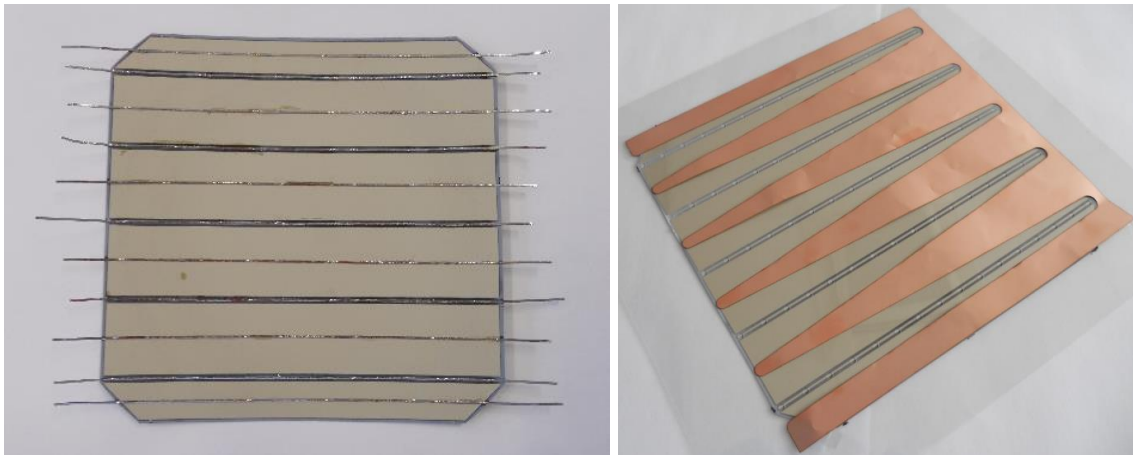


**Abbildung 45:** Laser dotierte Teststrukturen vom FhG IWS: (links) Substrataufteilung in kleinere Teststrukturen und (rechts) am FhG IKTS gemessener Kontaktwiderstand.

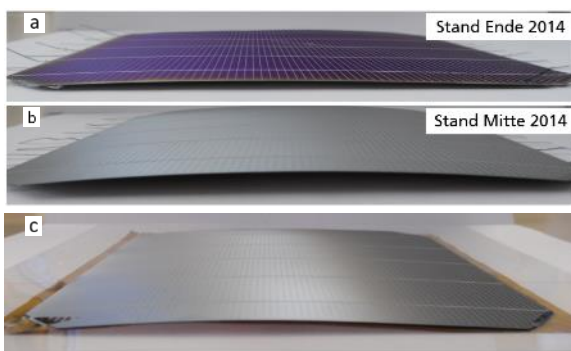
## Themenschwerpunkt 2: Modulverschaltung

Aufbauend auf den Ergebnissen aus Arbeitspaket 1.5 wurde in diesem Arbeitspaket Montagemöglichkeiten zur Modulverschaltung der MWT-plus Solarzellen evaluiert. Hierfür wurde mit allen Projektpartnern das für den Fügeprozess notwendige Rückseiten-Metallisierungslayout der MWT-plus Solarzelle festgelegt.

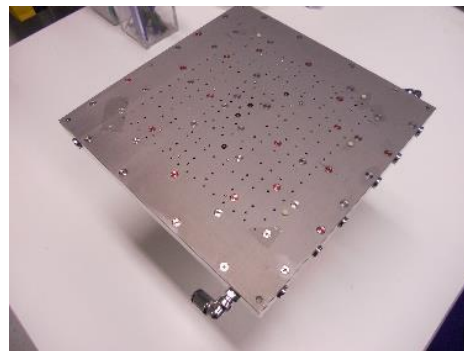
Die Basischarakterisierung verschiedener Modulverschaltungsmethoden erfolgte am FhG IKTS. Aufbauend auf der Literaturrecherche wurden als Montagemöglichkeiten für MWT-plus Solarzellen zwei Konzepte beurteilt. Das erste Konzept basiert auf der Nutzung bestehender industrieller Lötverfahren unter Verlagerung aller benötigter Ribbon-Zellverbinder auf die Solarzellrückseite (Abbildung 46 - links). Der Nachteil dieser Verschaltungsmethode ist eine starke Zellverwölbung in Folge der stark unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten zwischen den Verbindungspartnern [vgl. Abbildung 47b)]. Diese konnte durch Weiterentwicklung des Lötverfahrens bis < 2 mm je Zelllänge reduziert werden [vgl. Abbildung 47a)], und entspricht damit den industriellen Anforderungen an die Modulintegration. Als Alternativkonzept wurde die Klebstoffmontage auf leitfähige Rückseitenkontaktfolien betrachtet (Abbildung 46 - rechts). Die MWT-plus Zelle wird dabei durch elektrisch-leitfähige Klebstoffe auf vorstrukturierte Metallfolien montiert. Um Kurzschlüsse auf der Zelloberfläche zu vermeiden befindet sich zwischen Zelle und Metallfolie in den nicht kontaktierten Bereichen ein Isolationslayer. Durch das Montagekonzept konnte eine hinreichend geringe Zellverwölbung erreicht werden (vgl. Abbildung 47c). Die Einsetzeignung beider Montagekonzepte konnte an 1-Zell-Modulen nachgewiesen werden.



**Abbildung 46:** Verschaltung der MWT-plus Solarzellen mittels Ribbons (links) und Kontaktfolien (rechts).



**Abbildung 47:** Zellverwölbung eines 1-Zell-Modules nach Ribbon-Montage bzw. Folienmontage: (a) Lötmontage mit reduzierter Verwölbung nach Parameteroptimierung, (b) Lötmontage ohne Parameteroptimierung und (c) Klebstoffmontage auf strukturierte Kupferfolie.



**Abbildung 48:** Probenhalter zur Charakterisierung von Rückseiten-Heterokontakt-Solarzellen. Die Anordnung der etwa 80 Kontaktnadeln ist speziell auf das MWT-plus Solarzellenlayout angepasst. Der Probenhalter wurde in einen Sonnensimulator integriert.

### **Themenschwerpunkt 3: Kennlinienvermessung der MWT-plus Solarzellen**

Zur Charakterisierung von MWT-plus Solarzellen erfolgte die Entwicklung und Beschaffung weiterer Messvorrichtungen. In Abbildung 48 ist ein spezifisch auf das MWT-plus Metallisierungslayout angepasster Probenhalter dargestellt, der in einem bestehenden Sonnensimulator am FhG IKTS integriert wurde. Damit ist die Bestimmung der elektrischen Kenngrößen der Rückseiten-Heterokontakt-Solarzellen entsprechend EN 60904-3 möglich. Die Beschaffung und Evaluierung erfolgte in enger Kooperation zwischen FhG IKTS und NaMLab gGmbH.

## **Arbeitspaket 2.4: Anlagenentwicklung Inertgasofen & Prozessabluftreinigung**

### **Themenschwerpunkt 1: Entwicklung Intergasofen**

Im Berichtszeitraum hat Rehm Thermal Systems GmbH den in Intergas betriebenen Versuchsofen weiter entwickelt. In finalen Versuchsreihen am Versuchsofen wurden die Temperaturprofile auf unterschiedlichen Substraten, Prozesstemperaturen und

Durchlaufzeiten

bestätigt

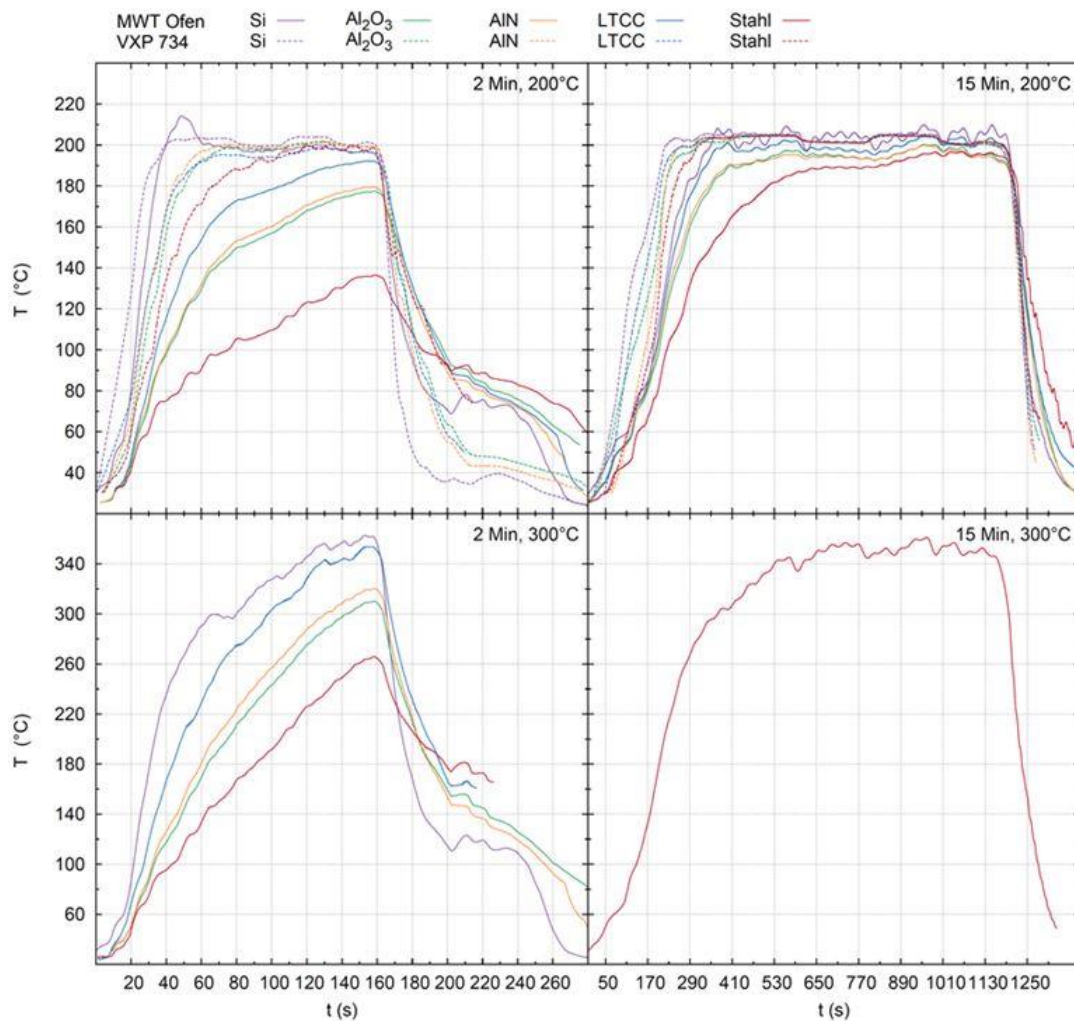
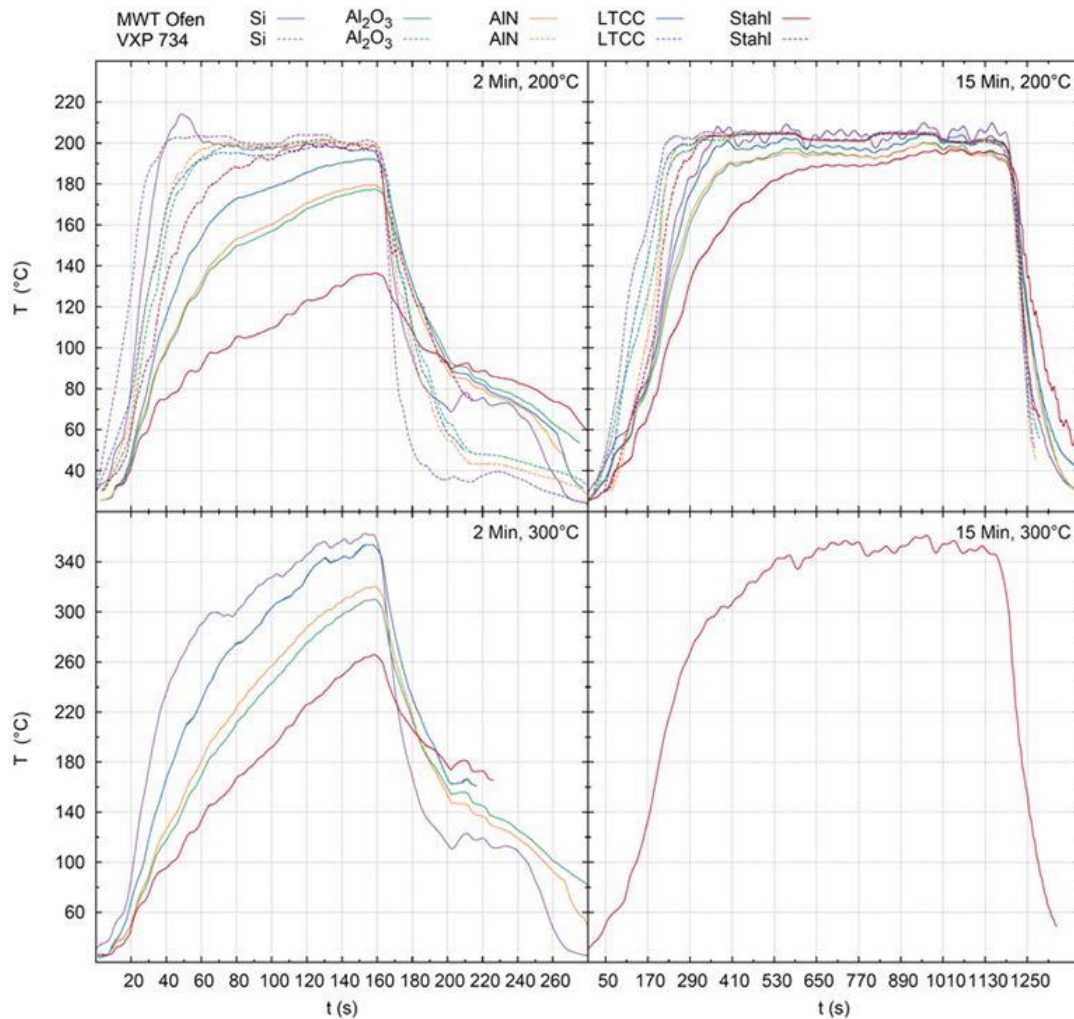
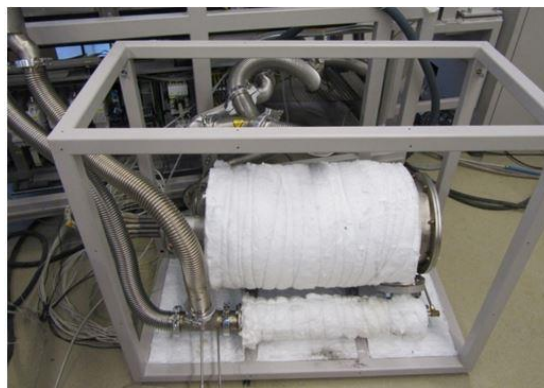


Abbildung 49). Bei einer Durchlaufzeit von 15 Minuten konnte auf Siliziumwafern das geforderte Temperaturplateau mit einem homogenen Temperaturverlauf gemessen werden. Andere, ebenfalls untersuchte, Materialien mit höheren Wärmekoeffizienten wiesen eine flachere Aufwärmkurve auf. Bei sehr schnellen Prozessdurchläufen von 2 min erreichten die Profile der Siliziumwafer bei 200 °C ebenfalls ein homogenes Temperaturplateau. Lediglich bei Profilen mit 300 °C zeigten sich die Grenzen des Ofenkonzeptes, da auch bei Siliziumwafern kein Temperaturplateau mehr zu beobachten war. Somit wurde das System bis Produkttemperaturen von maximal 300 °C bei Prozesszeiten von 2 bis 15 min verifiziert und bietet damit noch komfortablen Spielraum angesichts der bei Polymerpasten üblichen 200 °C Prozesstemperatur bei 10 Minuten Prozessdauer.



**Abbildung 49:** Temperaturprofile für unterschiedliche Testsubstrate und unterschiedlichen Durchlaufzeiten gemessen am Inertgas-Versuchssofen.

Durch eine sehr langsame Transportgeschwindigkeit wurde der Einfluss der einzelnen Strahler auf die zu trocknenden Wafer im Ofen untersucht. Hierdurch lassen sich Rückschlüsse auf die Auslegung der Heizzonen und der Strahlerabstände für den industriellen Durchlauf-Inertgasofen ziehen. Direkt unter dem Strahler ist die Temperatur erhöht. Im Zwischenraum zwischen zwei Strahlern sinkt die Temperatur ab. Somit war ein sinusähnlicher Temperaturverlauf erkennbar.



**Abbildung 50:** Neuentwickelte Pyrolyseeinheit zur Abluftreinigung mit Venturi am MWT-Versuchssofen.

Außerdem wurde im Rahmen dieses Arbeitspaketes von Rehm Thermal Systems GmbH eine neue Abluftreinigungseinheit am Versuchsofen getestet (Abbildung 50). Gegenüber des konventionellen MRSP-Systems (Modulares Reinigungs System mit Pyrolyse) konnte so eine verbesserte Temperaturstabilität im Ofen erreicht werden. Das neue System arbeitet nach einem ähnlichen Prinzip wie die konventionelle MRSP-Einheit, allerdings wird die Einheit des Lüfters mit Wasserkühlung durch eine Venturi ersetzt. Damit ist die zurückgeführte Luft nach der gesamten Pyrolyseeinheit 100 °C wärmer als bisher. Somit erreicht man über die gesamte Länge der Prozesskammer im Inneren des Versuchsofens ein stabileres Temperaturniveau. Aus diesem Grund hat man sich dazu entschieden, diese Abluftreinigungseinheit zur Umluftfilterung für den industriellen Durchlauf-Inertgasofen zu verwenden.

Die Entwicklung des Versuchsofens wurde Ende 2014 abgeschlossen. Mit diesem Ofen wurden zwei Ziele verfolgt. Zum einen wurde in Zusammenarbeit von FhG IKTS und Rehm Thermal Systems GmbH das Lastenheft für den industriellen Durchlauf-Inertgasofen finalisiert. Dabei wurden unter anderem die genauen Spezifikationen bezüglich der äußeren Abmessungen, der minimalen und maximalen Transportgeschwindigkeit, der maximalen Produkttemperatur und des Restsauerstoffgehaltes festgelegt (Tabelle 4). Zudem wurde das Wärmeübertragungsmedium im industriellen Durchlauf-Inertgasofen spezifiziert. Die Trocknung der Metallisierungspasten wird mittels einer Kombination von Infrarotstrahlung und Konvektionswärme realisiert.

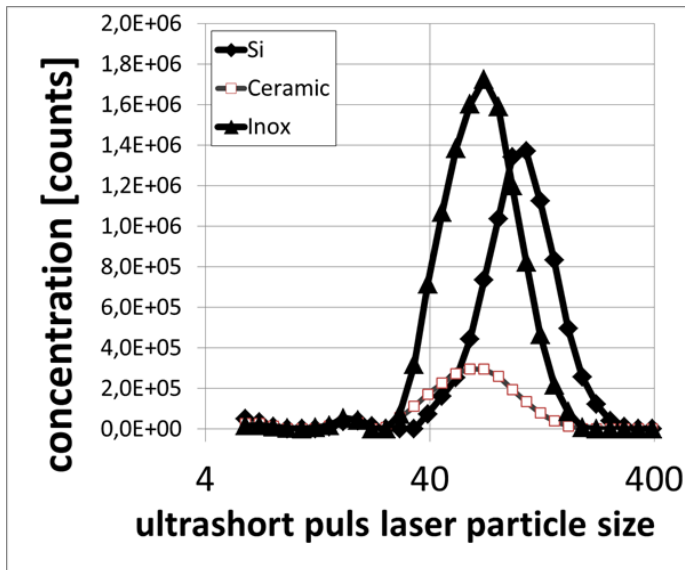
Länge	7,103 m
Breite	1,493 m
Höhe	2,221 m
Beheizte Länge	3,596 m
Länge der Kühlstrecke	1.001 m
Transportsystem	Durchgängiger Metallgewebegurt mit Aufständering
Transportgeschwindigkeit	200 – 2000 mm/min
Anzahl der Heizzonen	7 mit jeweils 4 Strahlern

**Tabelle 4:** Spezifikationen des industriellen Durchlauf-Inertgasofens.

Mit der Konstruktion des industriellen Durchlauf-Inertgasofens wurde im 4. Quartal 2014 begonnen. Die konstruktive Realisierung eines Durchlaufofens im Inertgasbetrieb (Restsauerstoffkonzentration < 30 ppm) mit geplanter Kombination von Infrarotstrahlung und Konvektionswärme war technologisch sehr herausfordernd. Der Ofen wurde im 2. Quartal 2015 fertiggestellt und bei Rehm Thermal Systems GmbH getestet, bevor er an das FhG IKTS ausgeliefert wurde.

## **Themenschwerpunkt 2: Reinigung Prozessabluft**

Im Rahmen des Forschungsvorhabens war die Aufgabe der ULT AG neuartige Lösungen zur Abluftaufbereitung zu entwickeln. Für die Entwicklung einer Filteranlage mit Inertgas-Absaugtechnik wurde zuerst die Partikelverteilung im Rohgas beim Einsatz eines Ultrakurzpuls-Lasers untersucht (Abbildung 51).



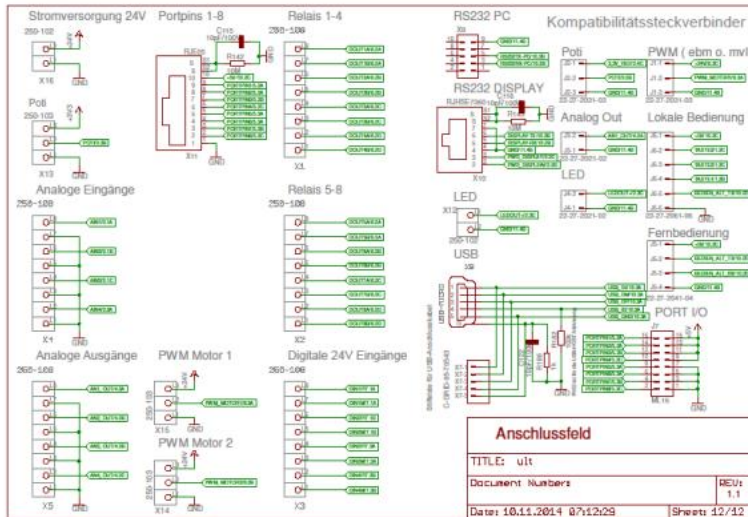
**Abbildung 51:** Partikelverteilung im Rohgas beim Einsatz eines Ultrakurzpuls-Lasers.

In Zusammenarbeit mit der ILK gGmbH wurde daraufhin ein Lastenheft für die Laserablufreinigung konzipiert. Aus diesem heraus entstand ein mehrstufiges Abscheidekonzept für Partikel und Gasphasen bzgl. der Abscheidewirkung bei einer Laserfrequenz von 50 kHz bei 20 A Stromstärke. Die praktischen Tests fanden bei der Rehm Thermal Systems GmbH statt. Weitere Untersuchungen zur Abscheidung von Siliziumstäuben am FhG IWS führten schließlich zum Ergebnis einer sehr effizienten Abscheidung von Si-Partikeln. Es wurde ein Wirkungsgrad von 95 % ermittelt (Abbildung 34).

Wichtig für die effiziente Abscheidung der Partikel war dabei die nahezu vollständige Erfassung der Si-Partikel am Entstehungsort. Entsprechend wurde ein Erfassungselement ausgelegt und im Arbeitsbereich des Lasers platziert.

ULT AG entwickelte im Rahmen des Projektes eine neue Regeltechnologie für die Prozesskontrolle der Abluftreinigung. Daraus entstand ein Steuerungskonzept mit Volumenstrom-Konstanthaltung. Dieses Steuerungskonzept floss in die Entwicklung einer DC-Steuerung ein, die Bestandteil zukünftiger Absauganlagen für Laserrauch der ULT AG werden wird (Abbildung 52).





10.11.2014 07:46:03 L105\_Entwicklung02\_ULT FuE Projekte\01\_Projekte\Steuerung 2.0\TechnischeDoku\Platinenlayout\Revision3\MainBoard\_Rev3\Gerber\ult.sch (Sheet: 12/12)

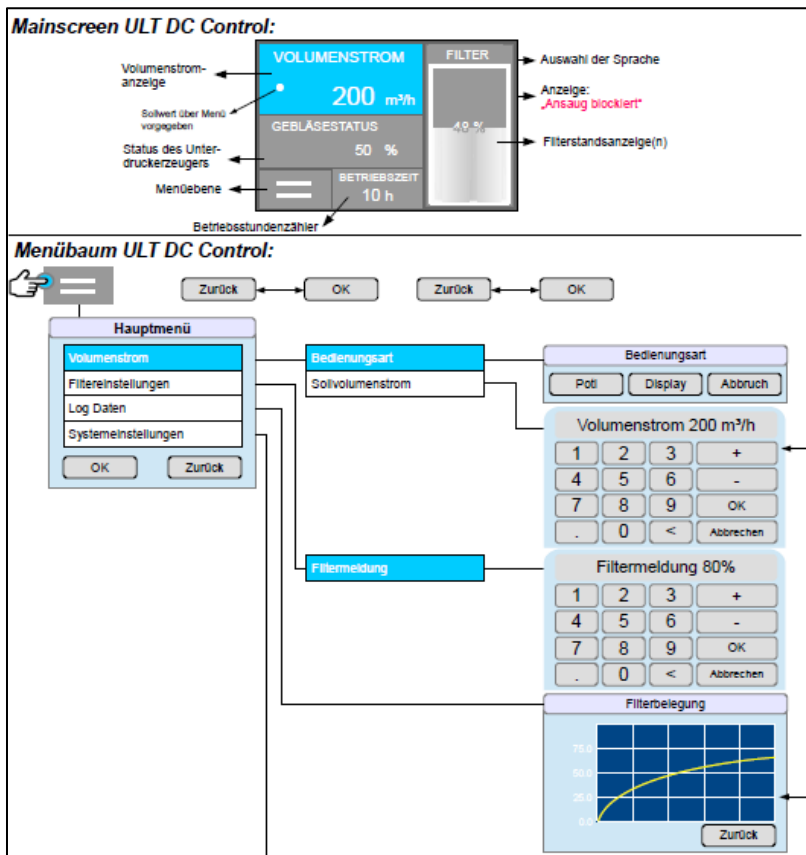
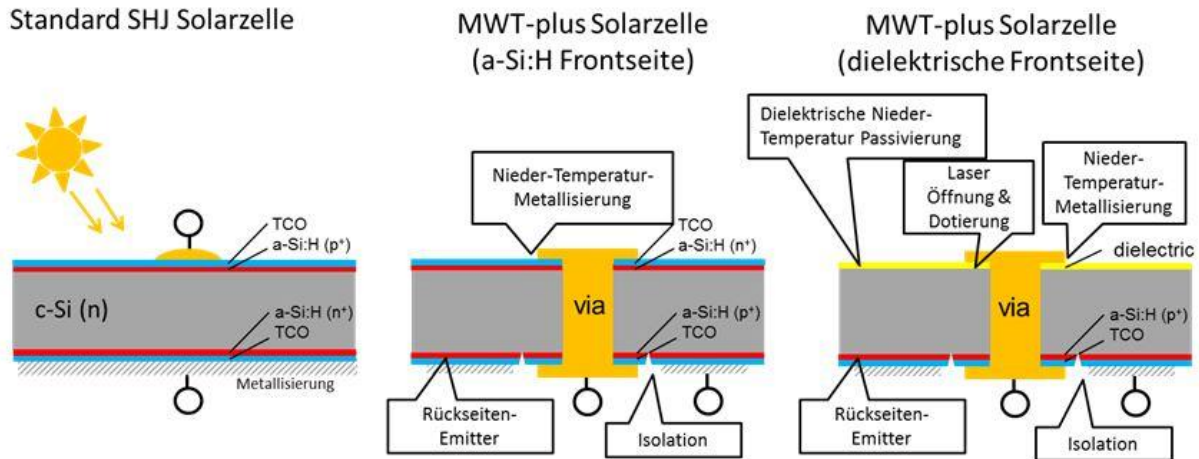


Abbildung 52: Schaltplan, Struktur und Menübaum der entwickelten Anlagensteuerung.

### Arbeitspaket 3.1 Spezifikation MWT-plus Konzept

Mit den Vorarbeiten aus den ersten beiden Projektphasen wurden der Prozessfluss für die finale MWT-plus Solarzellen festgelegt. Dabei wurden zwei Konzepte verfolgt, die auf einer unterschiedlichen Frontseitenbeschichtung basierten, einer a-Si:H und einer dielektrischen Frontseite (Abbildung 53). Beide Konzepte sind hochinnovativ, allerdings stellt die Integration der dielektrischen Frontseite zusätzliche Anforderungen, die in einem separaten Entwicklungszyklus realisiert werden sollten.



**Abbildung 53:** Standard und MWT-plus Solarzellenkonzepte. Die für die Realisierung benötigten Prozessinnovationen sind als Sprachblasen angegeben.

Die Tabelle 5 zeigt den Prozessfluss der Heterokontakt-MWT Solarzelle mit vorder- und rückseitiger a-Si:H Schicht. Dieser Prozessfluss basiert auf der im Rahmen des Projektes von der Meyer Burger (Germany) AG entwickelten Rückseitenemitter-Zelle. Die Via-Bohrung wird jeweils nach der Dünnschichtabscheidung durchgeführt („via-last“ Prozess) und die Metallisierung basiert auf neu entwickelten Metallisierungsmaterialien.

#	Prozessschritt	Prozessparameter & Kommentare
1	Vorreinigung & KOH	Standard Meyer Burger (Germany) AG Prozesse
2	a-Si:H	Rückseitenemitter (Meyer Burger (Germany) AG)
3	TCO	Standard Meyer Burger (Germany) AG Prozess
4	Via Bohrung	532 nm Laserprozess – 125 Vias/Wafer (FhG IWS)
5	Via Metallisierung	Druck mit Vakuumunterstützung (FhG IKTS)
6	Frontseitendruck	Optimierte Druck/Trocknungssequenz um Bruchrate zu reduzieren (FhG IKTS)
7	Rückseitendruck	Siebdruck (FhG IKTS)
8	Rückseitenisolation	Einseitige HF Ätzung (NaMLab gGmbH) oder Laserisolation (FhG IWS)
9	Charakterisierung	IV-Kennlinie (FhG IKTS) und LBIC (NaMLab gGmbH)

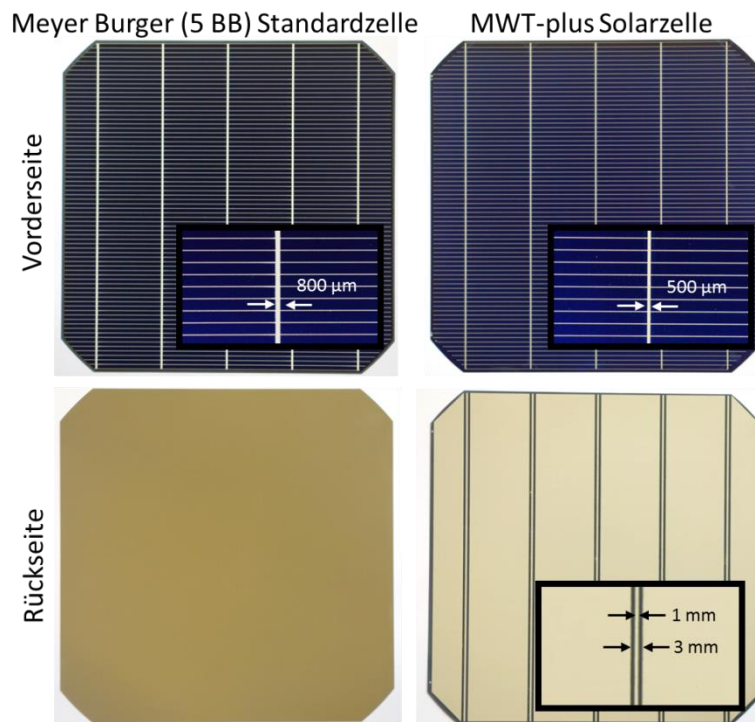
**Tabelle 5:** Prozessfluss für die MWT-plus Solarzelle mit a-Si:H Frontseite.

In Tabelle 6 ist der Prozessfluss der Heterokontakt-MWT Solarzelle mit dielektrischer Frontseite gezeigt, die auf einer dielektrischen Frontseitenpassivierung beruht. Dieses Integrationskonzept ist deutlich komplexer und erfordert neuartige, im Rahmen des Projektes entwickelte, Einzelprozesse. Insbesondere basiert dieser Prozessfluss auf einer neuartigen Niedertemperatur-Frontseitenpassivierung, einem Laserablations- und Laserdotierprozess. Andererseits ermöglicht eine dielektrische Frontseitenpassivierung eine verbesserte Lichteinkopplung und somit einen erhöhten Photostrom der Solarzelle.

#	Prozessschritt	Prozessparameter & Kommentare
1	Vorreinigung & KOH	Standard Meyer Burger (Germany) AG Prozesse
2	a-Si:H	Rückseitenemitter (Meyer Burger (Germany) AG)
3	TCO	Standard Meyer Burger (Germany) AG Prozess
4	Frontseitenpassivierung	ALD-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Niedertemperaturpassivierung (NaMLab gGmbH)
5	Via Bohrung	532 nm Laserprozess – 125 Vias/Wafer (FhG IWS)
6	Frontseitenöffnung	Laserablation der dielektrischen Frontseite (FhG IWS)
7	Dotierung	Laserdotierung (FhG IWS)
8	Via Metallisierung	Druck mit Vakuumunterstützung (FhG IKTS)
9	Frontseitendruck	Optimierte Druck/Trocknungssequenz um Bruchrate zu reduzieren (FhG IKTS)
10	Rückseitendruck	Siebdruck (FhG IKTS)
11	Rückseitenisolation	Einseitige HF Ätzung (NaMLab gGmbH) oder Laserisolation (FhG IWS)
12	Charakterisierung	IV-Kennlinie (FhG IKTS) und LBIC (NaMLab gGmbH)

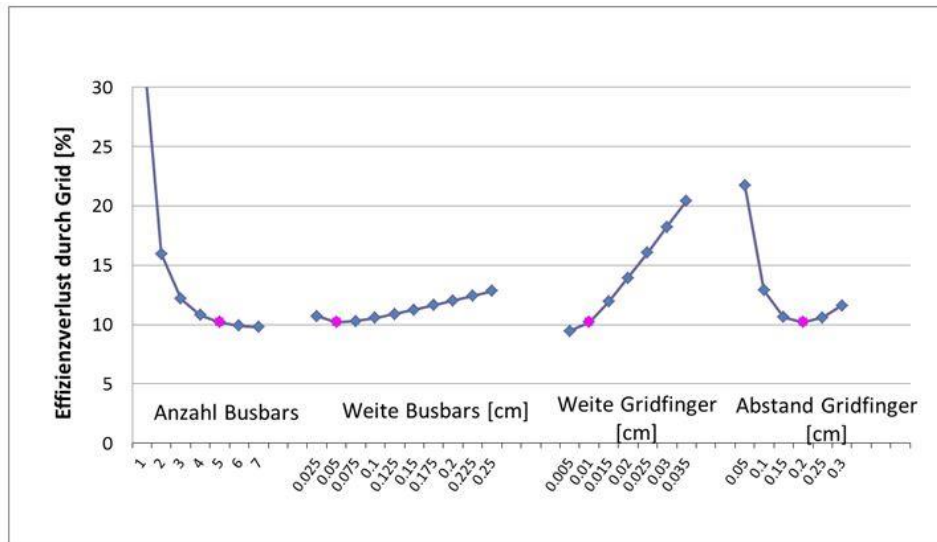
**Tabelle 6:** Prozessfluss für die MWT-plus Solarzelle mit dielektrischer Frontseitenpassivierung

Neben dem Prozessfluss wurde auch das Metallisierungslayout festgelegt. Dabei wurde das Frontseitenlayout (5 Busbars) der Meyer Burger (Germany) AG angepasst und fünf Rückseitenbusbars eingeführt (Layout in Abbildung 54 dargestellt). Das MWT-Konzept ermöglicht die Reduktion der Busbarbreite auf der Vorderseite, wobei die Breite im ersten Schritt auf 500 µm reduziert wurde. Damit wird die geometrische Frontseitenabschattung der Zelle von 8 auf 6 % reduziert. Da im MWT-Layout die elektrischen Verluste in der Metallisierung leicht ansteigen, ist der berechnete Effizienzgewinn der MWT-plus Solarzelle gegenüber der Standardzelle etwa 1 % absolut. Dieser Wert setzt 25 Vias pro Busbar voraus. Die Simulation hat gezeigt, dass die wesentlichen Hebel zur weiteren Effizienzsteigerung die Breite des Frontseitenbusbars und die Leitfähigkeit der Metallisierung sind.



**Abbildung 54:** Front- und Rückseiten Layout der Standard HJT Solarzelle von der Meyer Burger (Germany) AG und der MWT-plus Solarzelle.

Die Simulation der elektrischen und optischen Metallisierungsverluste hat außerdem ergeben, dass das Frontseitenlayout der Standardzelle (Fingerbreite, Fingerabstand, ...) sehr gut auf die MWT-plus Zelle übertragbar ist. Aus fertigungstechnischen Gründen wurde darauf verzichtet die Anzahl der Busbars weiter zu erhöhen, bzw. die Breite der Gridfinger zu reduzieren, auch wenn dies zu einer Verringerung der Verluste führen würde. Die Sensitivitäten der einzelnen Parameter auf die Verluste sind in Abbildung 55 dargestellt.



**Abbildung 55:** Sensitivitäten der Layoutparameter für die Frontseitenmetallisierung der MWT-plus Zelle. Die metallisierungsspezifischen optischen und elektrischen Verluste der Zelle betragen etwa 10 %.

## Arbeitspaket 3.2 Prozessierung der MWT-plus Solarzelle

### Themenschwerpunkt 1: MWT-plus Solarzelle mit a-Si:H Frontseite

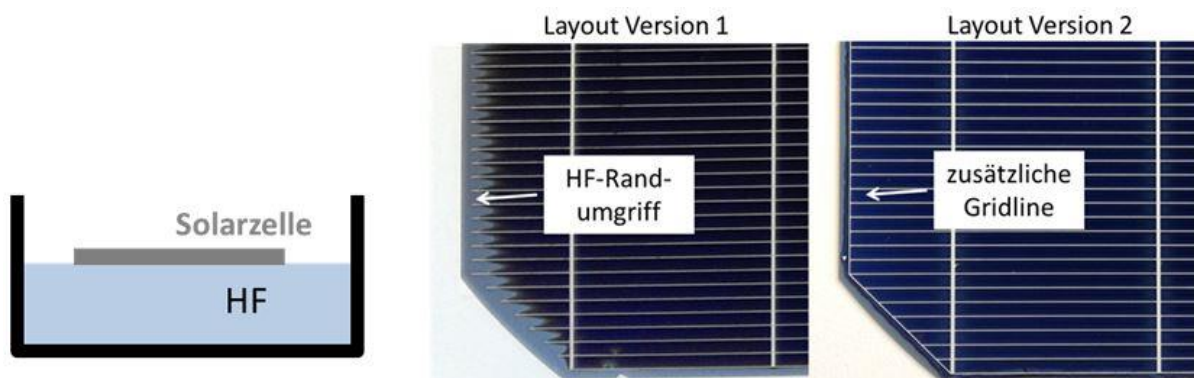
Im Rahmen des Projektes wurden etwa 200 MWT-plus Solarzellen mit a-Si:H Frontseite nach den Prozessfluss in Tabelle 5 prozessiert. Die Zellenfertigung wurde in kleinen Einheiten von etwa 20 Wafern im Umlaufverfahren realisiert, wobei die Prozessschritte an den jeweiligen Prozessentwicklungsstandorten durchgeführt wurden (in Tabelle 5 angegeben). Die Integration der Einzelprozess verlief insgesamt sehr erfolgreich, allerdings wurden während der Entwicklungsarbeiten zwei Kernthemen sichtbar und zwar die Ausbeute, die durch Waferbruch beeinträchtigt wurde und die elektrische Rückseitenisolation.

Waferbruch während der Fertigung hat einen deutlichen Ausbeuteeinbruch verursacht. Zu hohen Bruchraten kam es insbesondere im Siebdruckprozess wo die mechanische Beanspruchung der Wafer am größten war. Die Ursachen für den Bruch konnten zum Teil in der Prozessführung gefunden und daraufhin eliminiert werden. So wurde festgestellt, dass Justiermarken, die am Rande des Wafers angebracht waren, den Wafer destabilisieren und Sollbruchstellen erzeugen. Diese Marken mussten mit dem MWT-Konzept eingeführt werden, um die Positionen der Front- Via- und Rückseitenmetallisierung aufeinander abzustimmen. Eine deutliche Verbesserung konnte durch die Anpassung der Markenposition (größerer Abstand zu Waferrand) und -tiefe erzielt werden. Außerdem wurden die Siebdruckparameter in mehreren Iterationen angepasst um die Prozessbelastung zu minimieren. Zum anderen Teil konnte jedoch eine Vorschädigung der Wafer durch die Lochbohrungen nicht vermieden werden. Das gewählte Layout basierte auf einer sehr großen Anzahl von 125 Via Löchern, die entlang der Busbars angeordnet waren. Da eine

versuchswise Reduktion der Via-Anzahl die Stabilität der Wafer nicht signifikant verbessert hat, wurde das Layout beibehalten. Deshalb wurde der Waferbruch durch eine schonende Prozessführung minimiert.

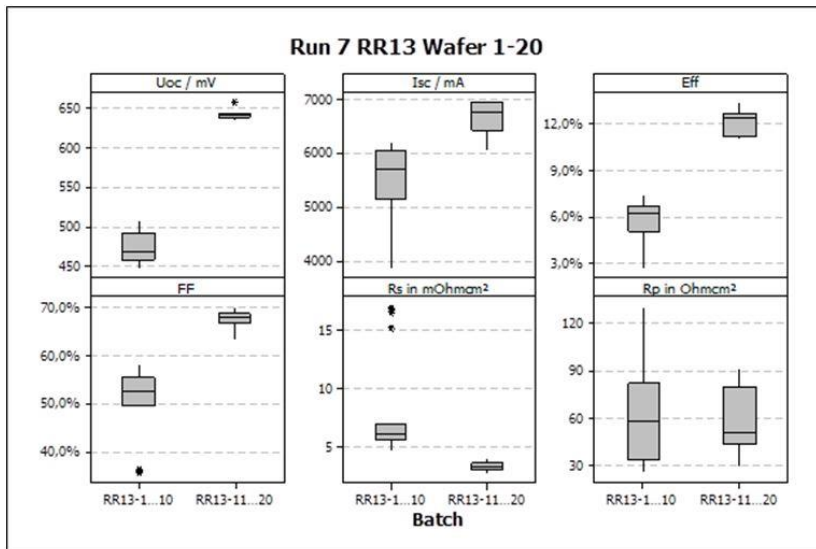
Ein weiteres Entwicklungsthema war die Rückseitenisolation. Laserisolation ist eine Standardtechnologie in der Dünnschichtsolarzellenfertigung, in der Heterokontaktsolarzelle ist diese Technologie jedoch Neuland. Die Herausforderung besteht darin, die leitende TCO Schicht abzutragen ohne die darunterliegende, etwa 15 nm dicke, a-Si:H-Emitterschicht zu zerstören, da diese Schicht entscheidend für die Oberflächenpassivierung des Silizium-Wafers ist. Der im Rahmen des Projektes am FhG IWS entwickelte Laserprozess wurde speziell für diese Anforderungen optimiert (Arbeitspaket 1.2).

Als Referenzprozess wurde außerdem ein nasschemischer Ätzschritt entwickelt, bei dem die Rückseite in einem HF-Bad strukturiert wurde. Die Rückseiten-Metallisierung diente dabei als Maskierung (Abbildung 56). Um eine ausreichende Ätzselektivität zwischen dem zu ätzenden ITO und der Rückseitenmetallisierung zu gewährleisten, wurden das Metallisierungsmaterial und die Ätzchemie aufeinander abgestimmt. Dies wurde in enger Zusammenarbeit von FhG IKTS und NaMLab gGmbH durchgeführt. Die nasschemische Rückseitenisolation musste außerdem lokal beschränkt bleiben, insbesondere durfte die Solarzellenvorderseite nicht angegriffen werden. In den ersten Versuchen wurde jedoch ein deutlicher HF-Umgriff auf die Vorderseite der Zelle beobachtet. Dadurch wurde die Vorderseite der Zelle geschädigt. Eine Lösung dieses Problems konnte mit einem neuen Frontgrid-Layout erzielt werden (Abbildung 56). Eine zusätzliche äußere Gridlinie stoppte den HF-Umgriff, so dass der aktive Bereich der Zelle nicht gestört wurde.



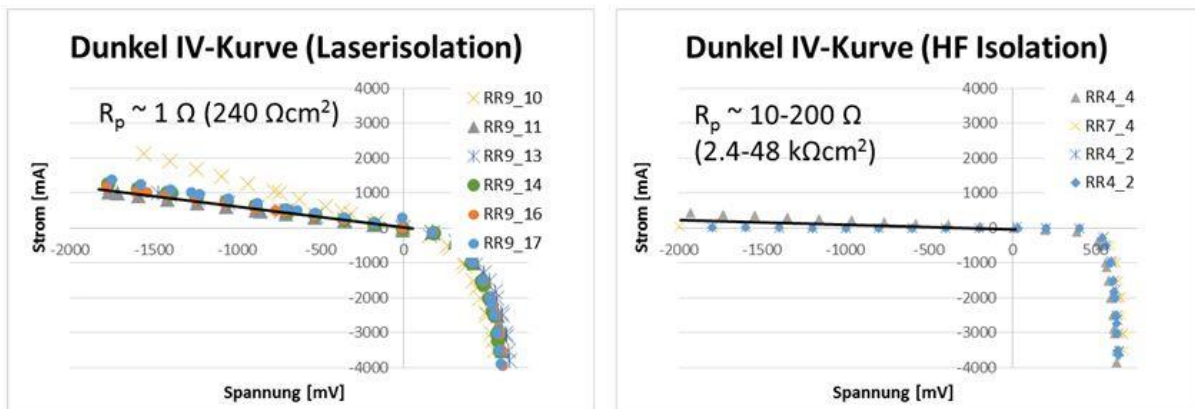
**Abbildung 56:** Prinzip der Rückseitenisolation durch einseitige HF-Ätzung (links). Verbessertes Gridlayout (zusätzliche Randlinie) zur Reduktion der Ätzschäden während der Rückseiten HF-Ätzung (mitte/rechts).

Die Solarzellenkennwerte eines Prozessdurchlaufes mit nasschemischer Isolation sind in Abbildung 57 dargestellt. Ziel dieses Durchlaufes war es unterschiedliche Metallisierungsstrategien zu evaluieren. Dabei wurde bereits während der Rückseitenisolation festgestellt, dass die Abstimmung der Ätzchemie und Metallisierungsmaterialien in der ersten Prozessgruppe nicht optimal war und infolgedessen die Rückseitenmetallisierung angegriffen wurde. Dies führte folglich zu schlechteren Kennwerten in der fertigen Solarzelle. Die zweite Gruppe in diesen Split-Versuch zeigte deutlich bessere Kennwerte.



**Abbildung 57:** Solarzellenkennwerte eines MWT-plus Durchlaufes (Run 7). Wafer 1..10 und Wafer 11...20 wurden mit unterschiedlichen Metallisierungsmaterialien gefertigt.

Der Einfluss unterschiedlicher Isolationsstrategien ist in Abbildung 58 dargestellt. Entwicklungsziel war ein Shuntwiderstand über  $10 \text{ k}\Omega\text{cm}^2$ . Anhand der Dunkel-IV Messungen ist es ersichtlich, dass dieser Wert nur mit der HF-Isolation erreicht wurde. Die Isolationswirkung des Laserprozesses war geringer. Daher wurden die MWT-plus Solarzellen überwiegend durch eine rückseitige HF-Ätzung strukturiert.



**Abbildung 58:** Dunkelkennlinien von Solarzellen mit unterschiedlichen Isolationsstrategien für die Rückseite, Laserisolation (links) und HF Isolation (rechts).

Die Kennlinie der besten MWT-plus Solarzelle ist in Abbildung 59 gezeigt. Der erzielte Wirkungsgrad liegt deutlich unter dem Niveau der Referenz-Solarzelle ohne MWT Metallisierung, die einen Wirkungsgrad von 21 – 22 % erreicht. Insbesondere der Füllfaktor und die Spannung lagen deutlich unter dem Wert der Referenzsolarzelle. Die Analyse der Kenndaten aller Zellen ergab einen weiteren Entwicklungsbedarf in drei Kernbereichen:

- Rückseitenisolation: Die nasschemische Isolation setzt eine genaue Abstimmung der Prozesse voraus, wie es in einer Laborfertigung nicht zu gewährleisten ist. Kleine Prozessschwankungen hatten starken Einfluss auf die Isolationswirkung.
- Mechanische Stabilität: Auch wenn der Bruch durch eine schonendere Prozessführung weitestgehend reduziert werden konnte, war eine Schädigung des Grundmaterials nicht auszuschließen. Diese nicht-sichtbaren Schäden führten zu erhöhten elektrischen Verlusten.

- Metallisierungslayout: Das 5 Busbar-Layout der MWT-plus Solarzelle erlaubt einen guten Vergleich zu der Meyer Burger (Germany) AG Referenzsolarzelle. Allerdings sind die Abschattungsverluste höher als bei einem 4x4 Via-Layout mit sternförmigen Frontseiten-Gridfingern. Außerdem ist zu erwarten, dass ein 4x4 Via-Layout aufgrund der geringeren Löcheranzahl die mechanische Stabilität der Zelle verbessern könnte. Da die Einführung eines 4x4 Via-Layouts weitreichende Konsequenzen insbesondere für die IV-Messungen hatte, wurde dieses Layout im Rahmen dieses Vorhabens nicht evaluiert.

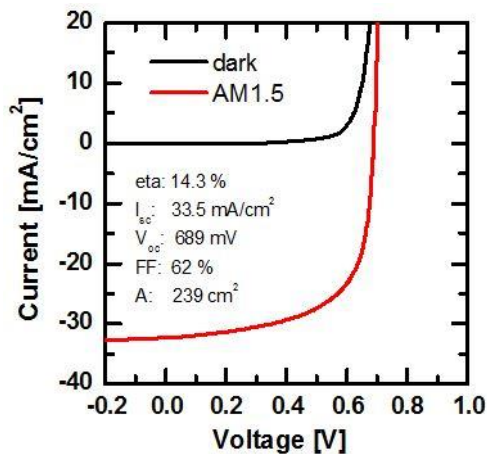
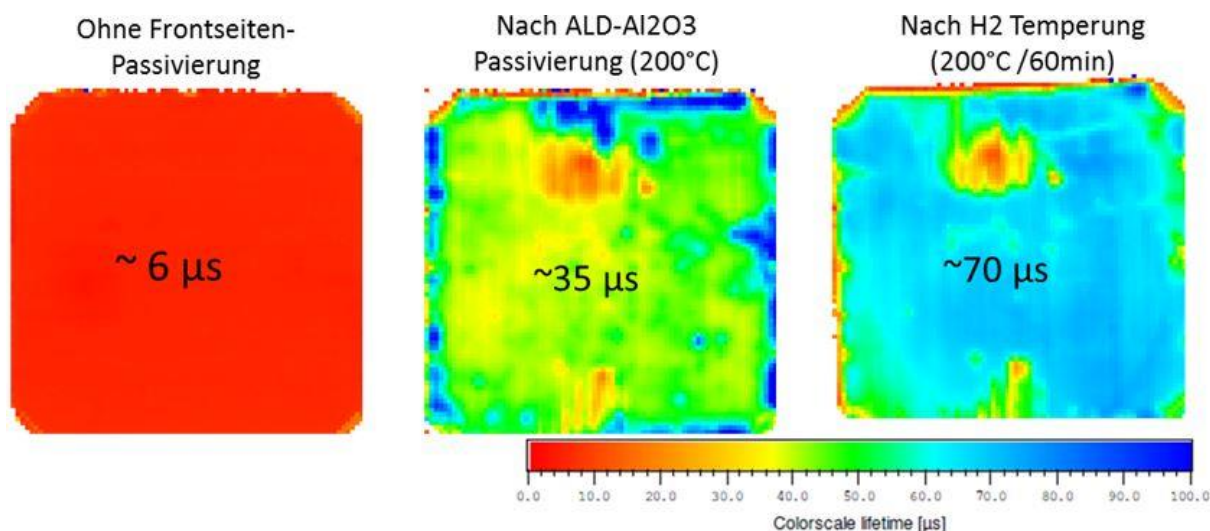


Abbildung 59: IV-Kennlinie der besten im Rahmen des Projektes entwickelten MWT-plus Solarzelle.

## Themenschwerpunkt 2: MWT-plus Solarzelle mit dielektrischer Frontseite

Die Heterokontakt-MWT Solarzelle basierend auf einer dielektrischen Frontseitenpassivierung hat ein sehr hohes Innovationsniveau. Die Umsetzung des in Arbeitspaket 3.1 spezifizierten Prozessflusses (Tabelle 6) stellte höchste Anforderungen an alle neuentwickelten Einzelprozesse, insbesondere an die Frontseitenpassivierung und Dotierung.

In der ersten Projektphase wurde von der NaMLab gGmbH eine Niedertemperatur-Abscheidung von dielektrischen Passivierungsschichten mit Blitzlichttemperung entwickelt (Arbeitspaket 1.4). Diese Entwicklungsarbeiten haben das Potential der Niedertemperatur-Passivierung für die Anwendung demonstriert. Für die MWT-plus Solarzellenfertigung konnte die Blitzlichttemperung aber nicht eingesetzt werden, da aufgrund apparativer Begrenzungen keine vollständigen Zellen verarbeitet werden konnten. Anstelle der Blitzlichttemperung wurde eine Langzeit Wasserstofftemperung eingesetzt. Diese Temperung wurde an Wafern nach der einseitigen ALD Abscheidung von  $\text{Al}_2\text{O}_3$  durchgeführt. Die Rückseite der Wafer war bereits zuvor von der Meyer Burger (Germany) AG mit dem Emitter-Schichtstapel (a-Si:H und ITO) beschichtet. Die erreichten Lebensdauern sind in Abbildung 60 als Konturplots dargestellt. Mit einer 1-stündigen Temperung in  $\text{H}_2$  konnten relativ homogene Lebensdauern von etwa  $70 \mu\text{s}$  erreicht werden. Die erzielten Lebensdauern waren geringer als in den Vorversuchen, da die Abscheidung hier auf industriellen Solarzellen und nicht auf hochwertigen float-zone Wafern durchgeführt wurden.



**Abbildung 60:** Lebensdauern einer MWT-plus Solarzelle mit Rückseitenemitter und dielektrischer Frontseitenpassivierung vor der Abscheidung der Passivierungsschicht (links), nach ALD-Abscheidung (Mitte) und nach einer Wasserstofftemperung (rechts). Die maximale Prozessstemperatur betrug 200 °C.

Die Prozesse für die Laseröffnung und Dotierung sowie die Metallisierung mit Niedertemperatur-Pasten wurden während der ersten und zweiten Projektphasen entwickelt. Während der Integration dieser Prozesse in die MWT-plus Solarzelle stellte sich heraus, dass die Prozesschemie während der Laserdotierung die Solarzellenpassivierung angriff. Das Resultat war eine starke Abnahme der Ladungsträgerlebensdauer in den Solarzellen. Diese Degradation konnte jedoch durch eine zusätzlich, hochtransparente Ätzbarriere auf der Passivierungsschicht verhindert werden.

Die elektrischen Kennwerte aller in dieser Prozessroute gefertigten Solarzellen waren sehr schlecht. Zusätzlich zu den oben aufgeführten Verlustfaktoren, wirken sich in diesem Konzept auch die Probleme bei der direkten Kontaktierung von n-dotiertem Silizium mit Niedertemperaturpasten aus. Diese direkte laserunterstützte Kontaktierung ist technologisch Neuland und hat noch nicht die benötigte Leistungsfähigkeit erreicht. Diese Technologie erfordert weitere Entwicklungsarbeiten bevor eine erfolgreiche Integration in das MWT-plus Solarzellenkonzept möglich wird.

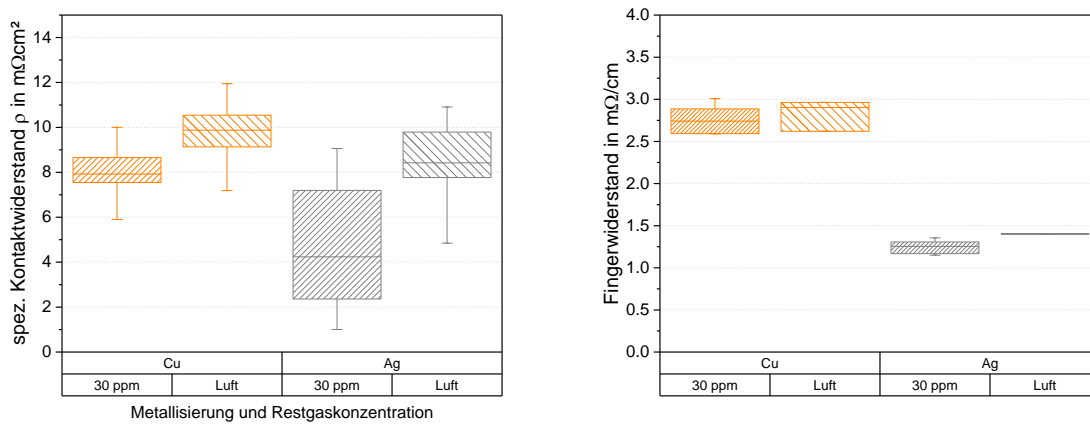
### **Arbeitspaket 3.3: Anlagendemonstration Inertgasofen/Laseraerosolbehandlung**

Die Anlagendemonstration des von REHM Thermal Systems GmbH entwickelten Inertgasofens erfolgte im Technikum des FhG IKTS. Die Prozessierung und Charakterisierung von 200 Heterojunction-Solarzellen erfolgte in enger Kooperation der Meyer Burger (Germany) AG, REHM Thermal Systems GmbH und dem FhG IKTS. Die Zellen wurden durch die Meyer Burger (Germany) AG mit den durch das FhG IKTS bereitgestellten Pasten bedruckt. Anschließend erfolgte die Metallisierungstrocknung durch die REHM Thermal Systems GmbH in Kooperation mit der FhG IKTS unter Variation der Trocknungstemperatur, -dauer, Wärmeübertragung und Ofenatmosphäre.

Der Ofen konnte unter hoher Auslastung stabil und sicher betrieben werden. Parallel durchgeführte Temperatur- und Restgaskonzentrationsmessungen zeigten nur geringe Wertschwankungen innerhalb der spezifizierten Toleranzgrenzen. Für die betrachteten Metallisierungen konnte kein allgemeines optimales Härtingsprofil definiert werden. Jede Pastenrezeptur benötigt eine neue Parameteroptimierung speziell in den Aspekten

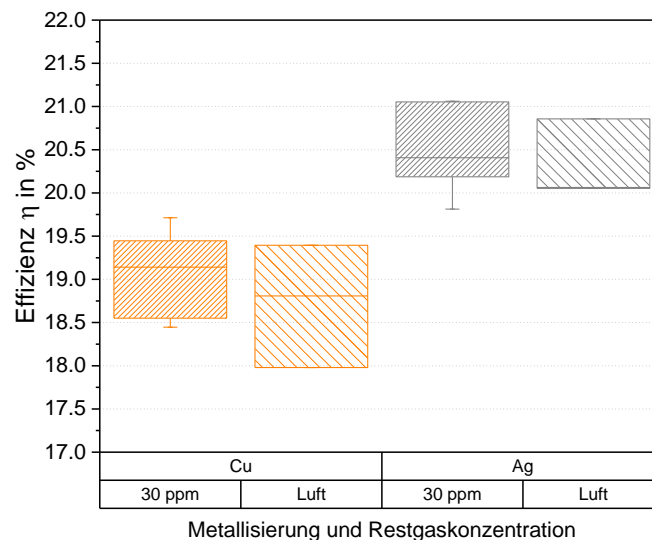


Wärmeübertragung und Profildauer. Der positive Einfluss der inerten Härtung auf die elektrischen Kenndaten und Eigenschaften der Metallisierung konnte auch auf Zellebene nachgewiesen werden (Abbildung 62).



**Abbildung 61:** Spezifischer Kontaktwiderstand zwischen Heterojunction-Solarzelle und Metallisierung (links) und Fingerwiderstand der gedruckten Metallisierungen (rechts) in Abhängigkeit von Wirkphase und Restgaskonzentration (rechts)

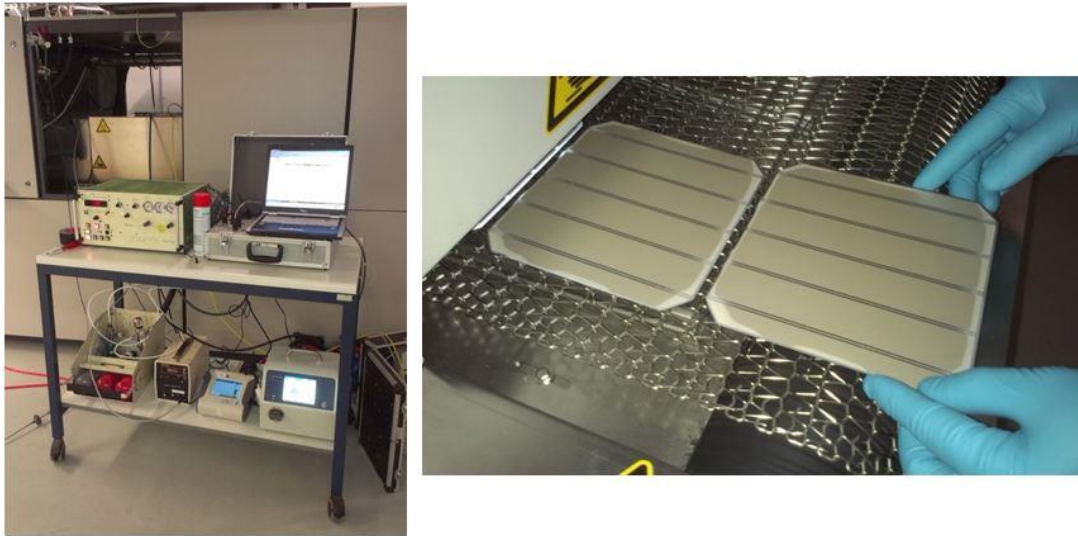
Der Fingerwiderstand der Kupfermetallisierung ist aufgrund der Voroxidation der Kupferpartikel höher im Vergleich zur Silbermetallisierung. Die Widerstandsreduktion resultiert unter Sauerstoffreduktion wie bereits in AP 1.5 beschrieben aus einer verstärkten Polymerisation des Pastenbinders. Dadurch werden die metallischen Wirkpartikel verstärkt komprimiert und eine höhere Anzahl leitfähiger Pfade generiert. Der positive Einfluss dieser Widerstandsreduktion resultiert zusätzlich in einer messbaren Effizienzsteigerung (Abbildung 62).



**Abbildung 62:** Effizienz von Heterojunction-Solarzellen in Abhängigkeit von Wirkphase und Restgaskonzentration.

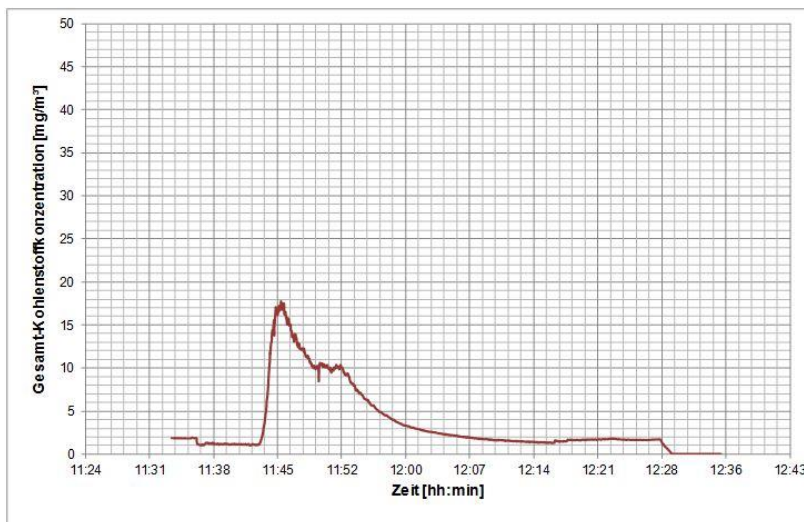
Nachfolgend wurden die Abscheider einer Anlagendemonstration unterzogen –respektive der Wirkungsgrad getestet. Dafür wurden geeignete Messzugänge an den Systemen festgelegt.

Zu Bewertung der Emissionscharakteristik des Inertgasofens wurden beschichtete Wafer in den Ofen eingefahren und die Abluft aus dem Trocknerofen vermessen. Abbildung 63 zeigt den Versuchsaufbau am Inertgasofen im FhG IKTS Technikum. Die Untersuchungen wurden in einer nahezu sauerstofffreien Stickstoff-Atmosphäre durchgeführt.



**Abbildung 63:** Versuchsaufbau am Inertgasofen im Technikum (links) und Einfahrt beschichteter Wafer in den Inertgasofen (rechts).

Während des Durchlaufs der beschichteten Wafer durch den Trocknungsofen werden flüchtige Kohlenwasserstoffe aus den Druckpasten verdampft und gelangen in die Abluft. Über den installierten Abscheider erfolgt eine Reduktion der Kohlenwasserstoffe.



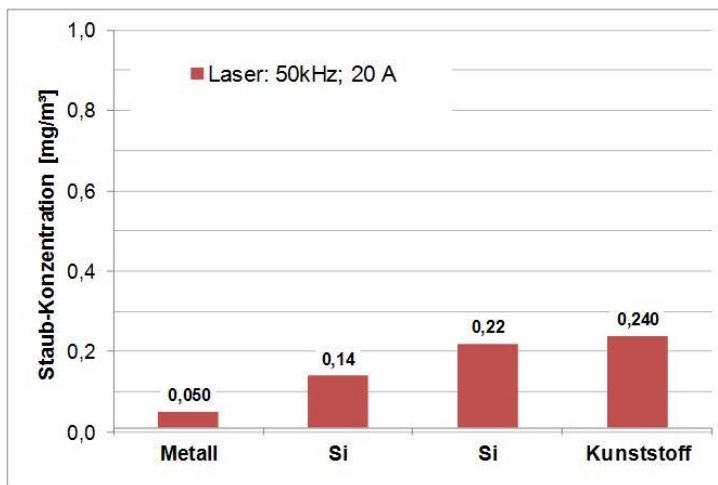
**Abbildung 64:** Kohlenwasserstoffgehalt der Abluft aus dem Inertgasofen.

In Abbildung 64 ist der Verlauf der Kohlenwasserstoffkonzentration der Abluft aus dem Inertgasofen aufgezeigt. Dabei ist zu erkennen, dass nur eine minimale Emission von 15 mg/m<sup>3</sup> in der Abluft gemessen wird. Zur besseren Untersuchung der Wirksamkeit erfolgte ein vollflächiger Druck auf den Wafern, was zu einer deutlich erhöhten Emission führt. Bei einem industriellen Massendruckprozess werden nur einzelne Linien und Kontakte auf den

Wafer gedruckt, was die Emission deutlich reduziert. Als Konzentration für die Abluft werden dann Werte unter  $10 \text{ mg/m}^3$  erreicht und die TA-Luft zielführend eingehalten.

Der Abscheider für Laserabluf der ULT AG wurde im Technikum des FhG IWS getestet. Dazu wurden verschiedene Materialien bearbeitet, die Abluft über den Abscheider behandelt und die Ausblasluft des Abscheiders untersucht. In Abbildung 65 wird verdeutlicht, dass die Aerosole von Silizium aber auch anderer Materialien effizient durch das Abscheidersystem zurückgehalten werden können. Die Reingaskonzentration liegt deutlich unter  $1 \text{ mg/m}^3$ .

Das Abscheidesystem trägt somit zu einem hochreinen Arbeitsumfeld während der Laserprozessierung bei. Dies hat einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität der weiteren Prozessierung und damit auf die Qualität des Wafers.



**Abbildung 65:** Wirkungsgrad des Abscheidesystems Laseraerosol für verschiedene Werkstoffe.

## 7. Literatur

---

- [i] T. Mishima et al. "Development status of high-efficiency HIT solar cells", Solar Energy Materials & Solar Cells 95 (2011) 18-21
- [ii] <http://www.hetsi.eu>
- [iii] T. Kinoshita et al "THE APPROACHES FOR HIGH EFFICIENCY HIT™ SOLAR CELL WITH VERY THIN (< 100 µm) SILICON WAFER OVER 23%", Proc. 26<sup>th</sup> PVSEC p.871 (2011)
- [iv] P.J. Cousins et al. "Generation 3: Improved performance at lower cost" 35<sup>th</sup> IEEE PVSEC, Hawaii (2010)
- [v] D. Munoz et al. "PROGRESS ON HIGH EFFICIENCY STANDARD AND INTERDIGITATED BACK CONTACT SILICON HETEROJUNCTION SOLAR CELLS" Proc. 26<sup>nd</sup> PVSEC (2011)
- [vi] S. Peters "Rapid Thermal Processing of Crystalline Silicon Materials and Solar Cells", Dissertation, Universität Konstanz, FB Physik, 2004
- [vii] K.-K. Hong et al. "Mechanism for the formation of Ag crystallites in the Ag thick-film contacts of crystalline Si solar cells", Solar Energy Materials & Solar Cells 93 (2009) 898-90
- [viii] N. Wehkamp et al. "Laser Chemical Metal Deposition for Silicon Solar Cell Metallisation", 3<sup>rd</sup> Workshop on Metallization for Crystalline Silicon Solar Cells, Charleroi, Belgium, 2011
- [ix] G. Hamm et al. "Development of a Plated Nickel Seed Layer for Front Side Metallization of Silicon Solar Cells", Proc 24<sup>th</sup> PVSEC (2009).
- [x] D. Lachenal et al. "HIGH EFFICIENCY SILICON HETEROJUNCTION SOLAR CELL ACTIVITIES IN NEUCHATEL, SWITZERLAND" Proc. 25<sup>th</sup> PVSEC (2010).
- [xi] J.M. Bovatsek et al. "HIGH-SPEED FABRICATION OF LASER DOPING SELECTIVE EMITTER SOLAR CELLS USING 532 NM CONTINUOUS WAVE (CW) AND MODELOCKED QUASI-CW LASER SOURCES" Proc 26<sup>th</sup> PVSEC (2011)
- [xii] S. Gall et al. "High Energy/large spot Excimer Laser for high efficient Selective Emitters solar cells" Proc. 25<sup>th</sup> PVSEC (2010)
- [xiii] U. Jäger et al. "BEAM SHAPING FOR HIGH THROUGHPUT LASER DOPED SELECTIVE EMITTER SOLAR CELLS" Proc 26<sup>th</sup> PVSEC (2011)
- [xiv] G. Agostinelli, et. al "Very low surface recombination velocities on p-type silicon wafers passivated with a dielectric with fixed negative charge"; Solar Energy Materials & Solar Cells 90 (2006) 3438-3443
- [xv] K. Vanormelingen et al. "SURFACE PASSIVATION FOR INDUSTRIAL SOLAR CELLS" Proc. 26<sup>th</sup> PVSEC p.1682 (2011)
- [xvi] Andrew J. Lovinger "DEVELOPMENT OF ELECTRICAL CONDUCTION IN SILVER-FILLED EPOXY ADHESIVES", The Journal of Adhesion 10:1 (1979) 1-15

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN -	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht Gesamtprojekt	
3. Titel Hocheffiziente kristalline Solarzellen auf Basis der Metal-Wrap-Through Technik (MWT-plus)		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Dorit Linaschke, Niels Schilling	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2015	6. Veröffentlichungsdatum -
	7. Form der Publikation -	
	8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS Winterbergstraße 28 01277 Dresden	
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn		9. Ber. Nr. Durchführende Institution 062/163953
		10. Förderkennzeichen 03SF0420B
		11. Seitenzahl 59
16. Zusätzliche Angaben keine		13. Literaturangaben 16
		14. Tabellen 5
		15. Abbildungen 65
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) -		
18. Kurzfassung Innerhalb des Verbundprojektes wurde ein neuartiges Zellenkonzept erforscht und entwickelt. Dieses Zellenkonzept basiert auf der Kombination eines Heteroübergangs mit einer lokalen Verbindung der Vorderseitenmetallisierung mit der Rückseite (MWT = metal wrap through) durch metallisierte Via-Löcher. Mit diesem Konzept kann eine deutlich erhöhte Leistungsfähigkeit erreicht werden, da die Abschattung der Frontseitenmetallisierung signifikant reduziert werden kann. Dafür sind neuartige Zelldesigns, Materialien und Prozesse notwendig, die zunächst einzeln entwickelt und dann in das Gesamtsystem integriert wurden.		
19. Schlagwörter Solarzelle, Silizium Heterokontakt, Metal Wrap Through		
20. Verlag -	21. Preis -	

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN -	2. type of document (e.g. report, publication) Final project report	
3. title Hocheffiziente kristalline Solarzellen auf Basis der Metal-Wrap-Through Technik (MWT-plus)		
4. author(s) (family name, first name(s)) Linaschke, Dorit; Schilling Niels	5. end of project 31.12.2015	
	6. publication date -	
	7. form of publication -	
8. performing organization(s) (name, address) Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS Winterbergstraße 28 01277 Dresden	9. originator's report no. 062/163953	
	10. reference no. 03SF0420B	
	11. no. of pages 59	
12. sponsoring agency (name, address)  Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references 16	
	14. no. of tables 5	
	15. no. of figures 65	
16. supplementary notes -		
17. presented at (title, place, date) -		
18. abstract A novel solar cell concept is investigated and developed within this research project. This cell concept is based on the combination of a silicon heterojunction with a local interconnect of the front side metallization to the rear side through metallized via holes (MWT = metal wrap through). This concept enables clearly higher conversion efficiencies due to significantly reduced cell shading by the front side metallization. To realize the reduced shading, novel cell designs, materials and processes are required. Those are developed first as single processes and then integrated in the functional solar cell system.		
19. keywords Solar cell, silicon heterojunction, metal wrap through		
20. publisher -	21. price -	