

Abschlussbericht

für das Verbundprojekt

ALPHA

Auf Lichtstreuung basierte Prozessregelung für die Herstellung von Aluminium und Bor dotierten Zinkoxid-Frontkontakten für Siliziumdünnfilmsolarzellen

Teilprojekt:

Entwicklung des Regelkonzepts

Förderkennzeichen: 0325356B

Zuwendungsempfänger: Forschungszentrum Jülich GmbH, IEK-5 Photovoltaik

Förderzeitraum: 01.11.2011 - 30.04.2014

Berichtszeitraum: 01.11.2011 – 30.04.2014

Projektverantwortlich und Bericht:

Dr. Jürgen Hüpkes

Dr.-Ing. Gabrielle Jost

Gefördert durch:

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 0325356B gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Kooperationspartner

Forschungszentrum Jülich GmbH, IEK5-Photovoltaik, Jülich, kurz: Jülich
Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik, Braunschweig; kurz: IPM
LayTec in-line GmbH, Berlin; kurz: Laytec

1 Inhalt

2	Kurzdarstellung	4
2.1	Aufgabenstellung.....	4
2.2	Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	4
2.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	4
2.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand der Dinge.....	5
2.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	5
3	Eingehende Darstellung – Verlauf des Vorhabens.....	6
3.1	Ergebnisse im Einzelnen	6
3.1.1	AP 1.1 Aufbau eines Labormesssystems.....	6
3.1.2	AP 1.2 Herstellung von TCO	15
3.1.3	AP 1.3 Einbau in Solarzellen.....	16
3.1.4	AP 1.4 Korrelationen zu Solarzellen.....	16
3.1.5	AP 2.1 Konzept und Lastenheft.....	19
3.1.6	AP 3.5 Offline Kontrolle	19
3.1.7	AP 3.6 Korrelationsfunktion	21
3.2	Veröffentlichungen.....	29
3.3	Angemessenheit der geleisteten Arbeit	30
3.4	Verwertbarkeit der Ergebnisse	30
3.5	Fortschritte anderer während des Vorhabens	30
4	Referenzen.....	31

2 Kurzdarstellung

2.1 Aufgabenstellung

Im Rahmen des Gesamtprojektes sollte eine inline-fähige Messtechnik zur Erfassung der Streulichtcharakteristik von rauen Frontkontaktschichten für Silizium-Dünnschichtsolarzellen entwickelt werden. Mit Hilfe dieser Messung soll die Oberflächentextur der rauen Kontaktschichten, die sich als kritisch für die Stromausbeute aus Silizium-Dünnschichtsolarzellen herausgestellt hat, im Herstellungsprozess nachgeregelt werden können. Im hier präsentierten Unterprojekt „Entwicklung des Regelkonzept“ sollte dafür zunächst ein geeigneter Oberflächenqualitätsparameter aus der winkelaufgelösten Streulichtmessung extrahiert werden, der Aussagen über die Güte einer Frontkontaktoberfläche für die Solarzelle ermöglicht. Ferner sollte dieser Oberflächenparameter mit den Herstellungsparametern der Kontaktschichten in der Produktion verknüpft werden, um mit Hilfe der inline-fähigen Messtechnik eine Regelung der Schichteigenschaften zu ermöglichen.

2.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Im ALPHA Projekt schlossen sich zunächst vier Projektpartner mit unterschiedlichen Expertisen im Bereich der Herstellungstechnik für Zinkoxid und optischen Messtechnik zusammen. Im Bereich der Herstellungstechnik konnte Leybold Optics als Industriepartner und späterer Testkunde für die Inline-Messtechnik gewonnen werden. Im Bereich der Qualitätskontrolle konnte das Projekt auf die Expertise von Jülich zurückgreifen, um geeignete Qualitätsparameter zu identifizieren und ein geeignetes Regelkonzept zu erstellen. Im Bereich des Prototypbaus schlossen sich Laytec und IPM im Projekt zusammen. Basierend auf dem gemeinsamen Knowhow sollte ein inline-fähiges Werkzeug entwickelt werden, das die Qualität und die Reproduzierbarkeit von Zinkoxid-Frontkontakten verbessert und somit die Effizienz und Ausbeute in der Produktion von Silizium-Dünnschichtsolarzellen nachhaltig steigert.

2.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Gesamtprojekt gliederte sich in drei große Arbeitspakete, die jeweils in kleine Arbeitseinheiten unterteilt sind. Dabei lag die Hauptverantwortung für das Arbeitspaket 1 – Lichtstreuung und Solarzellen – beim Projektpartner Jülich. In diesem Paket sollten insbesondere Zinkoxidschichten hergestellt und die Effekte unterschiedlicher Oberflächentexturen auf Solarzellen untersucht werden. Ziel ist das Identifizieren geeigneter Qualitätsparameter aus der winkelaufgelösten Streulichtmessung. Diese Qualitätsparameter wurden im Arbeitspaket 3 – Integration in Produktionslinie – vom Partner Jülich auf Ihre Korrelation zu den Herstellungsparametern untersucht, um die Oberflächentextur im Herstellungsprozess regelbar zu machen. Die Arbeitspakete 2 – Aufbau der Inline-Messtechnik – und weitere Aufgaben des Arbeitspaketes 3 wurden von den Partnern IPM und Laytec übernommen. Die Integration in die Produktionslinie sollte ursprünglich beim Partner Leybold Optics durchgeführt werden. Aufgrund einer stark veränderten Marktlage hatte sich Leybold Optics bereits kurz nach Beginn des Projektes entschieden, die Entwicklung von Produktionsanlagen für die Silizium-

Dünnschicht-Technologie einzustellen und das Projekt zu verlassen. Basierend auf der damaligen Situation wurde unter Abstimmung mit dem Projektträger beschlossen, das Projekt zunächst ohne Industriepartner zu starten und im Verlauf einen neuen Testkunden zu gewinnen. Aufgrund einer weiteren Verschlechterung der Marktlage war das Konsortium jedoch bis zum Projektende nicht in der Lage, einen Testkunden für die Integration des Messsystems in die Produktion zu finden, obschon durch die entwickelte Messtechnik mehrfach öffentlichkeitswirksam auf Ausstellungen gezeigt wurde. Daher wurde in der zweiten Hälfte des Projektes der bis dahin gefertigte Prototyp zu Evaluierung nach Jülich gebracht.

2.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand der Dinge

Es ist bereits aus Studien hinlänglich bekannt, dass die Frontkontakt-Oberfläche aufgrund ihrer lichtstreuenden Eigenschaften, die Stromausbeute aus einer Solarzelle nachhaltig beeinflusst [1-3]. Der integrale Haze als Maß für die Lichtstreuung rauer Oberflächen, der zunächst vielfach als Qualitätskriterium für Frontkontakt-Oberflächen verwendet wurde, hat sich in Studien als nicht aussagekräftig genug gezeigt [4,5]. Auch wurde mit Hilfe von Modellen schon mehrfach gezeigt, dass sich die winkelaufgelöste Streulichtmessung als einfache optische Messmethode eignet, um Rückschlüsse auf die Oberflächentextur zu ziehen [6-8]. Es wurden auch bereits erste Versuche unternommen, die Oberfläche und deren Qualität der Kontaktschicht für Silizium-Dünnschichtsolarzellen mit Hilfe der winkelaufgelösten Streulichtmessung zu beschreiben [5,9,10]. Allerdings konnten bisher nur Zusammenhänge zwischen der Großwinkelstreuung und der Stromausbeute aus einfachen $\mu\text{c-Si:H}$ -Solarzellen gezeigt werden. Was fehlt ist ein Oberflächen-Qualitätsparameter für die weiterentwickelte $\text{a-Si:H}/\mu\text{c-Si:H}$ -Tandemsolarzelle, die dem Stand der Produktionstechnik entspricht. Erste Versuche auch hier die Großwinkelstreuung als Maß der Qualität zu verwenden [11], konnten bei einer ausgeweiteten Bandbreite von unterschiedlichen Frontkontakt-Texturen nicht eingesetzt werden. Aus Studien ist bereits bekannt, dass die Herstellungsparameter der Abscheidung und des Textur-Ätzprozesses die Oberflächentextur signifikant beeinflussen [12-14]. Eine Korrelation zwischen den Messwerten der winkelaufgelösten Streulichtmessung und den Herstellungsparametern der Frontkontaktschichten konnte bisher aber nicht gezeigt werden. Diese ist jedoch für eine Regelung des Herstellungsprozesses unerlässlich.

2.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Jülich arbeitete im Rahmen des Projektes insbesondere zur späteren Validierung der Messergebnisse, die mit dem Prototyp erfasst wurden, im Rahmen eines Round Robin Versuchs zur winkelaufgelösten Streulichtmessung mit dem Helmholtz Zentrum Berlin und der Technischen Universität Delft zusammen.

3 Eingehende Darstellung – Verlauf des Vorhabens

Im Folgenden werden nur die Arbeitspakete ausführlich dargestellt, in denen Jülich der hauptverantwortliche Projektpartner war. Beiträge zu weiteren Arbeitspaketen und Kooperationen mit den anderen Projektpartnern werden der Vollständigkeit halber an gegebener Stelle ebenfalls aufgeführt.

3.1 Ergebnisse im Einzelnen

3.1.1 AP 1.1 Aufbau eines Labormesssystems

In Jülich wurde zu Beginn des Projektes neben dem goniometrischen Labormesssystem ein weiteres Messsystem aufgebaut, das die Streuung zweidimensional erfassen kann. Erste Vorversuche wurden zuvor im Rahmen des Vorhabens LIMA getätigt. Im ersten Aufbau wird das Licht direkt von der Probe auf den Chip einer Kamera gestreut. Aufgrund der Beschränkungen der Verfügbarkeit von Kameras mit großen Chips und entsprechenden geometrischen Abmessungen sind die detektierbaren Winkel bei diesem Aufbau jedoch auf etwa 30° beschränkt. Es wurden verschiedene optische Bauelemente wie Linsen und Spiegelsysteme zur Aufweitung des Sichtfeldes der Kamera betrachtet, jedoch alle aufgrund hoher Kosten oder unzumutbarer Messdauererhöhung verworfen.

Anstelle dessen wurde in Jülich die kostengünstige Möglichkeit, eine Streulichtscheibe als Abbildungsschirm zwischen Probe und Kamera einzubringen, untersucht. Bei den ersten Versuchen wurde als Streulichtschirm herkömmliches Papier verwendet, da es eine nahezu Lambert'sche Streucharakteristik aufweist. Als Nachteil dieser Methode stellten sich die Reflexion an und die Absorption in der Streuscheibe heraus. Die Reflexion lässt sich jedoch mit Hilfe einer Korrekturfunktion (s. **Abbildung 1**) korrigieren.

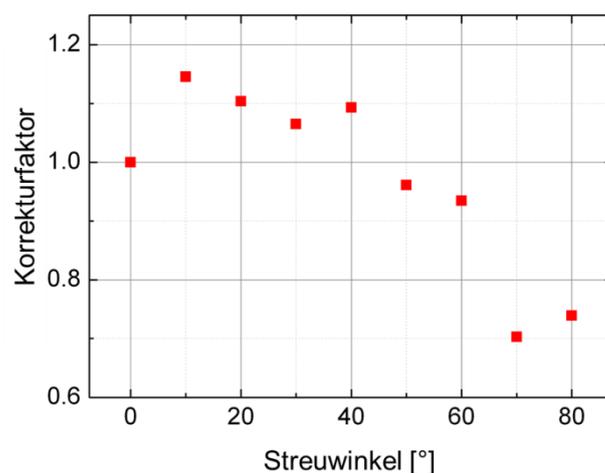


Abbildung 1: Korrekturfaktor von Papier für die Lichtstreuung als Funktion des Streuwinkels. Abweichungen vom Wert 1 beschreiben Abweichungen vom Lambert'schen Streuverhalten.

Basierend auf diesen ersten Untersuchungen und der bis dahin vorgenommenen Evaluierung verschiedener Ansätze bei den Projektpartnern einigte sich das Konsortium, den Ansatz Streulichtschleibe zu favorisieren und voranzutreiben. Die Projektpartner Laytec und IPM konzipierten einen ersten Prototyp, dessen Detektorsystem aus einer gläsernen Streulichtschleibe/Mattscheibe, Kamera und Objektiv bestand. Die nötige Korrekturfunktion für die Streulichtschleibe wurde durch die Projektpartner bestimmt und in einer Messsoftware implementiert (siehe Details in Projektberichten IPM und Laytec). Erste Testmessungen zeigten vielversprechende Ergebnisse.

Nachdem es aufgrund der Marktlage nicht möglich war, geeignete Industriepartner für den Test des Prototypen in einer Produktionslinie zu gewinnen, wurde der inline-fähige Prototyp nach Jülich transportiert und umgerüstet sowie teilweise erweitert, um den Laboranforderungen zu genügen. Dazu wurde das rollenbasierte Transportsystem entfernt und ein Mappingtisch als Probenträger eingesetzt. Zur Steigerung der Betriebssicherheit wurde ein Laser mit einer geringeren optischen Ausgangsleistung ($< 1 \text{ mW}$) verwendet. Der Jülicher Laboraufbau ist in **Abbildung 2** zu sehen. Ziel war zunächst die Evaluierung der erzielten Messdaten mit dem 2D-Prototyp im Abgleich mit dem bisher verwendeten 1D-Laboraufbau.

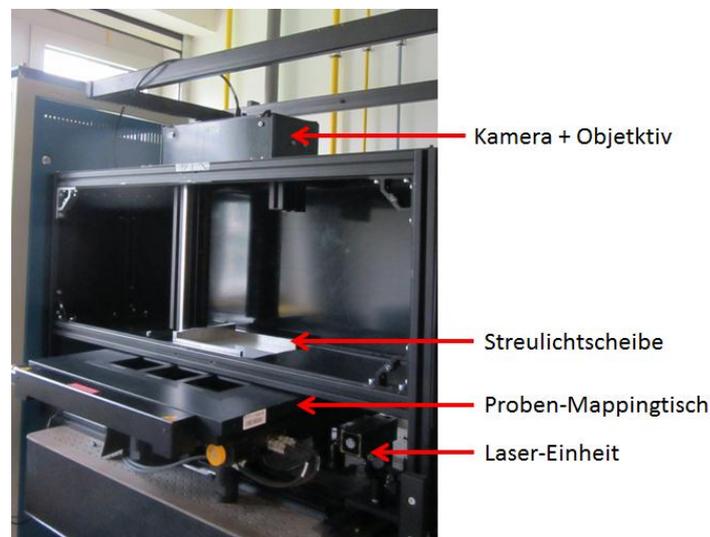


Abbildung 2: 2D-Labormessplatz in Jülich.

Nach ersten Testmessungen wurden die von den Projektpartnern geliehenen Komponenten Kamera und Objektiv von Jülich beschafft und ersetzt. Für die Laborversuche wurde der 2D-Streulichtmessplatzes von Jülich darüber hinaus erweitert. Neben einem grünen Laser der Wellenlänge 532 nm werden im Rahmen des Projektes zwei weitere in der optischen Ausgangsleistung regelbare Laser der Wellenlänge 405 nm und 785 nm beschafft und in den Messplatz integriert. Auf diese Weise kann eine Probe mit mehreren Wellenlängen vermessen werden. Da die Laser über den Computer des Messplatzes einzeln angesteuert werden können, kann eine Optik implementiert werden, die die einzelnen Laserstrahlen auf einen Strahlengang bündelt (siehe auch **Abbildung 3**), wodurch derselbe Messpunkt nacheinander mit allen drei Wellenlängen vermessen werden kann.

Die Software des neuen Messplatzes musste ebenfalls an die veränderten Aufgaben für den Einsatz als Offline-Kontrollsystem in Jülich angepasst werden. Hierbei wurde Jülich durch das IPM unterstützt. Abschließende Verbesserungen der Bedienerfreundlichkeit der Software und die schnelle Extraktion von Qualitätsparametern durch eine detaillierte Auswertung der Messdaten wurden und werden weiterhin in Jülich in Eigenregie durchgeführt.

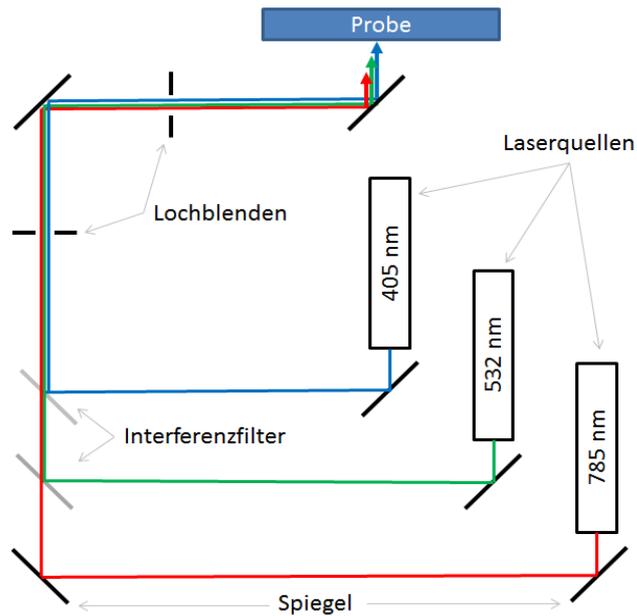


Abbildung 3: Strahlengang Labormessplatz Jülich mit drei Laserquellen.

Untersuchungen zur Evaluierung des 2D-Messsystems

Auswirkungen einer Messsignal-Abschwächung im 2D-Messplatz

Im Vergleich zum originalen Messaufbau des Prototyps durch das IPM und Laytec wurde in Jülich die Laserquelle (optische Ausgangsleistung 200 mW) durch eine schwächere Laserdiode ersetzt (optische Ausgangsleistung < 1 mW). Um zu überprüfen, ob das Messsignal dennoch stark genug ist, um oberhalb des Untergrund-Rauschens des Messsystems zu bleiben, wurden Messungen mit zusätzlichen Strahlabschwächern durchgeführt. In Abbildung 4 sind die AID Werte des 2D-Messplatzes gemessen an einer Std. ZnO Probe mit und ohne Strahlabschwächer unter Einsatz des Jülicher Lasers dargestellt. Der Abschwächungsfaktor ist jeweils im Graphen angegeben. Erst ab einer Abschwächung um zwei Größenordnungen lässt sich eine Veränderung des Messsignals erkennen. Bei über vier Größenordnungen Abschwächung ist das Messsignal nicht mehr erfassbar. Damit befindet sich die aktuelle Messanordnung mit dem Jülicher Laser bis zu drei Größenordnungen über dem Rauschniveau des Messsystems und damit in einem geeigneten Betriebsbereich. Aufgrund der geringen Intensität des Messsignals im Großwinkelbereich musste die Belichtungszeit der Kamera jedoch erhöht werden. Es kam zu unerwünschten Rauscheffekten. Diese zeigten sich insbesondere im Großwinkelbereich sehr deutlich, da hier die Intensität einer Vielzahl an nur sehr schwach beleuchteten Pixeln integriert wird, wodurch das Pixelrauschen das gemessene Signal überschreitet. Um dieses Problem zu umgehen, wurde eine Dunkelmessung implementiert, die standardmäßig als Untergrund von der beleuchteten Messung abgezogen wird.

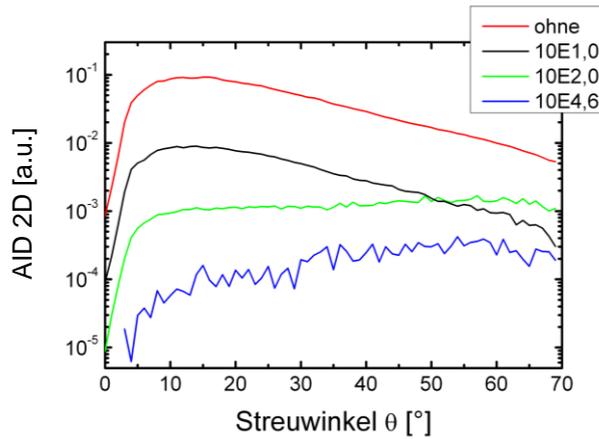


Abbildung 4: Messungen eines Std. Jülich ZnO:Al im 2D-Prototypen mit 1 mW Laser (532 nm) unter Einbau von Strahlabschwächern. Die jeweiligen Abschwächungsfaktoren sind im Diagramm angegeben.

Vergleich 1D-Labormessplatz und 2D-Prototyp

Direkte Vergleichsmessungen mit dem 1D-Labormessplatz in Goniometer-Anordnung und dem modifizierten 2D-Labormessplatz zeigen deutliche Unterschiede in den erzielten Ergebnissen (siehe **Abbildung 5**). Die Messdaten sind hier jeweils normiert auf den Wert bei 45°. Die Unterschiede wurden im weiteren Verlauf des Projektes detaillierter von Jülich untersucht. Da auch der 1D-Labormessplatz in Goniometer-Anordnung ein eigens von Jülich konzipiertes System darstellt, wurden die mit diesem Messaufbau erfassten Daten mit Hilfe eines Round Robin Experiments mit externen Partnern überprüft, um mehr über Messfehler und die entsprechend erforderliche Auswertungen der Messdaten sicherzustellen.

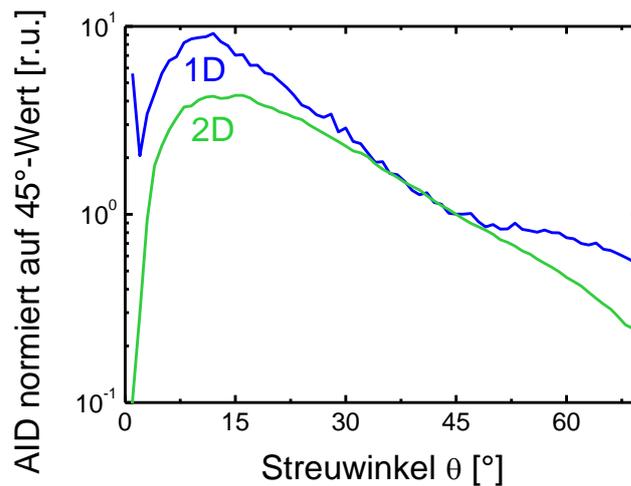


Abbildung 5: Referenzprobe gemessen mit 1D-Labormessplatz und 2D-Prototyp. Messergebnisse sind auf den Wert bei 45° normiert.

Round Robin Experiment

Als Round Robin Partner wurden von Jülich sowohl die Technische Universität Delft als auch das Helmholtz Zentrum Berlin (kurz: HZB) eingebunden. Beide Partner verfügen über einen kommerziellen winkelaufgelösten Detektor. Dieser sogenannte „ARTA“-Detektor ist eine zusätzliche Detektoreinheit, die mit einem UV/VIS-Fotospektrometer der Firma Perkin Elmer betrieben werden kann. Durch diese Kombination kann die Messwellenlänge flexibel ausgewählt werden. Der Aufbau des ARTA Detektors ist schematisch in **Abbildung 7** dargestellt. Im Gegensatz zum 1D-Labora Aufbau in Jülich (siehe schematische Darstellung in **Abbildung 6**), der mit einer Laserquelle arbeitet, wird die Probe im ARTA-Detektor nicht mit kohärentem Licht angeregt. Außerdem ist die Anregung flächig und nicht wie im 1D-Labora Aufbau punktförmig, was automatisch zu einer verschlechterten Winkelauflösung führt.

Aufgrund technischer Probleme beim Betrieb des ARTA-Detektors an der TU Delft wurden die Testmessungen letztendlich nur beim Helmholtz Zentrum Berlin durchgeführt. Die verwendete Wellenlänge beim 1D-Labora Aufbau ist standardmäßig 550 nm. Für die Referenzmessung des ARTA-Messplatzes wurde mit 532 nm die Wellenlänge, die auch der 2D-Prototyp besitzt, verwendet. Die Schrittweite des 1D-Labora Aufbaus liegt stets bei 1° , beim ARTA-Detektor wurde hingegen eine Schrittweite von 5° verwendet, um die Messdauer zu verkürzen.

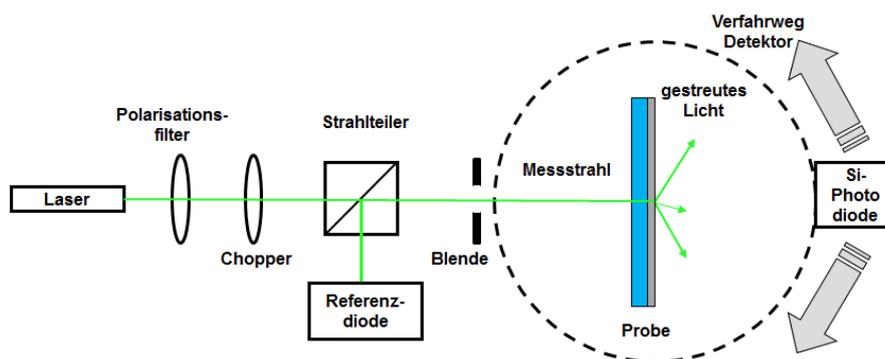


Abbildung 6: Schematischer Aufbau des 1D-Labormessplatzes in Jülich.

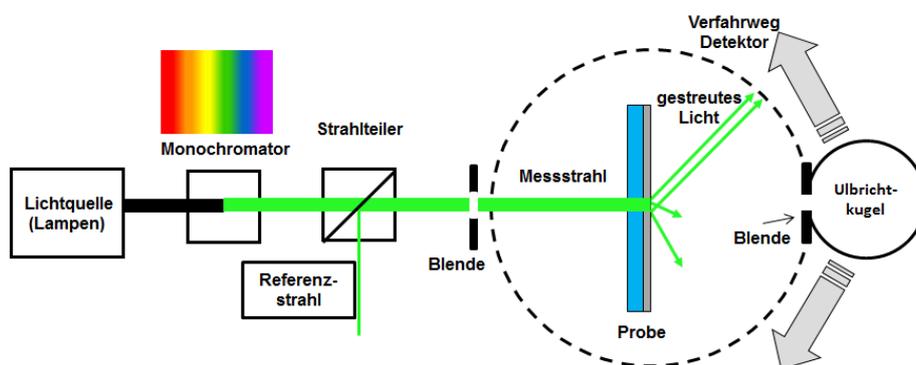


Abbildung 7: Schematischer Aufbau des ARTA-Detektoraufsatzes mit Photospektrometer am HZB.

Bei den Testproben handelte es sich um eine gezielte Auswahl an dicken und dünnen Substratgläsern sowie darauf befindlichen stark sowie eher schwach streuenden TCO-Oberflächen. Zusätzlich wurden

sowohl isotrop streuende als auch anisotrop streuende Proben verwendet. Eine genauere Probenübersicht kann Tabelle 1 entnommen werden.

Tabelle 1: Probenübersicht des Round Robin Tests mit dem Helmholtz Zentrum Berlin.

Proben ID	Glassubstrat		TCO Material	Oberflächentextur	Rauigkeit
	Typ	Dicke			
1 Asahi U	Float (grün) <i>Erhöhte Glasabsorption</i>	1 mm	SnO ₂ :F	Einfachtextur: Kleine Pyramiden, isotrop	Gering
2 Asahi VU	Float (white)	3.3 mm	SnO ₂ :F	Einfachtextur: Kleine Pyramiden, isotrop	Gering
3 ZnO:Al Jülich-Typ	Corning	1.1 mm	ZnO:Al	Einfachtextur: Große Krater ($d \approx 1 \mu\text{m}$) anisotrop	Hoch
4 ZnO:Al	Float (weiß)	3.3 mm	ZnO:Al	Einfachtextur: Große Krater ($d > 1 \mu\text{m}$) anisotrop	Hoch

Die Ergebnisse des Round Robin Versuchs sind in **Abbildung 8** (a) und (b) zu sehen. Dargestellt sind jeweils die Rohdaten der beiden Messplätze normiert auf den Wert bei 45°. Der Kurvenverlauf ist sowohl für die TCOs auf dicken Gläsern (a) als auch für die TCOs auf dünnen Gläsern (b) jeweils sehr vergleichbar. Es treten kleinere Abweichungen zwischen den beiden Messplätzen auf, die sich jedoch durch die unterschiedliche Anregungsart und Detektorkonfiguration begründen lassen. Die flächige und zum Teil sogar leicht inhomogene Beleuchtung des ARTA-Detektors wirkt sich negativ auf das Auflösungsvermögen des Messsystems aus. Im Allgemeinen kann aber festgehalten werden, dass die beiden Messplätze vergleichbare Ergebnisse liefern.

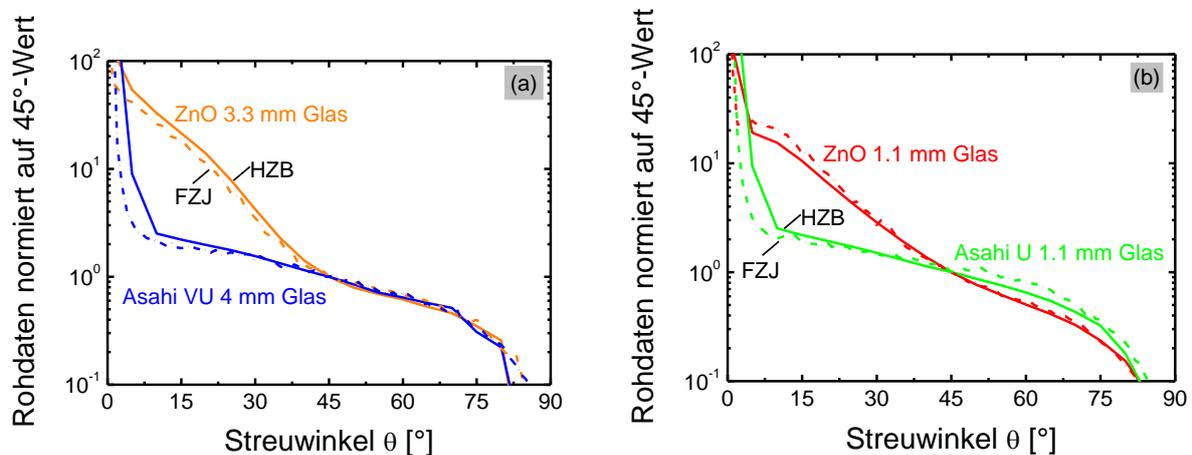


Abbildung 8: Vergleich der Messungen mit dem ARTA-Detektor (HZB) und dem 1D-Goniometer-Labormessplatz (FZJ). Normierte Rohdaten für (a) TCOs auf dicken Gläsern und (b) TCOs auf dünnen Gläsern.

Zusätzliche Optische Effekte im 2D-Prototyp

Da sich in den ersten Testmessungen Unterschiede zwischen dem 1D- und dem 2D-Messplatz gezeigt haben, liegt nahe zu vermuten, dass diese mit der Messplatzkonfiguration verknüpft sind. Diese Problematik wurde zwischen den Projektpartnern mehrfach diskutiert. Anders als die beiden Messplätze, die im Round Robin Versuch verglichen wurden, hat der 2D-Messplatz eine zusätzliche optische Ebene in Form der Streulichtscheibe zwischen der Probe und dem detektierenden Element, der Kamera mit Objektiv. Der Einbau der gläsernen Streulichtscheibe kann unerwünschte optische Effekte hervorrufen und vorhandene Effekte sichtbar machen wie in **Abbildung 9** mit Hilfe von gestrichelten grünen Linien verdeutlicht wird. Zum einen kann innerhalb der zu messenden Probe Licht im Glas und der Zinkoxidschicht eingefangen werden, über längere Distanzen wandern und später wieder auskoppeln und außerdem kann Licht beim 2D-Messplatz zwischen der Streulichtscheibe und der Probe reflektiert werden. Zusätzlich muss die Abstrahlcharakteristik der Streulichtscheibe mit berücksichtigt werden. Bisher ist in der Software des Prototyps nur der direkte Durchgang des Lichts (durchgezogene grüne Linien) und die darin auftretenden Reflexionen und Absorptionen mit Hilfe einer Korrekturfunktion berücksichtigt (siehe auch Projektberichte IPM und Laytec).

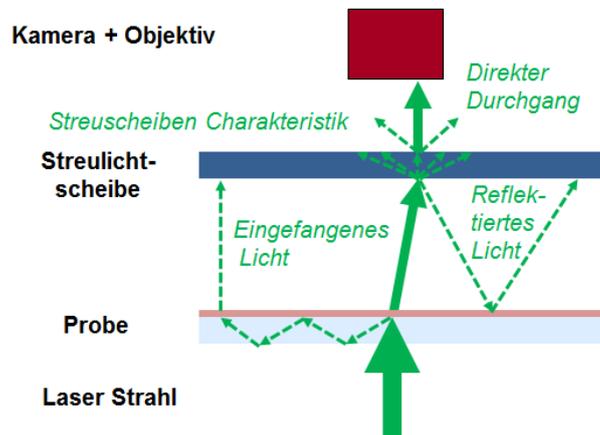


Abbildung 9: Schematische Darstellung der Interaktion der vermessenen Probe mit der Streulichtscheibe. Auftretende, unerwünschte, optische Effekte sind mit gestrichelten grünen Linien gekennzeichnet.

Um die zusätzlich auftretenden Effekte zu untersuchen, wurden in Jülich spezielle Messungen unter Verwendung von Masken durchgeführt. Die Proben wurden zunächst regulär im 2D-Prototyp vermessen und im Anschluss daran mit einer absorbierenden Blende mit einer Öffnung von 5 mm auf der TCO-Seite versehen. Mit dieser Messkonfiguration können die optischen Effekte wie Lichteinfang in der Probe und auch die Mehrfachreflexion zwischen Streulichtscheibe und Probe unterdrückt werden. Lediglich die Abstrahlcharakteristik der Streulichtscheibe, wird hierbei noch nicht berücksichtigt. Um einen Vergleich mit der 1D-Messung anzustellen wurde auch hier die Blende verwendet. Der Vergleich der beiden Messungen ist in **Abbildung 10** dargestellt. Insbesondere der Großwinkelbereich der beiden Messungen passt nun deutlich besser, allerdings ergeben sich noch immer Abweichungen zwischen den beiden Messplätzen. Ähnliche Effekte sieht man für alle vier Probenotypen, die vermessen wurden (siehe **Abbildung 11**).

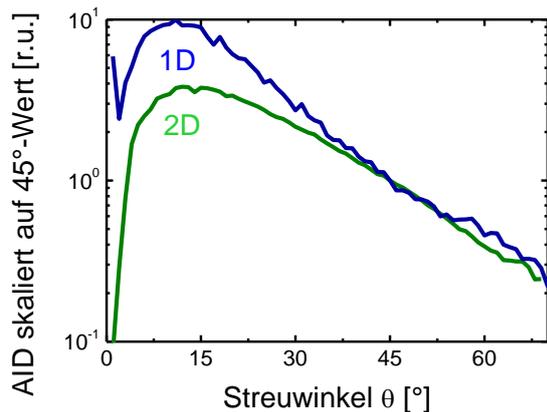


Abbildung 10: Vergleich der Messung mit 1D- (blau) und 2D-Messplatz (grün) an einer ZnO-Probe.

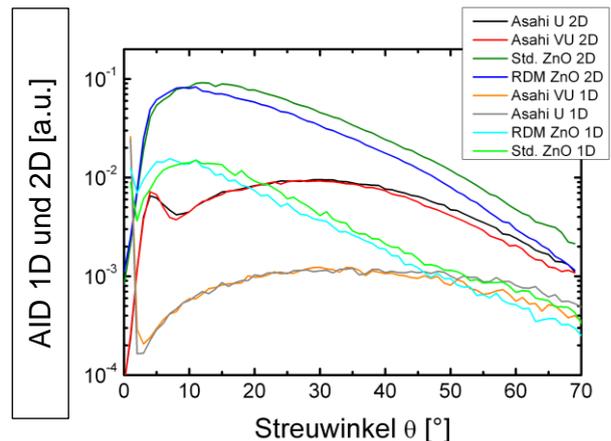


Abbildung 11: Messung mit Maske in 1D- und 2D-Messplatz - unterschiedliche Proben. Messwerte nicht normiert.

Da die Messung mit Maske noch immer nicht zu einer vollständigen Übereinstimmung der Messungen von 1D- und 2D-Messplatz führte, musste als letzte Normierung die Abstrahlcharakteristik der Streulichtscheibe berücksichtigt werden. Um die Abstrahlcharakteristik experimentell zu ermitteln und daraus seine Korrekturfunktion zu erzeugen, wurde in Jülich eine ZnO-Probe zunächst sowohl im 1D- als auch im 2D-Messplatz mit absorbierender Maske vermessen. Aus den sich ergebenden Werten wurde anschließend pro Winkel ein Korrekturfaktor bestimmt (siehe **Abbildung 12**). Dieser wurde dann angewendet, um Folgemessungen des 2D-Messplatzes zu korrigieren. In **Abbildung 13** ist die Originalmessung des 2D-Messplatzes (rot), die Originalmessung des 1D-Messplatzes (grün) und die mit Hilfe des Korrekturfaktors korrigierte 2D-Messung (blau) eingetragen. Die korrigierte Messung liefert eine sehr gute Übereinstimmung mit der 1D-Messung. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass die Korrekturfaktoren auch für andere Proben angewandt werden können. Solange die Probeneigenschaften der Probe ähnlich sind, die zur Normierung herangezogen wurde, liefern die Korrekturfaktoren eine gute Anpassung, bei stark abweichenden Probeneigenschaften müssen die Korrekturfaktoren jedoch neu bestimmt werden.

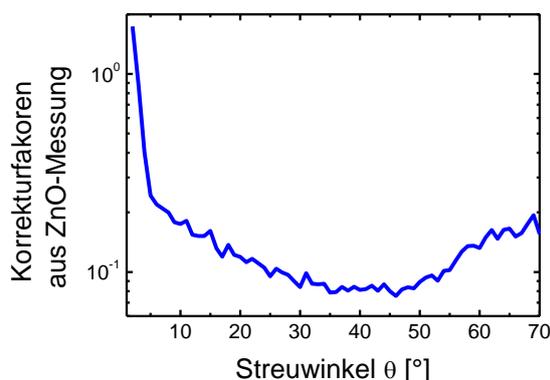


Abbildung 12: Experimentell ermittelte Korrekturfaktoren für 2D-Prototyp aus ZnO-Messung.

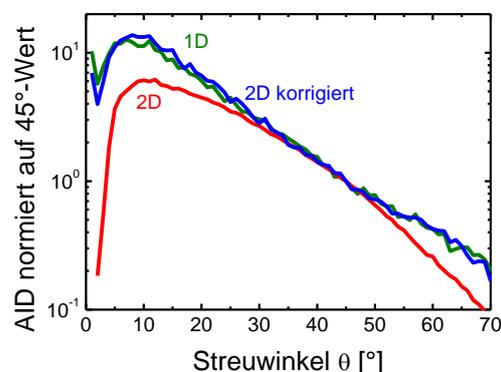


Abbildung 13: Korrigierte 2D-Messung (blau) im Vergleich mit 1D-Messung (grün) und original 2D-Messung (rot).

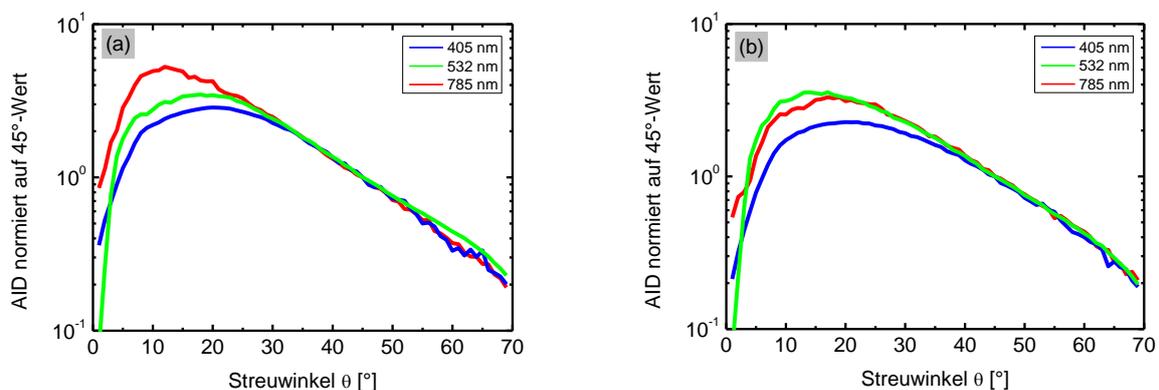
Auswirkung einer verkleinerten Probe im 2D-Prototyp

Da sich Licht in der Probe ausbreiten kann und dann an einer anderen Stelle auskoppelt, ist ein Unterschied der Messergebnisse unterschiedlich großer Proben oder Messungen nahe des Randes der Probe anzunehmen. Durch experimentelle Befunde konnte nachgewiesen werden, dass die im 2D-Messplatz erfasste Großwinkelstreuung bei kleinen Proben oder geringen Abständen zum Rand der Probe unterschätzt wird..

Wellenlängen-abhängige Streulichtmessungen

Neben der Messung mit einem grünen Laser bei einer Wellenlänge von 532 nm wurden von Jülich im Rahmen des Projektes zwei weitere Laser mit einer Wellenlänge von 405 nm und 785 nm beschafft. Mit Hilfe anderer Wellenlängen sollten unterschiedliche Strukturgrößen besser aufgelöst werden. In den Abbildung 14 (a) bis (d) sind die Ergebnisse der Messung mit den drei verfügbaren Wellenlängen an insgesamt vier unterschiedlichen Proben aus dem Round Robin Versuch dargestellt. Die Proben in (a) bis (c) sind durch Krater auf der Probenoberfläche gekennzeichnet. Die Kratergrößen nehmen von (a) über (b) nach (c) ab. Die Probe in (c) hat zusätzlich noch kleine Kraterstrukturen, die den großen überlagert sind. Probe (d) ist durch kleine Pyramiden auf der TCO-Oberfläche gekennzeichnet. Alle Messdaten sind normiert auf den Intensitätswert bei 45°. Es lässt sich deutlich erkennen, dass die verschiedenen Wellenlängen abhängig von den Strukturgrößen auf der Oberfläche zu unterschiedlichen Intensitätsverläufen führen. Je größer die Struktur desto besser ist die Lichtstreuung für langwelliges Licht (rot – siehe Probe (a)). Werden die Strukturen kleiner (Probe (b)) wird das grüne Licht besser gestreut. Bei mittleren Strukturen (c) zeigt sich eine Steigerung der Streuung für das blaue Licht. Die gezeigten Tendenzen, sind aufgrund der Normierung zunächst nur qualitativ beschreibbar, zeigen aber deutlich die Bedeutung der verwendeten Wellenlänge für die erfassbaren Strukturgrößen.

Zusätzlich konnten im Rahmen dieses Versuchs für Jülich noch wertvolle Erfahrungen bezüglich einiger Laserspezifikationen gesammelt werden. In Abbildung 14 (d) sieht man im Falle einer schwach streuenden Probe zusätzliche Probleme der Messkonfiguration, die durch den verwendeten Laser hervorgerufen werden. Die Maxima die im Winkelbereich bis 10° auftreten entstehen durch einen nicht perfekt runden Laserspot und einen zu divergenten Laserstrahl. Beide Effekte führen zu einer ungleichmäßigen Beleuchtung der Probe und einem Überstrahlen des ausgeblendeten Bereichs auf der Streulichtscheibe. Hier wird besonders die Bedeutung eines möglichst wenig divergenten Laserstrahls mit gaußförmiger Strahlcharakteristik und einem runden Strahlprofil für eine gute Messung deutlich.



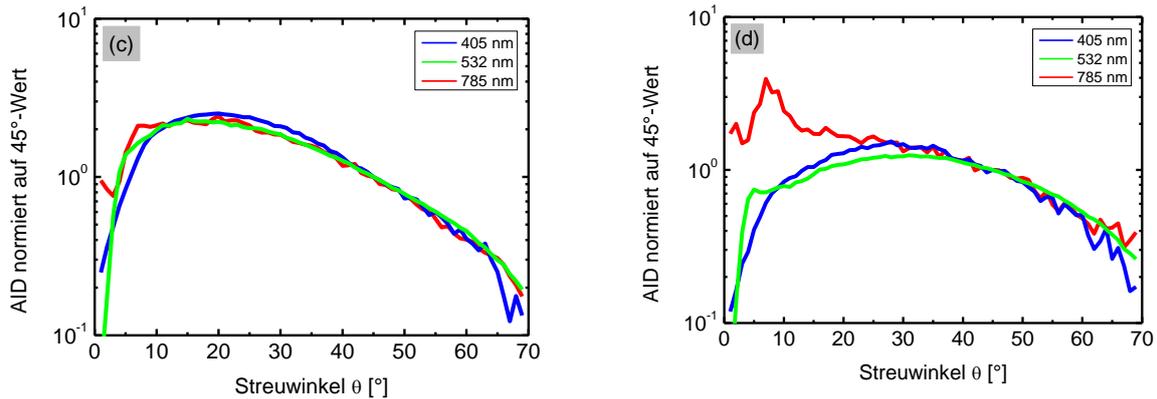


Abbildung 14: AID mit 532 nm, 405 nm und 785 nm an der gleichen Position auf der jeweiligen Probe gemessen für (a) ZnO mit sehr großen Kratern auf dickem Glas - Round Robin Probe 4 (b) ZnO mit großen Kratern auf dünnem Glas - Round Robin Probe 3 (c) ZnO mit mittleren Krater und zusätzlichen kleinen Kratern in Superposition auf dickem Glas (d) Probe mit kleinen Pyramiden auf dickem Glas - Round Robin Probe 2.

Im Rahmen der Arbeiten an der erweiterten, softwarebasierten Auswertung der Messdaten wurden Unstimmigkeiten festgestellt, welche die absoluten Aussagen der bisherigen Arbeitspakete in Frage stellen. Allerdings behalten die grundsätzlichen Aussagen zu möglichen Messfehlern und deren Gewichtung unter verschiedenen Messbedingungen sowie die vergleichende Qualitätsbewertung und Prozessregelung weiterhin ihre Gültigkeit und Anwendbarkeit.

3.1.2 AP 1.2 Herstellung von TCO

Im Verlauf des gesamten Projektes wurde eine Vielzahl an unterschiedlichen ZnO Schichten durch Sputtern in Jülich hergestellt und mit nasschemischen Ätzverfahren texturiert, um Korrelationen zum Herstellungsprozess als auch zu Solarzeleigenschaften feststellen zu können. Im Rahmen der 2D-Prototypevaluierung wurden den Projektpartnern zu Beginn des Projektes standardisierte texturierte ZnO-Schichten aus Jülich sowie SnO₂-Schichten von einem kommerziellen Anbieter für Testmessungen bereitgestellt. Die dazugehörigen Messdaten aus dem 1D-Labormessplatz in Jülich wurden als Referenz ebenfalls übermittelt.

Nach dem Aufbau des Prototyps durch Laytec und das IPM wurden zwei spezielle Testreihen für die Evaluierung des Prototypen generiert, dabei handelte es sich zum einen um eine einfache kraterbasierte Oberflächentextur mit starken Größen- und Höhenvariationen. Die zweite Probenserie hingegen bestand aus Proben mit einer Doppeltextur (Primärtextur aus großen Kratern, Sekundärtextur aus unterschiedlichen großen kleineren Kraterstrukturen). Die Variationen der zweiten Testserie sind ungleich schwerer zu detektieren, aber dennoch relevant für die Effizienz der Solarzellen und sollten einem Sensitivitätstest des neuen Messplatzes dienen. Auch hier wurden neben den Proben auch wieder die Vergleichsdaten durch Jülich bereitgestellt.

Nach der Verlegung des 2D-Prototyp zur Evaluierung nach Jülich wurden weitere drei Testserien angefertigt. Die erste Testserie bestand aus einer Depositionstemperaturserie, um die Möglichkeit zu bewerten, die Regelfunktion für den Depositionsprozess, die bisher mit Hilfe des 1D-Laborsystems nachgewiesen wurde, ebenfalls mit dem 2D-Prototypen aufnehmen zu können (siehe Details in AP3.6).

Für die zweite Probenserie wurde eine Anzahl nominell gleich prozessierter Proben die mit Hilfe des 2D-Prototypen auf ihre offline Oberflächentextur-Qualität hin untersucht (siehe Details in AP3.5). Die Proben der zweiten Probenserie wurden sowohl mit einer einfachen Oberflächentextur vermessen als auch mit einer Doppelttextur. Die dritte Testserie wurde speziell mit dem Ziel gefertigt, in einem Round Robin Experiment eingesetzt zu werden, um die Abweichungen zwischen 1D-Labormessplatz und 2D-Prototyp genauer zu ergründen und die Messdaten des 1D-Labormessplatzes in Jülich zu verifizieren.

3.1.3 AP 1.3 Einbau in Solarzellen

In Jülich wurden auf verschiedenen TCO-Substraten Solarzellen prozessiert und anschließend detailliert charakterisiert. Dabei reicht die Bandbreite von einfachen Solarzellen mit nur einem Absorber aus amorphem (a-Si:H) oder mikrokristallinem ($\mu\text{c-Si:H}$) Silizium bis hin zu Tandemsolarzellen, welche eine effizientere Kombination aus beiden Absorbern darstellen. Die Bandbreite der hergestellten und in Solarzellen eingebauten ZnO-Schichten erstreckt sich von einfach-texturierten bis hin zu doppelt-texturierten Frontkontakten. Insbesondere die Arbeit mit doppelt-texturierten Zinkoxiden wurde fokussiert, da erste Ergebnisse die deutliche Überlegenheit der Doppelttextur im Vergleich zu kommerziellen Zinnoxiden (Asahi VU) zeigen. Der Gesamtstrom der Solarzelle liegt erheblich höher als der auf den Referenzsubstraten. Zur Charakterisierung der Solarzellen wurden IV-Kennlinien und Quantenwirkungsgrade gemessen.

3.1.4 AP 1.4 Korrelationen zu Solarzellen

Im Folgenden werden Ergebnisse anhand von Streulichtmessungen in Transmission dargestellt. Ähnliche Korrelationen wurden auch für Messungen in Reflexion beobachtet.

Single-junction Solarzellen

Ein wesentliches Merkmal von Lichtstreuung für Solarzellen mit nur einem Absorber ist die Großwinkelstreuung ($> 45^\circ$). Dieser Zusammenhang ist schon länger bekannt und wurde inzwischen mehrfach bestätigt. **Abbildung 15** zeigt den Zusammenhang zwischen Kurzschlussstromdichte J_{SC} einer $\mu\text{c-Si}$ -Solarzelle und der Großwinkelstreuung beim diskreten Winkel 60° der verwendeten ZnO-Frontkontakte. Die ZnO-Schichten wurden durch verschiedene Sputter- und Ätzprozesse hergestellt, um eine Möglichst große Vielfalt verschiedener Oberflächen zu erzeugen. Es ist deutlich zu erkennen, dass für alle eingesetzten Frontkontaktschichten die Kurzschlussstromdichte mit steigender gestreuter Intensität bei 60° ebenfalls ansteigt. Ähnliche Korrelationen konnten auch für einfache a-Si:H-Solarzellen gefunden werden.

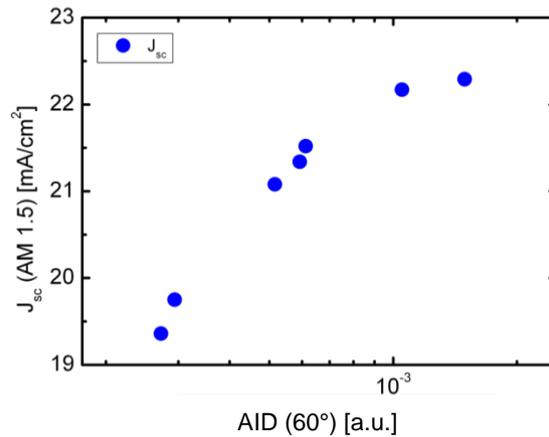


Abbildung 15: Kurzschlussstromdichte $J_{sc}(AM\ 1.5)$ einer μc -Si Testserie als Funktion der auf dem ZnO:Al gemessenen AID bei 60° ($AID(60^\circ)$).

Strom aus Solarzellen mit mehreren Absorbern (Tandemzellen)

Da Solarzellen mit nur einer Absorberschicht nicht so effizient wie Solarzellen mit einem Stapel aus Absorberschichten mit unterschiedlicher Bandlücke sind, wurden im Rahmen des Projektes auch verschiedenartige ZnO-Oberflächentexturen in a-Si:H/ μc -Si:H-Tandemsolarzellen getestet. Die einfache Korrelation zwischen der Großwinkelstreuung und dem Gesamtkurzschlussstromdichte der Solarzellen, die für die Einfachzellen angewandt wurde, konnte hier jedoch nicht gefunden werden. Hingegen erwies sich des Verhältnis $AID(15^\circ)/AID(60^\circ)$ als interessantes Merkmal.

Abbildung 16 zeigt exemplarisch die Abhängigkeit der Kurzschlussstromdichten J_{sc} der Komponentenzellen (Bottomzelle und Topzelle) zweier a-Si/ μc -Si-Tandemsolarzellen-Serien A und B (ohne Zwischenreflektor) auf geätztem ZnO als Funktion des Parameters $AID(15^\circ)/AID(60^\circ)$ gemessen an der geätzten ZnO-Schicht. Für kleine Werte dieses $AID(15^\circ)/AID(60^\circ)$ Parameters erhöht sich J_{sc} für beide Komponentenzellen aufgrund von besserer Einkopplung des Lichtes (s. schraffierter Bereich der Kurve). In der μc -Si-Bottomzelle entsteht zusätzlich durch die Lichtstreuung ein besserer Lichteinfang, so dass ein ausgeprägtes Maximum für mittlere Werte von $AID(15^\circ)/AID(60^\circ)$ entsteht. Für große und kleine Werte ist kein oder ein nur schwach ausgeprägter Lichteinfang zu erwarten. Für die Topzelle ist der Verlauf abgesehen von der Einkopplung flach.

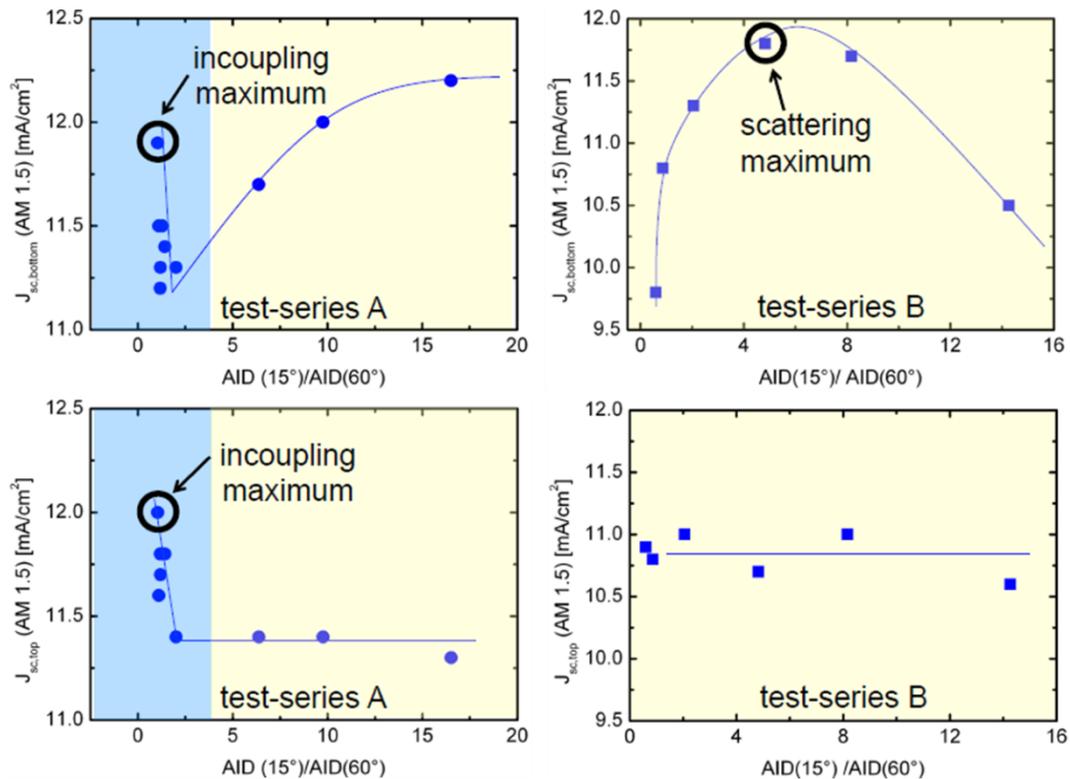


Abbildung 16: Abhängigkeit der Kurzschlussstromdichten der Komponentenzellen einer a-Si/ μ c-Si-Tandemsolarzelle als Funktion des Verhältnisses $\text{AID}(15^\circ)/\text{AID}(60^\circ)$. Serie A und B überstreichen unterschiedliche Bereiche der Oberflächentexturen und haben wurden mit unterschiedlichen Bottomzellendicken hergestellt, so dass sich andere Werte von J_{sc} für die Komponentenzellen einstellen.

Korrelation zwischen dem $\text{AID}(15^\circ)/\text{AID}(60^\circ)$ -Verhältnis und Oberflächentextur Parametern

Da sich in Jülich gezeigt hatte, dass sich das Verhältnis aus $\text{AID}(15^\circ)/\text{AID}(60^\circ)$, das aus der winkelaufgelösten Streulichtmessung gewonnen werden kann, eignet um die Oberflächenqualität einer TCO Schicht für eine Tandemsolarzelle zu beschreiben, wurde dieser Parameter weitergehend untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass das verwendete Verhältnis gut mit der mittleren, lateralen Strukturgröße auf der TCO Oberfläche, wie in **Abbildung 17** zu sehen ist, korreliert. Zieht man das Gittermodell zur Interpretation der Streulichtinformation heran, leuchtet die Korrelation ein. Gitter mit großen Gitterkonstanten (entsprechen großen Strukturen) streuen das Licht in kleine Winkel, wohingegen kleine Gitterkonstanten (entsprechen kleinen Strukturen) das Licht in große Winkel streuen. Dementsprechend ist das Verhältnis aus einem repräsentativen Kleinwinkel (hier 15°) und einem repräsentativen Großwinkel (hier 60°) nicht anderes als das Verhältnis von großen zu kleinen Strukturen, welches bei einer stochastischen Verteilung automatisch mit der mittleren Strukturgröße korreliert.

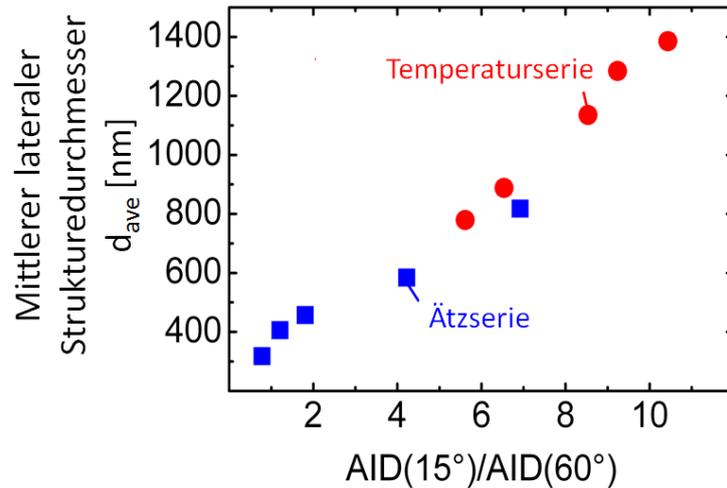


Abbildung 17: Mittlerer lateraler Strukturdurchmesser als Funktion des Verhältnisses AID(15°)/AID(60°) – Verhältnisses der Kurve.

3.1.5 AP 2.1 Konzept und Lastenheft

Aufgrund der bis dahin beobachteten Korrelationen wurden von Jülich die Kriterien in **Tabelle 2** für das Messsystem festgelegt. Weitere Kriterien wie die Messzeiten oder Datenverarbeitung wurden durch die anderen Partner bestimmt.

Tabelle 2: Lastenheft des Messsystems.

Kategorie	Spezifikation
Intensitäten für Haze	Dynamik 7 Größenordnungen
Verlauf der Kurve ohne spekularen Anteil	Dynamik 5 Größenordnungen
Zentralpeak bis etwa 2° erkennen	Auflösung 2°
Level und Position des Minimums bei 3-5 °	Auflösung 1°
Position und Höhe des Peaks bei 10-20 °	Auflösung 2°
Groben Intensitätsverlauf > 20°	Auflösung 5°
Anisotropieerkennung	2D-Erkennung

3.1.6 AP 3.5 Offline Kontrolle

Da es aufgrund der Marktlage nicht möglich war, einen geeigneten Industriepartner für die Linienintegration des Messsystems zu gewinnen, wurde in Jülich versucht, den 2D-Prototypen so gut wie möglich in die bestehende Herstellung von ZnO:Al-Frontkontakten einzubinden, um eine „Quasi-Linienintegration“ zu erreichen.

In Jülich wird ein doppelt-texturierter ZnO:Al-Frontkontakt für die Anwendung in a-Si:H/ μ c-Si:H-Tandemsolarzellen in Kleinserie hergestellt. Mit Hilfe der Offline-Kontrolle sollte die Qualität des Frontkontaktes im Herstellungsprozess sichergestellt werden. Die vollständige Herstellungskette inklusive der Qualitätskontrolle ist in Abbildung 18 dargestellt. Das ZnO:Al wird zunächst in einem Sputter-Depositionsprozess auf einer Glasscheibe abgeschieden und im Anschluss daran in einem nasschemischen Ätzprozess in einer 0,5 % Salzsäureverdünnung (kurz: HCl) auf der Oberfläche aufgeraut. Hierbei entsteht die erste Texturebene, die auch Primärtextur genannt wird. Die raue Oberfläche wird im Anschluss einer Messung mit dem 2D-Prototypen unterzogen. Diese Messung wird zum einen dazu eingesetzt, die Oberflächenqualität zu beurteilen und möglichen Ausschuss zu detektieren, zum anderen wird das Messsignal dazu verwendet bei Bedarf die Depositionstemperatur der Sputteranlage nach zu regeln. Details zur Rückführung und Regelung können AP3.6 entnommen werden. Durch experimentelle Studien wurde ermittelt, für welchen Parameterbereich das AID-Verhältnis

$$AID_{\text{ver}} = AID(15^\circ)/AID(60^\circ)$$

eine geeignete Primärtextur aufweist. Nur jene Proben, die im Intervall $[AID_{\text{ver,min}}; AID_{\text{ver,max}}]$ liegen werden weiter prozessiert. Die übrigen Proben bilden den „Ausschuss 1“.

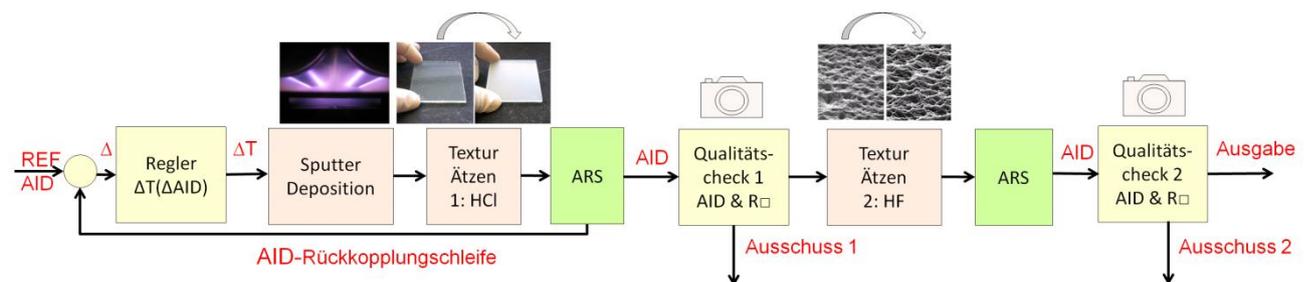


Abbildung 18: ARS-Kontrollierter Herstellungsprozess eines doppelt-texturierten Substrates in Jülich.

Im Zuge der weiteren Verarbeitung werden die Proben einem zweiten Ätzschritt unterzogen. Bei diesem Schritt wird eine 1 % Verdünnung aus Fluorwasserstoffsäure (kurz: HF) verwendet. Dabei entsteht die zweite Oberflächentextur, die der ersten Ebene überlagert ist (Sekundärtextur). Die Oberflächentexturen der Sekundärtextur sind um ein Vielfaches kleiner als jene der Primärtextur. Sie liegen in der Größenordnung unterhalb der Messwellenlängen von 532 nm in ihrer lateralen Ausdehnung und begünstigen einen Antireflex-Effekt auf der Oberfläche. Dieser Effekt zeigt sich durch eine allgemein erhöhte Transmission durch die Probe und damit eine Steigerung der gemessenen, gestreuten Intensität für alle Winkel. In **Abbildung 19a** ist die Messung einer reinen Primärtextur („HCl“ - blaue Kurve) und der Doppeltextur („HCl+HF“ – rote Kurve) der gleichen Probe im Herstellungsverlauf mit Hilfe des 2D-Prototypen dargestellt. Es ist deutlich eine Zunahme der gestreuten Intensität sichtbar. In **Abbildung 19b** ist die gleiche Darstellung für den 1D-Labormessplatz gewählt. Auch hier ist die Anhebung der Kurve im gleichen Winkelbereich sichtbar. Der vorher definierte Parameterbereich für das AID_{ver} der Primärtextur ändert sich daher für die zweite Qualitätskontrolle relevant. Im zweiten Qualitätskontroll-Schritt wird festgestellt, ob die gesamte gestreute Intensität zugenommen hat, ohne dass sich das AID_{ver} aus dem in Schritt 1 definierten Parameterintervall geschoben hat. Ändert sich das AID_{ver} so spricht dies für eine unerwünschte Zersetzung der Primärtextur im zweiten Ätzschritt. Nur Proben, die die zweite Qualitätskontrolle bestanden haben, werden freigegeben („Ausgabe“). Alle anderen Proben werden als

„Ausschuss 2“ aus dem Prozess entfernt. Beide optischen Qualitätskontrollschritte werden in Jülich vom 2D-Messplatz durchgeführt.

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass in beiden Qualitätssicherungsschritten neben der Oberflächentopographie, die über die winkelaufgelöste Streulichtmessung erfasst wird, zusätzlich die elektrischen Eigenschaften der Proben in Form des Schichtwiderstandes erfasst werden. Nur wenn sowohl die Oberflächentopographie als auch die elektrischen Eigenschaften im Toleranzbereich liegen, werden die Proben für die Weiterprozessierung in Solarzellen freigegeben.

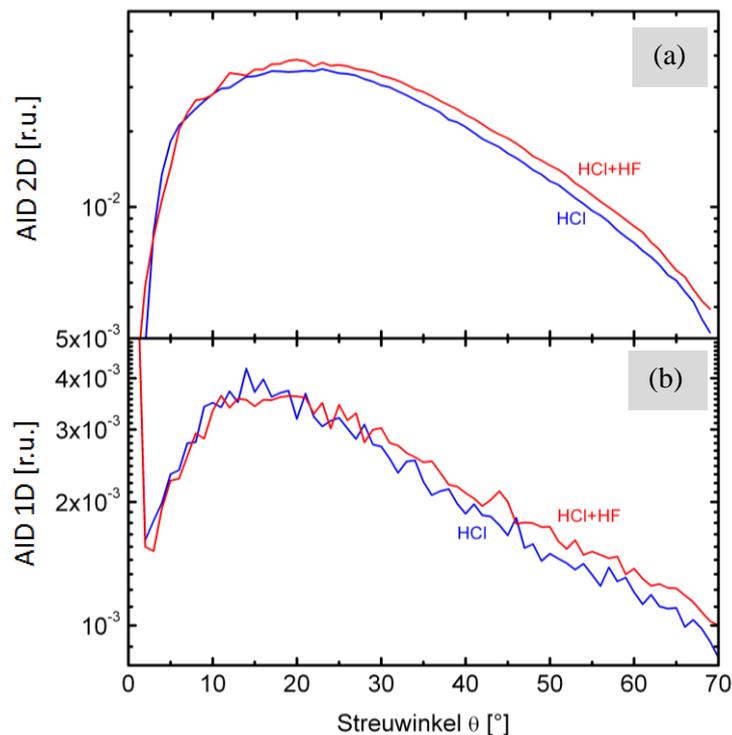


Abbildung 19: Doppeltexturerkennung mit dem 2D-Protoyp (a) und dem 1D-Laborsystem (b). Die Messung aus dem Qualitätskontrolle 1 mit reiner Primärtextur ist in blau dargestellt, die dazugehörige Probe mit Doppeltextur aus dem Qualitätskontrollschritt 2 ist in rot dargestellt.

3.1.7 AP 3.6 Korrelationsfunktion

Die Texturinformationen, die aus der Streulichtmessung gewonnen werden können, sollten dazu eingesetzt werden, die Herstellungsprozesse, die für die Oberflächentextur relevant sind, mittels einer Rückführung zu regeln. Im Falle von gesputtertem und Textur-geätztem Zinkoxid kann die Oberflächentextur dabei über zwei Prozesse maßgeblich beeinflusst werden: den Depositionsprozess und den Ätzprozess. In **Abbildung 20** ist der Herstellungsprozess einer Solarzelle schematisch dargestellt. Die Charakterisierung mittels winkelaufgelöster Streulichtmessung, die zur Texturregelung eingesetzt werden soll, wird nach dem Texturätzschritt und vor der Siliziumdeposition durchgeführt.

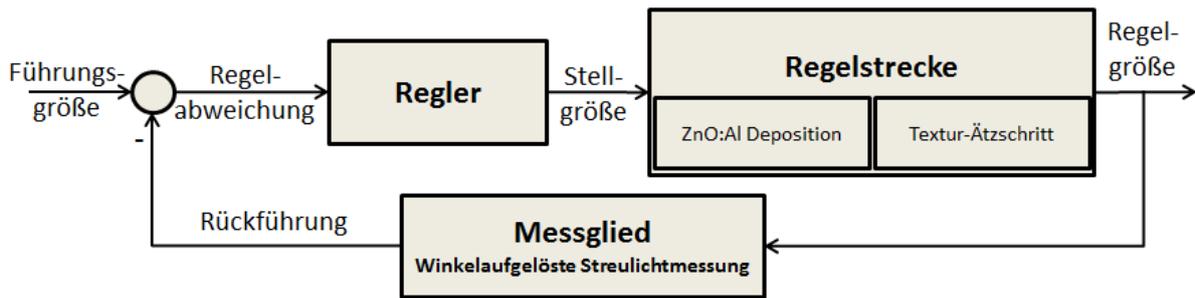


Abbildung 20: Darstellung des Produktionsprozesses mit Rückführung. Sputterdeposition einer Zinkoxid-Schicht, Texturätzung, Prozesskontrolle und anschließende Siliziumdeposition. Bild entnommen aus [14].

Regelung des Depositionsprozesses

Um den Depositionsprozess regeln zu können, bedarf es zunächst einer definierten Solarzellen-relevanten Größe der Textur, die mit einem der Depositionsparameter korreliert werden kann. Einer der Depositionsparameter, der die Oberflächentextur am stärksten beeinflussen kann, ist die Temperatur. Mit Hilfe einer einfachen Temperaturvariation lassen sich gemäß dem modifizierten Thornton-Modell [15] drei unterschiedlichen Oberflächentypen herstellen. Aufgrund dieses großen Einflusses im Depositionsprozess wurde die Heizertemperatur als zu regelnder Depositionsparameter ausgewählt.

Gemäß des modifizierten Thornton Modells ändert sich die mittlere laterale Strukturgröße mit steigender Depositionstemperatur. In Abbildung 21 ist der mittlere Strukturdurchmesser d_{mittel} , der durch AFM-Messungen auf der texturierten Probenoberfläche ermittelt wurde, als Funktion der Heizertemperatur T_H einer Testserie aufgetragen. Es lässt sich deutlich ein Anstieg des mittleren Strukturdurchmessers mit steigender Heizertemperatur erkennen. Gleichzeitig konnte die mittlere, laterale Strukturgröße mit dem Verhältnis von $\text{AID}(15^\circ)/\text{AID}(60^\circ)$ linear korreliert werden. Dieses Verhältnis wurde bereits bei der Betrachtung der Stromdichten von Tandem-Solarzellen verwendet. In Abbildung 22 ist das $\text{AID}(15^\circ)/\text{AID}(60^\circ)$ als Funktion der Heizertemperatur aufgetragen. Es zeigt sich ein quasi linearer Bereich, der zu beiden Endwerten in eine Art Sättigung übergeht.

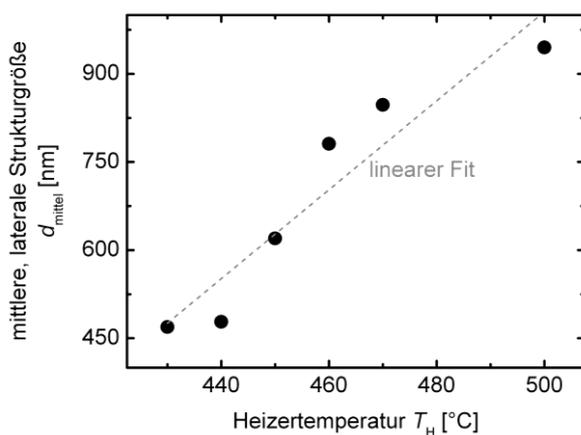


Abbildung 21: Mittlerer Strukturdurchmesser als Funktion der Heizertemperatur. Der lineare Fit ist mit einer grauen, gestrichelten Linie in der Abbildung dargestellt. Bild entnommen aus [14].

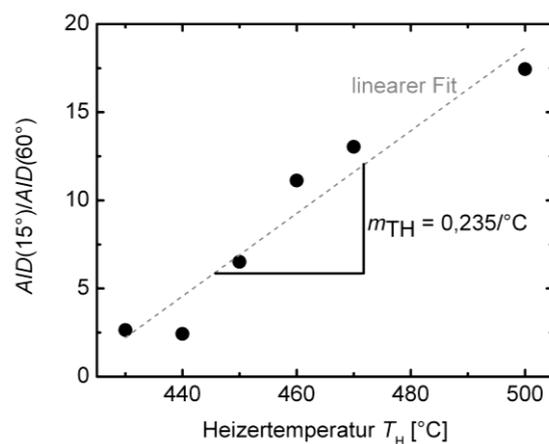


Abbildung 22: $\text{AID}(15^\circ)/\text{AID}(60^\circ)$ -Verhältnis als Funktion der Heizertemperatur. Die Datenpunkte wurden mit einem linearen Fit angenähert (graue, gestrichelte Linie). Die Steigung m_{TH} des Fits ist im Graph angegeben. Bild entnommen aus [14].

Die Steigung m_{TH} des linearen Fits und der abgedeckte Temperaturbereich des linearen Zusammenhangs in Abbildung 22 ist von vielen Faktoren abhängig, unter anderem vom verwendeten Substratglas, der Dotierstoffkonzentration des Targets und der Geometrie der Depositionskammer.

Regelung eines Depositionssystems auf ein Referenzsubstrat

Da kein Industriepartner für den Inline-Test gefunden werden konnte, wurde die Regelung von Jülich an einer kleinflächigen Depositionsanlage im Laborbetrieb getestet. Ziel der Regelung war das Einfahren eines Referenzsubstrat. An diesem Referenzsubstrat wurde die winkelaufgelöste Streuung gemessen und für das AID(15°)/AID(60°)-Verhältnis ein Wert von 7,1 ermittelt. Nach jeder Deposition mit dem kleinflächigen Depositionssystem wurde die aktuelle ZnO:Al-Schicht geätzt, das neue Verhältnis bestimmt und nach Vergleich mit dem Referenzwert 7,1 eine schrittweise Temperaturkorrektur nach oben oder unten für die Folgedeposition durchgeführt.

In Abbildung 23 ist das AID(15°)/AID(60°)-Verhältnis der vermessenen Proben während der Iteration als Funktion der jeweils anliegenden Heizertemperatur dargestellt. Die erste Deposition (in der Abbildung als „Start“ markiert) wurde bei einer Heizertemperatur von 290°C durchgeführt. Der Referenzwert ist als schwarze, gepunktete Linie eingetragen. Die grauen Pfeile zeigen jeweils die Temperaturkorrektur an. Der Messpunkt der angepassten Probe ist mit einem grauen Kreis umrandet.

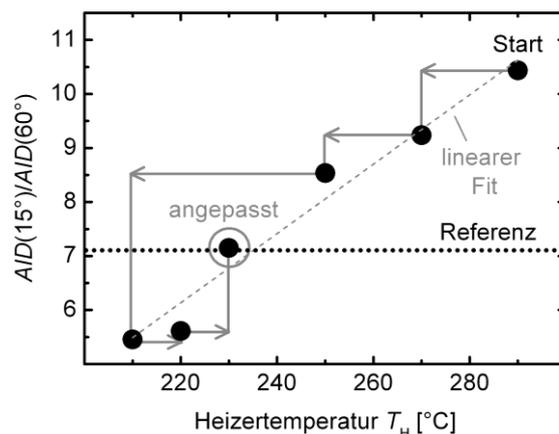


Abbildung 23: Iterative Näherung an Referenztextur in neuem Depositionssystem. Die Referenz ist als schwarze, gepunktete Linie im Graphen eingetragen, Start der Iteration und die angepasste Probe sind markiert.

Mit Hilfe des Zusammenhangs zwischen dem textursensitiven Verhältnis AID(15°)/AID(60°) zur Heizertemperatur kann das Iterationsvorzeichen bestimmt werden. Bild entnommen aus [14].

Um zu zeigen, dass das AID(15°)/AID(60°)-Verhältnis für die gegebenen ZnO:Al-Schichten geeignet ist, eine Referenzoberfläche zu beschreiben, sind in Abbildung 24 die vollständigen AID-Kurven im Bereich von 0° bis 90° der Startprobe (schwarze Linie), der Referenzprobe (schwarze, gepunktete Linie) und der angepassten Probe durch Regelung (graue Linie) dargestellt. Obschon die Regelung des Systems auf das Referenzsubstrat nur mit Hilfe des AID(15°)/AID(60°)-Verhältnisses erfolgt, bildet die AID der nachgeregelten Kurve jene der Referenzkurve für alle Winkelbereiche nahezu exakt nach. Somit kann von einer gleichen Oberflächentextur ausgegangen werden. Sowol an der AID-Kurve des Startsubstrates als auch an der des eingeregelt Substrates sind jeweils die Kurzschlussstromdichten von $\mu\text{-Si:H}$ -Solarzellen aufgetragen. Diese haben das jeweilige texturierte Zinkoxid als Frontkontakt-

schicht und besitzen eine ca. 1,26 μm dicke Absorberschicht. Als Rückkontakt wurde ein gesputterter und mit Laser strukturierter ZnO:Al/Ag-Rückreflektor eingesetzt.

Die Kurzschlussstromdichten zeigen eine deutliche Verbesserung um 2,3 mA/cm^2 des nachgeregelten Substrates gegenüber dem Startsubstrat. Somit lässt sich trotz zunächst geringfügig erscheinender Unterschiede im Verlauf der AID zwischen dem Startsubstrat und dem Referenzsubstrat bereits ein deutlicher Effekt der unterschiedlichen Oberflächentexturen auf die Solarzelleneigenschaften feststellen.

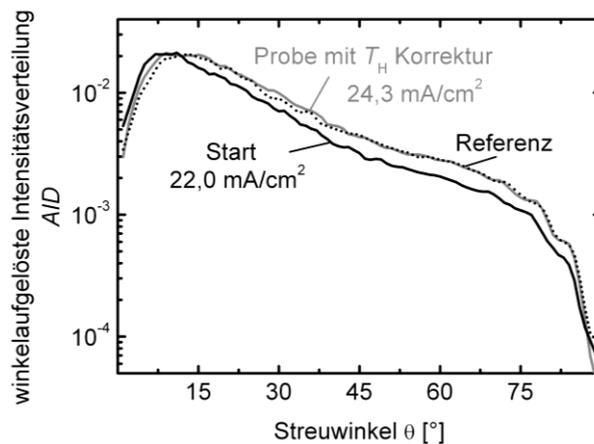


Abbildung 24: Start-, Referenz- und Zielprobe nach AID-Regelung.

Die komplette winkelaufgelöste Intensitätsverteilung in Transmission ist dargestellt. Die Kurzschlussstromdichten einfacher $\mu\text{-Si:H}$ -Solarzellen für die Start- und angepasste Textur sind angegeben. Bild entnommen aus [14].

Regelung des Ätzprozesses

Beim Ätzprozess bietet vor allem die Kombination aus verschiedenen Ätzlösungen die Möglichkeit die Oberflächentextur zu variieren. Von Jülich wurde ein zweistufiger Ätzprozess und die Regelbarkeit der Textur mittels des bereits bekannten AID-Verhältnisses betrachtet. Alle Proben wurden zunächst für die gleiche Dauer in 1 % HF geätzt und im Anschluss für unterschiedlich lange Ätzdauern in 0,5 % HCl. Ziel der Ätzserie war das sukzessive Aufweiten der kleinen HF-Krater.

Da die Aufweitung der Krater mit einer Erhöhung der lateralen Strukturgröße einhergeht, ist ersichtlich, dass eine steigende Ätzdauer in HCl zu einem steigenden $\text{AID}(15^\circ)/\text{AID}(60^\circ)$ -Verhältnis führen muss. In Abbildung 25 ist das $\text{AID}(15^\circ)/\text{AID}(60^\circ)$ -Verhältnis der Ätzserie als Funktion der Ätzzeit in HCl dargestellt. Es ist ein linearer Anstieg erkennbar. Basierend auf diesem Zusammenhang lässt sich auch der Ätzprozess analog zum Depositionsprozess regeln.

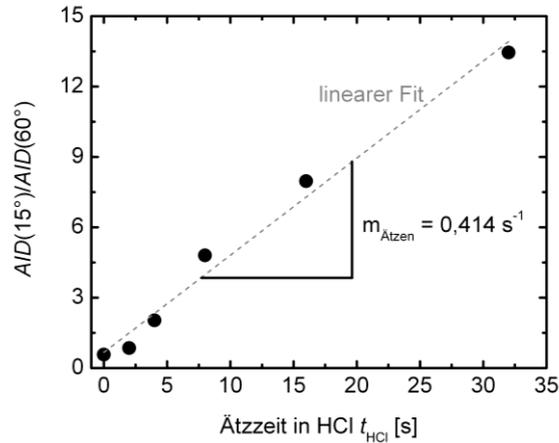


Abbildung 25: Korrelation des AID-Verhältnisses mit der Ätzzeit einer Doppelätzserie. Das Verhältnis von AID(15°)/AID(60°) ist in Transmission gemessen. Die Datenpunkte wurden mit einem linearen Fit (graue, gestrichelte Linie) angenähert. Die Steigung $m_{\text{Ätzen}}$ des Fits ist im Graph angegeben. Bild entnommen aus [14].

Stromoptimierung für Single-junction-Solarzellen

In Jülich wurde neben der Prozessregelung auch die Option untersucht, die Oberflächentextur mit Hilfe der winkelaufgelösten Streulichtmessung zu optimieren. Dies ist besonders für Einfachzellen gut machbar, da hier - wie zuvor erwähnt - die Großwinkelstreuung mit dem Kurzschlussstrom der Zelle korreliert. Um eine Textur herzustellen, deren Eigenschaften einen hohen Strom in einer Einfachsolarzelle hervorrufen, muss demnach die Textur auf einen möglichst hohen AID(60°)-Wert optimiert werden.

In Abbildung 26 sind die AID(60°)-Werte in Abhängigkeit von der Heizertemperatur T_{H} während der Deposition aufgetragen. Es wurden Messungen an mehreren Stellen (Mitte, Ecke) auf dem Substrat durchgeführt. Für beide Messstellen ist jeweils ein deutliches Maximum im AID(60°)-Wert zu erkennen. Bei diesem Maximum ist die höchst mögliche Stromdichte in Abhängigkeit von der Heizertemperatur während der ZnO:Al-Deposition in einer späteren Einfachsolarzelle zu erwarten. In Abbildung 26 sind neben den Messpunkten, die sich um das Maximum des AID(60°)-Wertes befinden, die dazugehörigen Kurzschlussstromdichte (in mA/cm²) einer 1 cm² großen $\mu\text{c-Si:H}$ -Einfachsolarzelle, die auf dem vorliegenden Frontkontakt erstellt wurde, angegeben. Es ist deutlich zu sehen, dass die maximalen AID(60°)-Werte zu einem maximalen Kurzschlussstrom führen. Mit Hilfe des Maximums des AID(60°)-Wertes als Funktion der Heizertemperatur, ist es demnach möglich eine Stromoptimierung der Textur durchführbar.

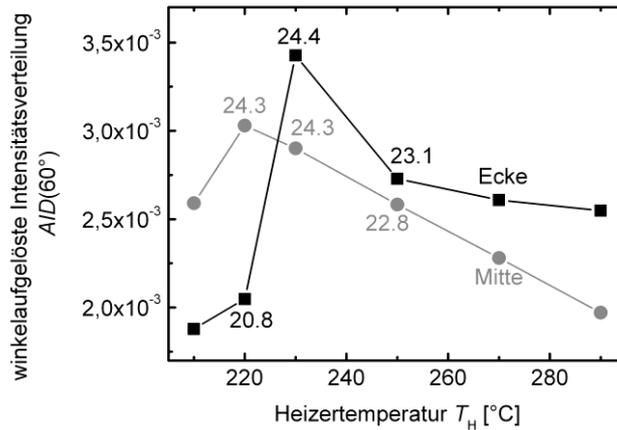


Abbildung 26: AID(60°)-Werte als Funktion der Heizertemperatur in der Deposition. Graue Punkte markieren Messpunkte, die in der Mitte der Probe erfasst wurden, schwarze Rechtecke markieren Messpunkte, die in der Probenecke (ca. 1 cm vom Rand entfernt) aufgenommen wurden. Die Zahlenwerte neben den ausgewählten Messpunkten zeigen die erzielte Kurzschlussstromdichte [mA/cm²] einer einfachen μ c-Si:H-Solarzelle, in der das Substrat als Frontkontakt verwendet wurde. Bild entnommen aus [14].

Die ersten Studien wurden von Jülich mit Hilfe des 1D-Labormessplatzes durchgeführt. Hier konnte ein linearer funktionaler Zusammenhang zwischen dem AID-Verhältnis und der Heizertemperatur im Depositionsprozess gezeigt werden. Aufgrund von Unterschieden zwischen den Messungen mit dem 2D-Prototyp und dem 1D-Laborsystem, musste geklärt werden, ob die lineare Korrelation auch für den Prototypen wiedererlangt werden kann.

In Abbildung 27 ist das AID-Verhältnis als Funktion der Heizertemperatur einer Sputterdepositions-Anlage in Jülich aufgenommen worden. Die unterschiedlichen Farben im Graphen markieren unterschiedliche Positionen auf der beschichteten Fläche. Für alle Positionen sind deutlich zwei Sättigungsbereiche erkennbar. Der erste Sättigungsbereich bildet sich bei kleinen Depositionstemperaturen aus. Dazwischen im Bereich von 400°C bis 480°C liegt der linear verknüpfte Bereich, der zur Regelung des Prozesses eingesetzt wird. Dieser Regelbereich stellt sich als linearer funktionaler Zusammenhang dar analog zu den Messungen mit dem 1D-Labormessplatz. Allerdings ist hier festzustellen, dass die exakten Geradengleichungen beim Anfüten der Messwerte für die beiden Messsysteme aufgrund der unterschiedlichen Messkurven ebenfalls unterschiedlich ausfallen.

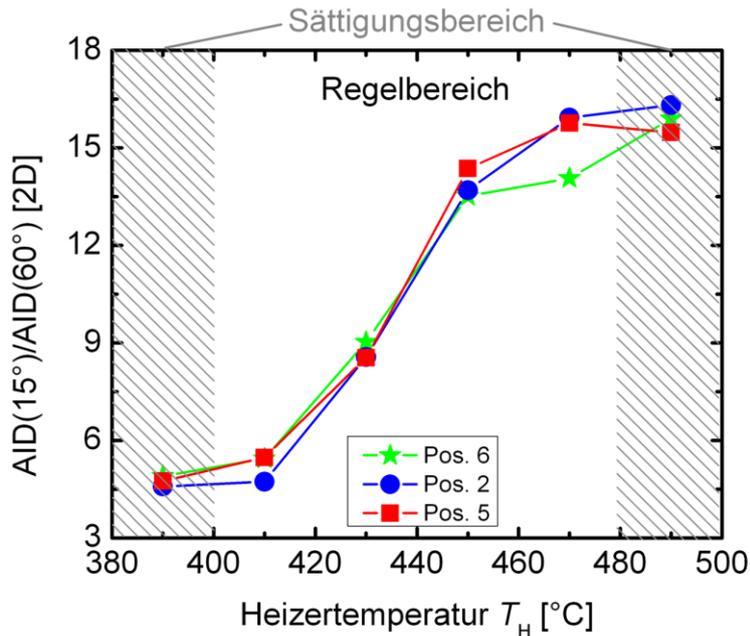


Abbildung 27: Regelkurve mit Hilfe des 2D-Prototypen aufgenommen.

Da der lineare funktionale Zusammenhang auch für den 2D-Prototypen nachgewiesen werden konnte, sich jedoch andere Werte für die lineare Abhängigkeit eingestellt haben, wurde von Jülich der Unterschied im AID-Verhältnis zwischen beiden Messplätzen untersucht, um die bisher ermittelten Grenzwerte aus dem 1D-Laborsystem auf den 2D-Prototyp übertragen zu können.

Korrelation zwischen 1D-AID-Verhältnis und 2D-AID-Verhältnis

Um einen Eindruck des Unterschieds zwischen dem 1D-AID-Verhältnis ($1D-AID_{ver}$) und dem 2D-AID-Verhältnis ($2D-AID_{ver}$) zu bekommen, ist das $2D-AID_{ver}$ als Funktion des $1D-AID_{ver}$ in Abbildung 28 dargestellt. Hier sind eine Vielzahl aufgerauter ZnO:Al Proben der Temperaturserie und anderer Serien, die auf dickem Glas (3,3 mm) hergestellt wurden gezeigt. Es ergibt sich ein linearer Zusammenhang zwischen der $2D-AID_{ver}$ und der $1D-AID_{ver}$. Dieser ist nahezu unabhängig davon, ob einfachtexturierte oder mehrfachtexturierte Proben als Basis für den linearen Fit gewählt werden. Die grüne, strichpunktierte Linie im Graphen stellt die Winkelhalbierende des Diagramms dar. Messpunkte, die auf dieser Gerade liegen, zeigen sowohl im 1D- als auch im 2D-Messsystem die gleichen AID_{ver} -Werte. Dies ist für Werte im Bereich von ca. 11 bis 13 gegeben. Für alle anderen Messbereiche, kann der Messwert des 2D-Prototypen als Funktion des Messwertes des 1D-Laborsystems mit Hilfe der folgenden Formel dargestellt werden:

$$AID_{ver,2D} = 0,74 * AID_{ver,1D} + 2,4 \quad (1)$$

Mit Hilfe der Geradengleichungen können nun bereits bekannte Toleranzen der AID_{ver} -Werte des 1D-Messplatzes in neue AID_{ver} -Werte übersetzt werden.

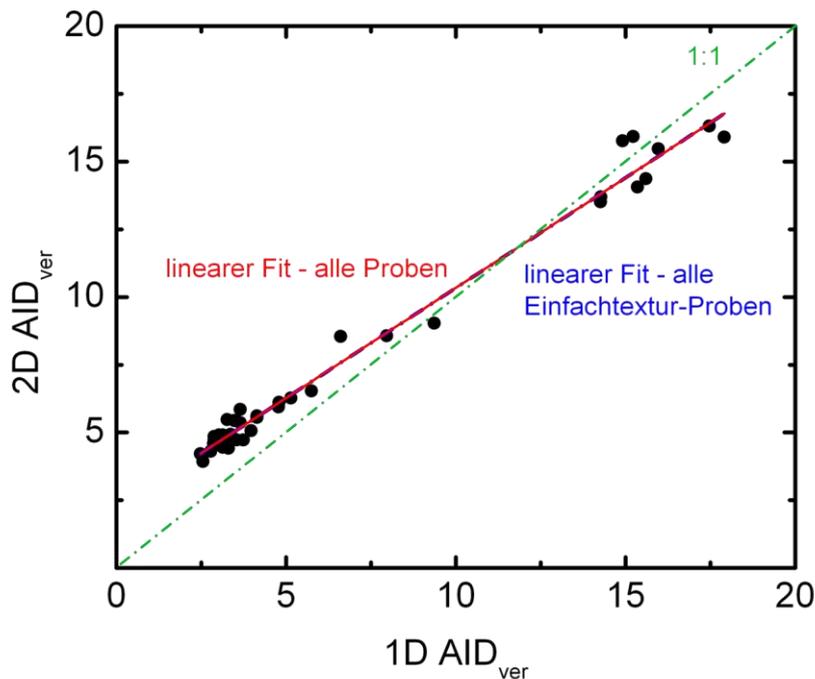


Abbildung 28: Korrelation zwischen 1D-AID_{ver} und 2D-AID_{ver} (dickes Glas 3,3 mm)

Da einer der Unterschiede zwischen den Messplätzen in der Erfassung des internen Lichteinfangs liegt und dieser stark von der Dicke des Substratglases abhängig ist, ist die ermittelte Geradengleichung zur „Übersetzung“ der AID_{ver} nur für die gegebene Glasdicke zulässig. Für dünnere und dickere Gläser muss sie entsprechend neu ermittelt werden. In Jülich ist neben dem in Abbildung 28 gezeigten 3,3 mm dicken Glas in einem weiteren Standardprozess ein dünneres (nur 1,1 mm) Glas in Gebrauch. In **Abbildung 28** ist das 2D-AID_{ver} als Funktion des 1D-AID_{ver} für aufgerautes ZnO:Al auf dem dünnerem Glas dargestellt. Allgemein kann festgehalten werden, dass die Abweichungen zwischen dem 1D-Laborsystem und dem 2D-Prototypen im Falle des dünneren Substratglases geringer ausfallen. Auch für diesen Substratglastyp können die AID_{ver}-Toleranzen vom 1D-Laborsystem zum 2D-Prototypen übersetzt werden, gemäß der folgenden Formel:

$$AID_{ver,2D} = 0,88 * AID_{ver,1D} + 0,6 \quad (2)$$

Optimierung der Oberfläche für $\mu\text{c-Si:H}$ -Solarzellen

In **Abbildung 29** ist die diskrete Großwinkelstreuung bei 60° des 2D-Messplatzes als Funktion der Heizertemperatur dargestellt. Es zeigt sich ähnlich wie beim Versuch mit dem 1D-Messplatz ein deutliches Maximum der Großwinkelstreuung für die Heizertemperatur von 430°C . Im Vergleich dazu ist in **Abbildung 30** die Großwinkelstreuung des 1D-Laborsystems bei 60° als Funktion der Heizertemperatur dargestellt. Auch hier zeigt sich bei 430°C Heizertemperatur das Maximum, allerdings ergeben sich unterschiedliche Verläufe für die Großwinkelstreuung zu niedrigeren bzw. höheren Temperaturen. Zu niedriger Temperaturen nimmt die Großwinkelstreuung nicht so stark ab wie zu höheren Temperaturen. Das lässt die Vermutung zu, dass im Falle der niedrigeren Temperaturen, die eher ein Typ I Material hervorbringen, die Oberflächenstrukturen einen internen Lichteinfang eher begünstigen, wohingegen im Falle von höheren Temperaturen eher ein Typ III Material entsteht, welches den internen Lichteinfang weniger begünstigt. Entscheidend für die

Verwendung des 2D-Prototypen innerhalb der Optimierung ist jedoch, in wie weit er in der Lage ist, das Maximum der Großwinkelstreuung und damit des Stromes aus $\mu\text{-Si:H}$ -Solarzellen zu detektieren. Dass dies ebenso gut wie mit dem 1D-Laborsystem möglich ist, konnte gezeigt werden.

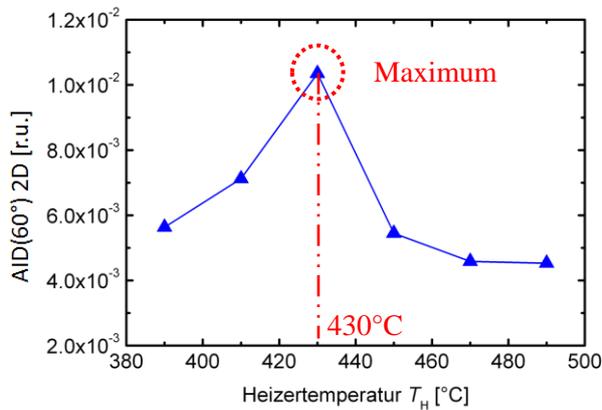


Abbildung 29: Diskrete Großwinkelstreuung AID(60°) gemessen mit dem 2D-Prototypen in Abhängigkeit der Heizertemperatur.

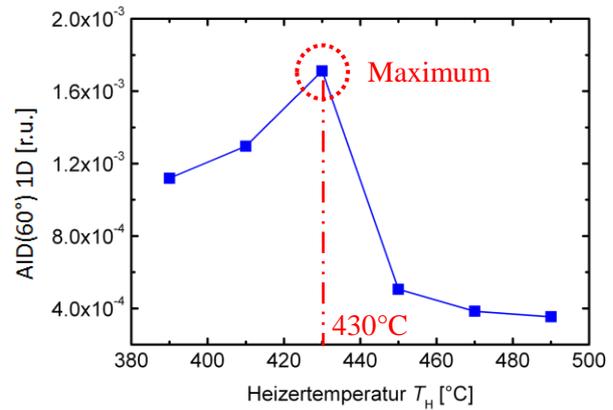


Abbildung 30: Diskrete Großwinkelstreuung AID(60°) gemessen mit dem des 1D-Laborsystems in Abhängigkeit der Heizertemperatur.

3.2 Veröffentlichungen

- Gabrielle Jost, Tsvetelina Merdzhanova, Thomas Zimmermann, Joachim Kirchhoff, Jürgen Hüpkes; *Predictive Power of Angular Resolved Scattering Measurements on ZnO:Al Front Contacts*; Poster Präsentation at 4th IWFSSC, Neuchatel, Switzerland, 19.-23.3.2012
- Gabrielle Jost, Tsvetelina Merdzhanova, Thomas Zimmermann, Joachim Kirchhoff, Aad Gordijn, Jürgen Hüpkes; *Angular Resolved Scattering Measurements for Process Control of Texture-Etched ZnO:Al Front Contacts*, Poster Präsentation, 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition Frankfurt, 2012 & Proceedings of 27th EU PVSEC, 2012, p. 2543.
- Alexander Bertz, Enno Malguth, Gabrielle Jost, Daniel Carl, Steffen Uredat, Tobias Schenk, Jürgen Hüpkes; *Inline-ARS-Measurement of Texture-Etched ZnO:Al Front Contacts in Silicon Based Thin-Film Solar Cell Fabrication*, Poster Präsentation, 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition Frankfurt, 2012.
- Gabrielle Jost, Tsvetelina Merdzhanova, Thomas Zimmermann, Jürgen Hüpkes; *Process control of texture-etched high-rate ZnO:Al front contact layers for application in silicon thin-film solar cells*, Poster Präsentation + Proceedings of 9th International Conference on Coatings on Glass and Plastics, Breda, Netherlands, 2012
- Gabrielle Jost, Tsvetelina Merdzhanova, Thomas Zimmermann, Jürgen Hüpkes; *Process monitoring of texture-etched high-rate ZnO:Al front contacts for silicon thin-film solar cells*, Thin Solid Films 532 (2013) pp. 66-72.

- Gabrielle Jost, Jürgen Hüpkes, Alexander Bertz, Volker Jetter, Enno Malguth; *Inline winkelaufgelöste Streulichtmessungen an texturierten ZnO:Al-Frontkontakten im Herstellungsprozess von Silizium-Dünnschicht-Solarzellen*, Vortrag und Posterpräsentation auf dem ersten Statuskolloquium der Förderprojekte der Innovationsallianz Photovoltaik, Berlin, 2013
- Gabrielle Jost, Jürgen Hüpkes; *Feedback Control of the Sputter Deposition to Stabilize the Surface Texture of ZnO:Al Front Contacts*, Vortrag + Proceedings Paper (ID 203), 7th International Photovoltaic Power Generation Conference & Exhibition (SNEC), Shanghai, China, 2013
- Gabrielle Jost, T. Merdzhanova, Jürgen Hüpkes; *Influence of Different Front Contact Textures on the Light Coupling and Scattering in Silicon Thin-Film Solar Cells*, Poster Präsentation XXII International Materials Research Congress , Cancun, Mexiko, 2013.

3.3 Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Aufgrund der sich ergebenden marktbedingten Änderungen innerhalb der Projektlaufzeit, haben sich die Aufgaben für Jülich gegenüber dem ursprünglichen Plan insbesondere im Arbeitspaket 3 geändert. Die Offline-Kontrolle und Korrelationsfunktion, die eigentlich an der Produktionslinie untersucht werden sollte, nachdem das Messsystem in die Produktionslinie integriert wurde, wurden ersatzweise in Jülich durchgeführt. Ebenso ergaben sich durch Wegfall des Industriepartners Leybold Optics Probleme industriell gefertigtes ZnO zu beziehen. Um dennoch ein große Bandbreite an Zinkoxid-Frontkontakten untersuchen zu können, wurden in Jülich vermehrt eigene Testserien mit verschiedenen Anlagen hergestellt.

3.4 Verwertbarkeit der Ergebnisse

Das im Rahmen dieses Projektes entstandene Messequipment und Knowhow wird in Jülich in der täglichen Qualitätssicherung der Frontkontaktschichten eingesetzt. Die zusätzlich gewonnen Erkenntnisse im Dauereinsatz komplettieren das gesammelte Wissen in Bezug auf Qualitätskriterien weiterhin. Neben diesem täglichen Einsatz werden aber derzeit noch weitere Anwendungsgebiete wie etwa die Qualitätskontrolle von Batterieelektroden oder gerakelten Brennstoffzellenelektroden mit Hilfe der winkelaufgelösten Streulichtmessung betrachtet.

3.5 Fortschritte anderer während des Vorhabens

Im Rahmen des Verbundvorhabens LIST streben die Partner Sentech Instruments, Berlin, und Fraunhofer IST, Braunschweig, in Konkurrenz zum Alpha-Projekt ein ähnliches Messsystem an, welches diskrete Winkel detektiert. Der Vorteil des hier verfolgten Systems ist die zweidimensionale

Erfassung der Messdaten, die dazu eingesetzt werden kann auch nicht isotrop streuende Proben zu analysieren.

4 Referenzen

- [1] H. Sai, H. Jia, M. Kondo, *Impact of front and rear texture of thin-film microcrystalline silicon solar cells on their light trapping properties*, Journal of Applied Physics **108**, pp. 044505-1 – 044505-9, 2010.
- [2] F. Ruske, C. Jacobs, V. Sittinger, B. Szyszka und W. Werner, *Large area ZnO:Al films with tailored light scattering properties for photovoltaic applications*, Thin Solid Films **515**, pp. 8695-8698, 2007.
- [3] J. Hüpkes, B. Rech, S. Calnan, O. Kluth, U. Zastrow, H. Siekmann, M. Wuttig, *Material study on reactively sputtered zinc oxide for thin film silicon solar cells*, Thin Solid Films **502**, pp. 286-291, 2006.
- [4] H. Stiebig, M. Schulte, C. Zahren, C. Haase, B. Rech, P. Lechner, *Light trapping in thin-film silicon solar cells by nano-textured interfaces*, Proceedings of SPIE - Photonics for Solar Energy Systems Vol. **6197**, pp. 619701-1 -619701-9, 2006. Doi: 10.1117/12.662842
- [5] P. Lechner, R. Geyer, H. Schade, B. Rech, O. Kluth, H. Stiebig, *Optical TCO properties and quantum efficiencies in thin-film silicon solar cells*, Proceedings of the 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, p. 1591-1594, 7-11 June 2004, Paris France.
- [6] K. Bittkau, M. Schulte, T. Beckers und R. Carius, *Fourier analysis for the study of light scattering properties of randomly textured ZnO films*, Proceedings of SPIE - Photonics for Solar Energy Systems III Vol. **7725**, pp. 77250N-1 - 77250N-8, 2010.
- [7] M. Schulte, B. P. K. Bittkau, S. Jorke, H. Stiebig, J. Hüpkes und U. Rau, *Ray tracing for the optics at nano-textured ZnO-air and ZnO-silicon interfaces*, Wiley Online Library; DOI: 10.1002/pip.1097, 2011.
- [8] D. Dominé, F.-J. Haug, C. Battaglia und C. Ballif, *Modeling of light scattering from micro- and nanotextured surfaces*, Journal of Applied Physics **107**, 044504, 2010.
- [9] G. Jost, T. Merdzhanova, T. Zimmermann, J. Hüpkes, *Process monitoring of texture-etched high-rate ZnO:Al front contacts for silicon thin-film solar cells*, Thin Solid Films **532** (2013) p. 66-72.
- [10] G. Jost, E. Bunte, J. Worbs, H. Siekmann, J. Hüpkes, *Surface characterization of sputtered ZnO:Al for silicon thin-film solar cells*, Proceedings of the 25th Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Valencia, (2010) p. 3078-3082.
- [11] W. Dewald, V. Sittinger, D. W. B. Szyszka, J. Hüpkes, P. Obermeyer, F. Hamelmann, H. Stiebig, F. Säuberlich, D. Severin, S. Klein, M. Rhode und U. Schmidt, *Evaluation of textured TCOs for a-Si:H/ μ c-Si:H thin film solar cells by angular resolved light scattering measurements*, Proceedings of the 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and

Exhibition, pp. 2704-2709, 2011.

[12] M. Berginski, J. Hüpkes, M. Schulte, G. Schöpe, H. Stiebig, B. Rech, *The effect of front ZnO:Al surface texture and optical transparency on efficient light trapping in silicon thin-film solar cells*, Journal of Applied Physics **101**, pp. 074903-1 - 074903-11 , 2007.

[13] J. I. Owen, J. Hüpkes, H. Zhu, E. Bunte, und S. E. Pust, *Novel etch process to tune crater size on magnetron sputtered ZnO:Al*, Physica Status Solidi A **208** No.1 p. 109-113; DOI 10.1002/pssa.201026164, 2010.

[14] G. C. E. Jost, *Analyse der Lichtstreuung zur Textur-Optimierung von Zinkoxid-Frontkontakten für Silizium-Dünnschichtsolarzellen*, Dissertation RWTH Aachen, 2013; Schriften des Forschungszentrums Jülich Reihe Energie & Umwelt, Band 223, 2014.

[15] O. Kluth, G. Schöpe, J. Hüpkes, C. Agashe, J. Müller, B. Rech, *Modified Thornton model for magnetron sputtered zinc oxide: film structure and etching behaviour*, Thin Solid Films **442**, p. 80-85, 2003.