

# Abschlussbericht

für das Verbundprojekt

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

|                                                    |                                       |
|----------------------------------------------------|---------------------------------------|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>LayTec in-line GmbH | <b>Förderkennzeichen:</b><br>0325356A |
|----------------------------------------------------|---------------------------------------|

Es handelt sich um ein Einzelprojekt

**Titel des Einzelprojekts:** nicht zutreffend

Es handelt sich um ein Teilprojekt eines Verbundprojekts

**Titel des Verbundprojekts:** ALPHA - Auf Lichtstreuung basierte Prozessregelung für die Herstellung von Aluminium- und Bor-dotierten Zinkoxid-Frontkontakten für Siliziumdünnschichtsolarzellen

**Titel des Teilprojekts:** In-line Messtechnik

**Projektleitung:** Enno Malguth, enno.malguth@laytec.de, 030 890055-353

**Laufzeit des Vorhabens:**

01.11.2011 – 31.12.2013

„Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des *Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit* unter dem Förderkennzeichen 0325356A gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.“

# Teil I: Kurzdarstellung

## 1.1 Aufgabenstellung

Ziel des Projekts war die Entwicklung eines in-line-fähigen Messgeräts, mit dem die Intensität von Licht, das an einer rauen Schicht eines transparenten, leitfähigen Oxids (TCO) auf einem Glassubstrat (TCO/Glas) gestreut wird, winkelaufgelöst gemessen werden kann. Durch Integration des Messgerätes in den Herstellungsprozess TCO beschichteten Glases für Siliziumdünnschichtsolarzellen soll es für die Prozessreglung eingesetzt werden.

## 1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Motivation für das Projekt war die sich rasant entwickelnde Technologie der Siliziumdünnschichtsolarzellen mit wachsenden Marktanteilen. Hinsichtlich weiterer Effizienzsteigerung kommen Licht streuenden Frontkontaktschichten (TCOs) eine Schlüsselrolle zu. Diese waren bereits im Rahmen des vom BMU geförderten Verbundvorhabens LIMA [1] beträchtlich weiterentwickelt worden. Eine wesentliche Herausforderung blieb die Kontrolle der Qualität der Licht streuenden Kontaktschichten im laufenden Produktionsprozess. Um hierfür eine industrietaugliche Lösung zu entwickeln, traten Firmen und Forschungseinrichtungen mit relevanter Expertise zusammen: Herstellung von TCO/Glas (Leybold), optische in-line Messtechnik (LayTec), Siliziumdünnschichtsolarzellen (FZ-Jülich) und optische Messtechnik (Fraunhofer IPM).

## 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Der Arbeitsplan gliederte sich in drei Arbeitspakete, die sich in einzelne Aufgaben weiter unterteilten. Das erste Arbeitspaket widmete sich Entwicklungsarbeiten auf Laborlevel. LayTec kam dabei in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern vor allem die Erprobung und Evaluierung verschiedener Messkonzepte zu. Im Rahmen des zweiten Arbeitspakets sollte ein produktionslinientaugliches Messsystem entwickelt werden, welches schließlich innerhalb des dritten Arbeitspakets in der Produktion bei Leybold eingesetzt werden sollte.

Mit dem Beginn des Projekts zog sich Leybold aus der Produktion von TCO/Glas zurück und stieg dementsprechend aus dem Projekt aus. Das Projekt konnte trotzdem weitergeführt werden, weil die Integration in die Produktionslinie von Leybold erst für die zweite Projekthälfte vorgesehen war. Dies sollte genug Zeit lassen, einen anderen Produzenten von TCO/Glas für die Linienintegration zu gewinnen. Doch während das Projekt wie geplant voranschritt, geriet die Photovoltaikindustrie in eine Krise, von der insbesondere Dünnschichttechnologien betroffen waren, mit der Folge, dass es bald keine Firmen mehr gab, die als Integrationsorte in Frage kamen. Als Reaktion wurde das entwickelte Messgerät nach Rücksprache mit dem Projektträger zur Prozesskontrolle am FZ Jülich installiert. Darüber hinaus wurde die entwickelte Technik auf einen Stand gebracht, der alternative Einsatzgebiete erschließen lässt.

## 1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Ausgangspunkt für die Projektaktivitäten waren die kurz zuvor etablierten Zusammenhänge zwischen winkelabhängiger Streucharakteristik von TCO/Glas und dem Wirkungsgrad darauf basierender Siliziumdünnschichtsolarzellen [2,3]. Darauf aufbauend gab es bereits erste Theorien, wie sich winkelaufgelöste Streulichtmessungen für eine entsprechende Prozessregelung einsetzen ließen [4]. In jenen Studien wurde das Streuverhalten mit Hilfe Goniometer-basierter Messaufbauten ausgemessen. Die damit verbundenen Messzeiten von vielen Minuten erlaubten keine echte Prozesssteuerung. Darüber hinaus ermöglichen Goniometer nur eine 1D (fester Azimut Winkel, für Erläuterung siehe Abschnitt 2.1.1) Erfassung der Lichtstreuung, wodurch zum Beispiel anisotropes Streuverhalten, wie es im Linienprozess hergestelltes TCO/Glas aufweist, unberücksichtigt bleibt.

Insbesondere im Zuge der Messkonzeptevaluation wurde an diverse vorhandene Technologien und Verfahren angeknüpft:

- Double Sided Strip Detector (DSSD) [5]
- Fibertaper [6,7]
- Faceplate [7]
- Streuscheibe [8]

## 1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen der Messkonzeptevaluation arbeiteten wir neben den Projektpartnern mit verschiedenen Firmen zusammen.

Mit Lighting and Imaging SCHOTT North America Inc. wurden verschiedene Konzepte basierend auf Fibertapern erörtert. Außerdem bekamen wir Fibertaper und Faceplates für Vorversuche zur Verfügung gestellt. In Zusammenarbeit mit Silicon Sensor International AG entwickelten wir Konzepte für DSSDs. Die Firmen FiberTech Optica und Leoni halfen bei der Entwicklung des „Faserhaubenansatzes“ (s.u.). In Kooperation mit der Askion GmbH wurde die Firmware eines Lasers für den in-line Einsatz optimiert.

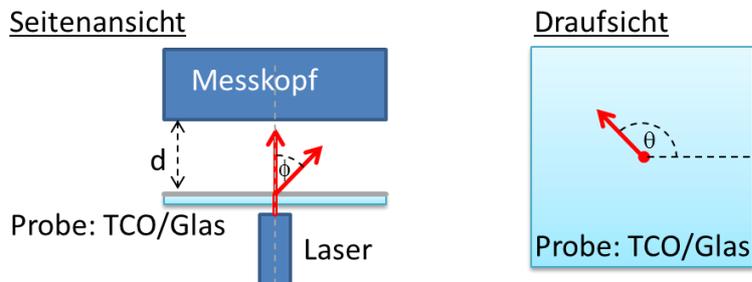
# 2 Eingehende Darstellung

## 2.1 Projektverlauf und Ergebnisse

### 2.1.1 Lastenheft

Die Rahmenbedingungen für eine linientaugliche Messanwendung wurden festgelegt. Die entsprechende Messsituation ist in Abbildung 1 illustriert. Es sollen Streuwinkel bis  $70^\circ$  zweidimensional detektiert werden. Mit Bezug auf Abbildung 1 bedeutet das Polarwinkel:  $0 < \phi < 70^\circ$  und Azimut-Winkel:  $0 < \theta < 360^\circ$ . Dieser

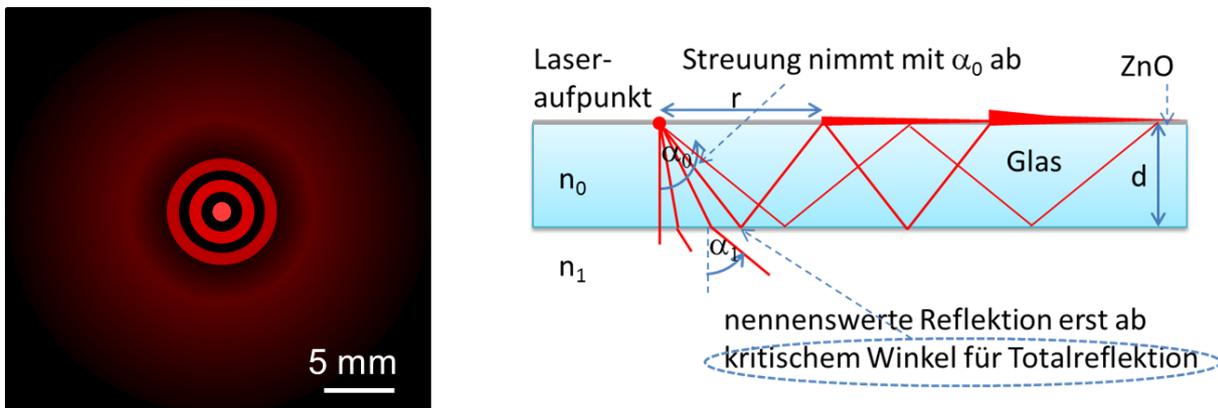
Raumwinkel soll mit einer Auflösung von  $1^\circ$  detektiert werden. Die Messdauer darf eine Sekunde nicht überschreiten. Der Arbeitsabstand  $d$  darf 10 mm nicht unterschreiten.



**Abbildung 1:** Skizze der Messsituation. Gestreutes Laserlicht ist rot dargestellt. Der Raumwinkel, in den das Licht gestreut wird, wird durch den Polarwinkel  $\phi$  und den Azimutal Winkel  $\theta$  aufgespannt.

### 2.1.2 Mehrfachreflexion innerhalb des Glassubstrats

Mehrfachreflexion innerhalb des Glassubstrats wurde näher untersucht. Eine schematische Darstellung findet sich in Abbildung 3. Diese Mehrfachreflexion ist unvermeidbar und sollte durch das Messsystem berücksichtigt und nach Möglichkeit ausgeblendet werden.



**Abbildung 2:** Links: Qualitative Skizze des beobachteten Intensitätsverlaufs des Streulichts. Der zentrale Punkt stellt den Aufpunkt des Laserstrahls dar. Rechts: Skizze des Strahlenverlaufs, der durch Mehrfachreflexion innerhalb des Glassubstrates zu der Beobachteten Ringstruktur führt.

### 2.1.3 Evaluierung verschiedener Umsetzungskonzepte

Für die Umsetzung eines den Projektziele entsprechenden Messsystems wurden verschiedene Detektionskonzepte evaluiert. Allen Konzepten gemein ist die Erzeugung des Streulichts durch einen Laserstrahl, der durch das Glassubstrat die TCO Schicht beleuchtet.

#### 2.1.3.1 Abbildende Optik

Das Lastenheft verlangt die Messung von Streulicht, das in Polarwinkel  $0^\circ - 70^\circ$  gestreut wird. Will man dieses Streulicht mittels abbildender Optik (Linsen, Spiegel) detektieren, muss ein entsprechendes Objektiv eine numerische Apertur (NA) von  $\sin 70^\circ = 0.94$  aufweisen. Einen solchen Wert erreichen höchstens

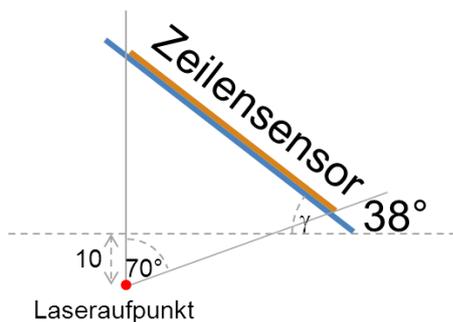
Mikroskop-Objektive. Aufgrund des oben genannten Arbeitsabstands von 10 mm müsste ein solches Objektiv zudem einen Durchmesser von mindestens 55 mm aufweisen. Eine solche Optik würde eine industrielle Anwendung unbezahlbar machen und fällt somit aus.

### 2.1.3.2 Zweidimensionaler Photodioden-Array

Der Raumwinkel der zu detektierenden Lichtstreuung (Polarwinkel  $0^\circ - 70^\circ$ , Azimut  $0^\circ - 360^\circ$ ) könnte durch einen DSSD abgedeckt werden. Allerdings lässt sich die für die gewünschte Winkelauflösung benötigte DSSD nicht schnell genug auslesen, um in der oben spezifizierten Messdauer zu bleiben.

### 2.1.3.3 Eindimensionale winkelaufgelöste Streulichtmessung

Eine eindimensionale winkelaufgelöste Streulichtmessung (Polarwinkel  $0^\circ - 70^\circ$ , Azimut fest) ließe sich relativ schnell und unkompliziert unter Verwendung eines Zeilensensors realisieren. Eine mögliche Konfiguration ist in Abbildung 3 skizziert. Geeignet wäre eine 50 mm lange CMOS Zeile. Entsprechende Zeilen sind kommerziell erhältlich; z.B. die DRAGSTER DR-8k-7 von Awaiba. Allerdings wäre die erlangte eindimensionale winkelaufgelöste Streuinformation ungenügend bezüglich der Charakterisierung der TCO Abscheidung.



**Abbildung 3:** Skizze einer möglichen Anordnung für eindimensionale winkelaufgelöste Streulichtmessung.

### 2.1.3.4 Lichteinfang mittels Fibertaper, Detektion mittels Flächensensor

Verschiedene Umsetzungskonzepte unter Verwendung faseroptischer Taper (siehe Abbildung 4) wurden geprüft. Dabei soll das Streulicht durch ein großes Ende des Tapers eingesammelt werden. Am kleinen Ende des Tapers ließe sich das Licht dann mittels eines Flächensensors detektieren. In Zusammenarbeit mit Lighting and Imaging SCHOTT North America Inc. wurde eine entsprechende Konfiguration designt. Dabei stellte sich heraus, dass ein Fibertaper der benötigten Größe zu teuer wäre, um ein daraus hergestelltes Messgerät vermarkten zu können.



Abbildung 4: Beispiele für Fipertaper

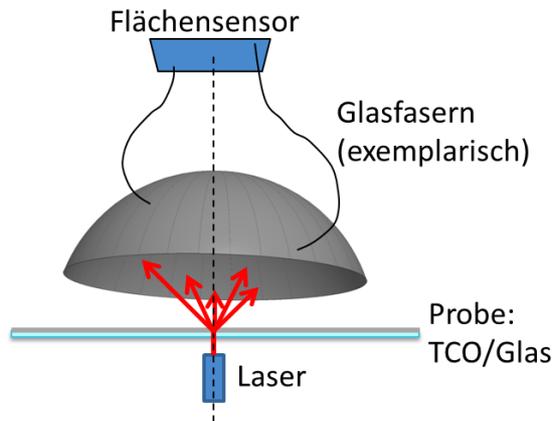
### 2.1.3.5 Ansatz „Faserhaube“: Lichteinfang mittels Glasfasern, Detektion mittels Flächensensor

Ähnlich des oben vorgestellten Konzepts basierend auf einem faseroptischen Taper, könnte die Flächentransformation (große Fläche zum Einsammeln des Streulichts → kleine Fläche eines Flächensensors) durch eine Anordnung von Glasfasern realisiert werden. Dabei wären die Enden der Glasfasern im abzudeckenden Raumwinkel (Polarwinkel  $0^\circ - 70^\circ$ , Azimut  $0^\circ - 360^\circ$ ) angeordnet, ausgerichtet auf den Ursprung des Streulichtes. Die der Probe abgewandten Enden der Fasern würden zu einem Bündel zusammengeführt und auf einen Flächensensor fixiert werden (siehe Abbildung 5).

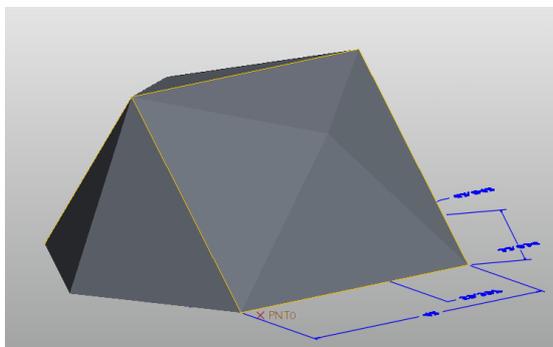
Für die objektseitige Anordnung und Ausrichtung der Faserenden ist eine Trägerkonstruktion notwendig. Hierbei würde es sich naheliegender Weise um eine Kugelkalotte mit Bohrungen für die Faserenden handeln, die den gewünschten Raumwinkel abdeckt und deren Mittelpunkt sich am Ort der Lichtstreuung befindet (siehe

Abbildung 5). Die Enden der Glasfasern werden von der konvexen Seite in die Bohrungen gesteckt, so dass sie in Richtung Zentrum der Kugeloberfläche zeigen. In der fertigen Messanwendung wäre dieses Zentrum die Messsonde: Streulicht, das an dieser Stelle seinen Ursprung hat, kann über die Glasfaser, mit der es aufgefangen wird, eindeutig ein Streuwinkel zugeordnet werden. Um eine einfache technologische Umsetzung zu ermöglichen, konzipierten wir außerdem eine Trägerkonstruktion bestehend aus flachen statt gekrümmten Flächenelementen. Randbedingung war dabei, den Winkel unter dem das Streulicht die Faserenden erreicht für alle Fasern innerhalb üblicher Akzeptanzwinkel zu halten und gleichzeitig die Anzahl der Flächenelemente möglichst klein zu halten. Die Lösung stellt ein halber Tetrakishexaeder [9] dar, wie er in

Abbildung 6 gezeigt wird.

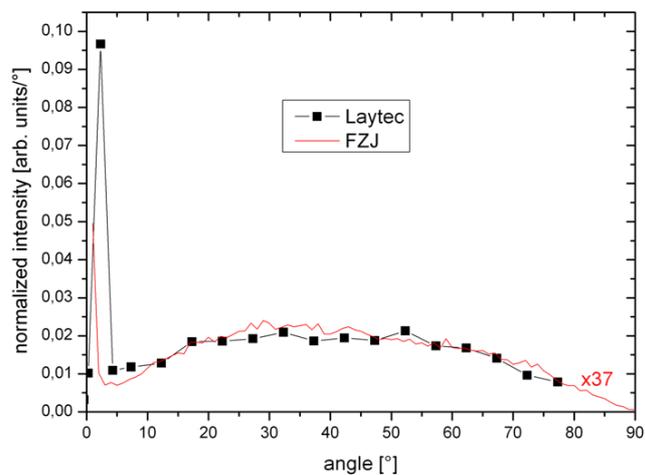
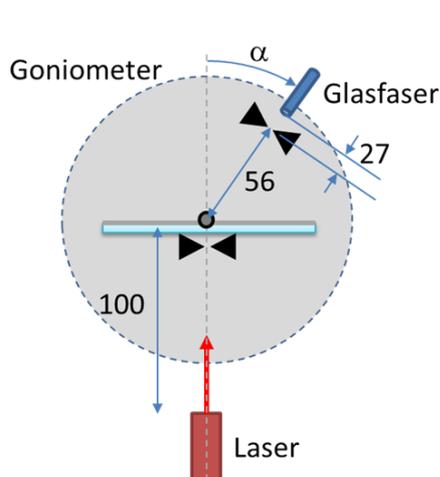


**Abbildung 5:** Skizze zur Veranschaulichung des „Faserhauben“-Ansatzes. Der Einfachheit halber sind hier lediglich zwei Glasfasern dargestellt. Der Ort der Lichtstreuung liegt im Mittelpunkt der Kugelkalotte (grau).



**Abbildung 6:** Konstruktion eines halben Tetrakishexaeder, wie er als Trägerkonstruktion für die „Faserhaube“ zum Einsatz kommen könnte.

Zur Evaluation des Ansatzes „Faserhaube“ wurde zunächst eine einzelne Faser mittels Goniometer durch den abzudeckenden Raumwinkel bewegt und das eingefangene Licht per Photodiode gemessen (siehe Abbildung 7 links). Durch Vergleich der gemessenen winkelaufgelösten Streulichtcharakteristik mit den Ergebnissen gemessen am Messstand (Photodiode + Goniometer) des FZJ wurden wichtige Erkenntnisse bezüglich parasitärer Streueffekte erlangt. Durch sukzessives Ausblenden dieser Effekte, konnten die Messkurven des FZJ reproduziert werden (siehe Abbildung 7 rechts).



**Abbildung 7:** Links: Skizze des Versuchsaufbaus zur Detektion von Streulicht mittels einer Glasfaser. Rechts: Vergleich der Streucharakteristik mit den Ergebnissen des FZJ.

Für ein Messsystem mit einer Messdauer von einer Sekunde hätte nun eine Anordnung von mehreren tausend Fasern realisiert werden müssen. Diese Ausführung wäre recht komplex und konnte nicht von LayTec umgesetzt werden. Die Umsetzung durch externe Anbieter wurde geprüft. Gleichzeitig wurde dieser von LayTec konzipierte Ansatz an das IPM transferiert zwecks technischer Umsetzung in Form eines Testaufbaus. Als Montageelement diente eine Kugelkalotte aus Kunststoff mit Bohrungen für die Faserenden. Für Details siehe Bericht des IPM. Während der Umsetzung wurde deutlich, dass die praktisch realisierbare Faserdichte nicht ausreicht, um die gewünschte Winkelauflösung von  $1^\circ$  zu erzielen. Aus diesem Grunde wurde entschieden, diesen Messansatz nicht weiter zu verfolgen. Zu dieser Entscheidung trug auch die Tatsache bei, dass nur schwer absehbar ist, wie kompliziert die Fixierung des Faserbündels auf einem Bildsensor werden wird.

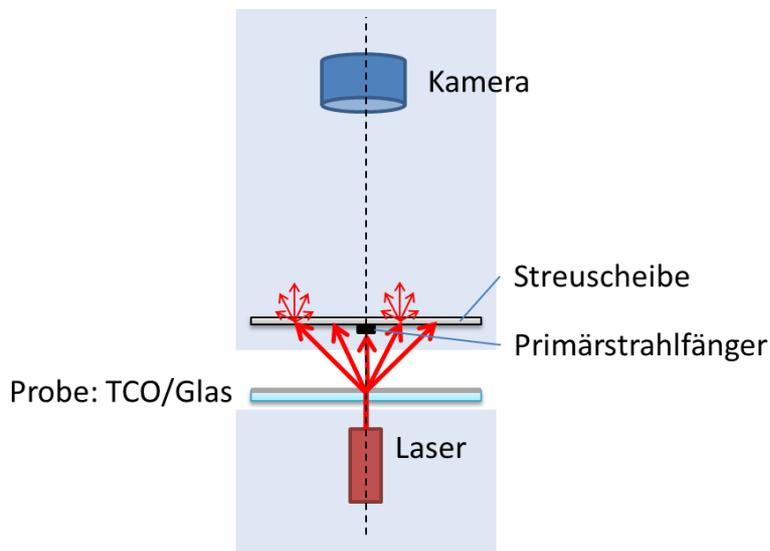
#### **2.1.3.6 Kombination aus Schirm und Kamera**

Ein weiterer vielversprechender Ansatz ist in Abbildung 8 skizziert. Es handelt sich um die Kombination eines Schirms, an dem das Streulicht abermals gestreut wird, und einer Kamera, die den Schirm abfotografiert. Kritisch ist dabei die große Intensitätsvariation des Streulichts. Sie übersteigt den Dynamikbereich üblicher Kameras. In ersten Versuchen wurde ein großer Dynamikbereich durch Mehrfachbelichtung erzielt. Dies führte zu guten Ergebnissen bei Messdauern, die knapp über eine Sekunde lagen. Als Schirm wurden verschiedene Streuscheiben evaluiert: Faceplate, Papier, Opalglas, Akrylscheibe. Am besten geeignet für ein industrielles Messsystem erwies sich das Opalglas. Ein weiteres wichtiges Element stellt der Laser zur Erzeugung des Streulichts dar. Dieser strahlt von einer Seite auf die Probe. Das Streulicht wird auf der gegenüberliegenden Seite detektiert (Abbildung 8).

Basierend auf diesen Ergebnissen wurde ein entsprechender Testaufbau konzipiert und aufgebaut. Hierbei kam eine Kamera mit logarithmischer Intensitäts-Signal-Kurve zum Einsatz, wodurch eine höhere Dynamik realisiert werden konnte.

Dieses Funktionsmuster erfüllte die zu Beginn des Projektes formulierten Anforderungen an das Messverfahren. Außerdem ist der Aufbau gut für den Linieneinsatz umsetzbar. Aus diesem Grunde entschieden sich die Projektpartner, diesen Ansatz weiter zu verfolgen.

Wie in Abschnitt 2.1.3.5 dargestellt, wurden Konzepte basierend auf der Verwendung von Fibertapern nicht weiterverfolgt. Deshalb beantragten wir die Projektmittel für fünf Fibertaper á 8.000 € (40.000 € in Summe) für die Anschaffung von Streuscheiben und Kameraoptiken umzuwidmen, entsprechend des hier und im Folgenden beschriebenen Funktionsprinzip des Messkopfs.



**Abbildung 8:** Skizze des Messprinzips basierend auf einem Schirm (Streuscheibe), Kamera und Laser angeordnet entlang der optischen Achse. Dargestellt sind Primärstrahl (Laser), das zu messende Streulicht, sowie die Streuung am Schirm. Die hellblauen Kästen deuten an, welche Elemente Teil des Messkopfs werden.

#### 2.1.4 Integration mit Förderelement

Für eine erste Simulation eines in-line Einsatzes des oben beschriebenen Funktionsmusters wurde dieses mit einem Förderelement kombiniert (siehe

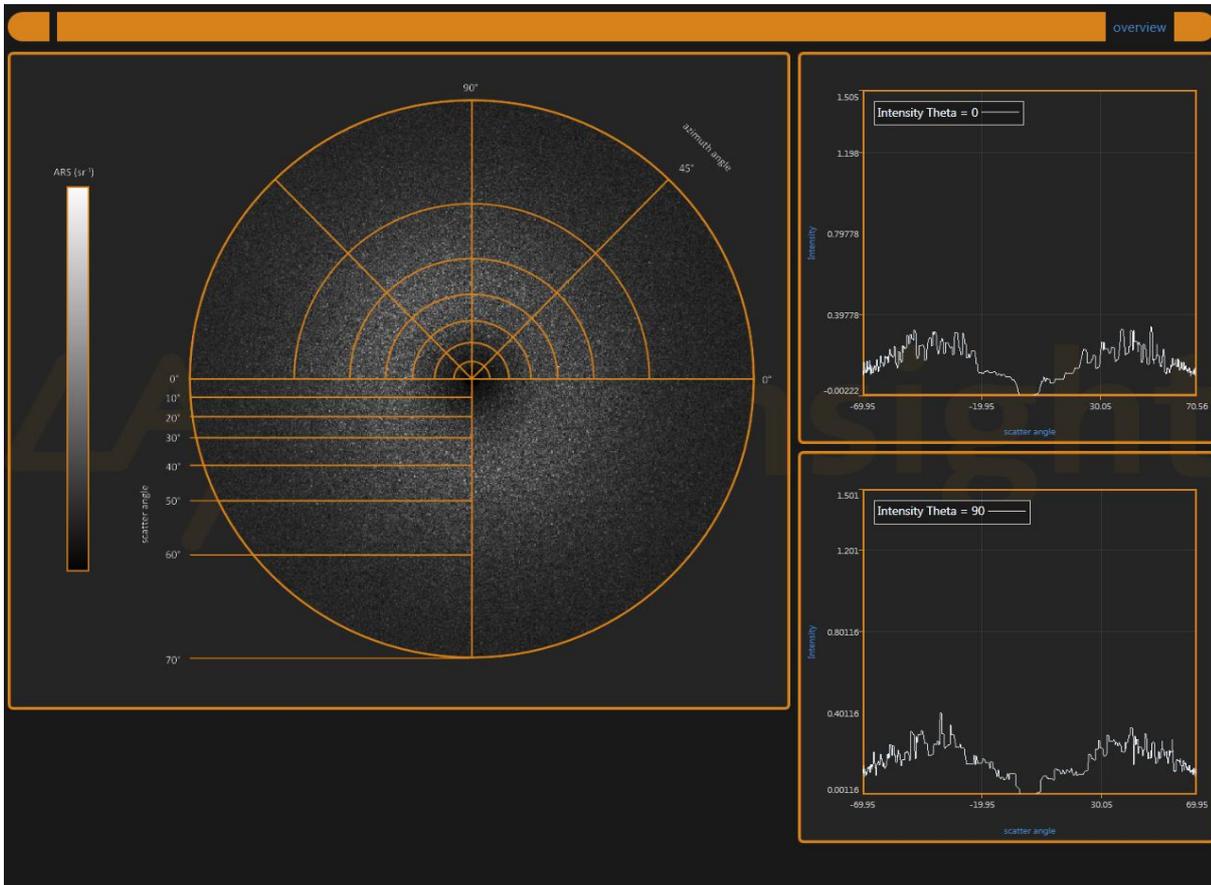
**Abbildung 9**). Dies erlaubt nun, ähnlich wie in einer Produktionslinie, TCO beschichtete Gläser zwischen Laser und Messkopf hindurch fahren zu lassen. Erste Tests an verschiedenen Proben ergaben zufriedenstellende Ergebnisse und lieferten die nötigen Erkenntnisse um die weiteren Entwicklungsschritte (s.u.) einzuleiten.



**Abbildung 9:** Foto des Funktionsmusters kombiniert mit dem Fördererelement. Im Hintergrund ist die Benutzeroberfläche auf dem Monitor des Mess-Computers zu erkennen. Eine Probe TCO beschichtetes Glas befindet sich unter dem Messkopf. An Ihr gestreutes grünes Laserlicht ist sichtbar.

### 2.1.5 Softwareentwicklung

Für die Präsentation des Messkonzepts gegenüber potentiellen Kunden entwickelten wir bereits zu dieser recht frühen Entwicklungsphase eine bedienerfreundliche Softwareoberfläche. Als Basis diente die flexibel konfigurierbare LayTec Insight Softwareplattform. So ermöglichten wir es Benutzern ohne Vorkenntnisse, den Messkopf zu kontrollieren und die Messdaten darstellen zu lassen. Die Darstellung der winkelaufgelösten Streuintensität erfolgte mittels eines zweidimensionalen Diagramms als Funktion des Raumwinkels (siehe **Abbildung 10**). Außerdem wird die Streulichtintensitätsverteilung entlang zweier Achsen (Azimutal Winkel =  $0^\circ$  und  $90^\circ$ ) dargestellt.



**Abbildung 10:** Screenshot der Benutzeroberfläche. Auf der linken Seite die 2D-Darstellung des winkelaufgelösten Streulichts. Rechts die Streulichtverteilung in Abhängigkeit vom Polarwinkel für die Azimutal Winkel 0° und 90°.

### 2.1.6 Präsentation auf der Messe und Konferenz EU PVSEC

Das oben beschriebene Funktionsmuster samt Bandedement und graphischer Bedienoberfläche wurde auf den Messen der EU PVSEC 2012 in Frankfurt a. M. und 2013 in Paris ausgestellt, um so das Projekt dem Fachpublikum zu präsentieren und gleichzeitig potenzielle Kunden auf das in Entwicklung befindliche Produkt aufmerksam zu machen. Die Aufstellung fand jeweils am Stand des FZJ statt. Die dortige Standbesetzung wurde durch LayTec entsprechend geschult. Kontakt mit mehreren Interessenten aus Industrie und Wissenschaft konnte hergestellt werden.

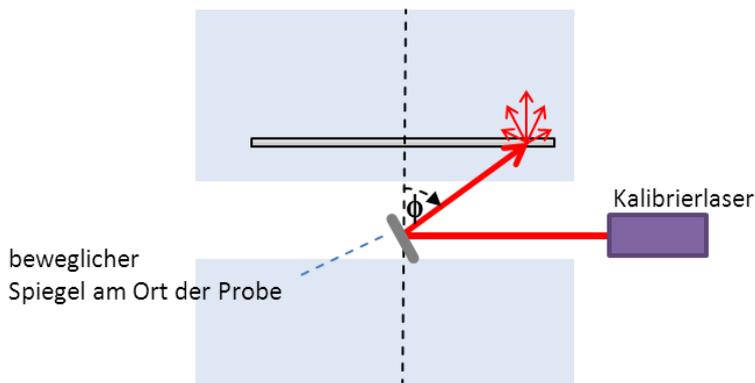
Auch auf der Konferenz der EU PVSEC 2012 war das Projekt ALPHA vertreten. Die Präsentation eines entsprechenden Posters erlaubte die Diskussion der Projektarbeiten in einem wissenschaftlichen Umfeld.

### 2.1.7 Entwicklung einer Kalibrationsprozedur

Während das Funktionsmuster bereits gute qualitative Daten lieferte, sind für eine quantitative und Messgeräte unabhängige Ausgabe der winkelabhängigen Streueigenschaften etliche Korrekturen der rohen Messdaten notwendig. Einige dieser Korrekturen lassen sich zwar aus der optischen Geometrie des Messkopfes und Kennlinien der Kamera berechnen. Andere Korrekturen lassen sich aber nur empirisch einmessen. Ein solches Einmessen deckt dann aber auch die berechenbaren Terme ab. Somit konnten wir

uns eine Berechnung von Korrekturtermen sparen und verließen uns auf Kalibrationsmessungen. Für den hier entwickelten Messkopf galt es, folgende zwei Größen zu kalibrieren: Den Winkel und die Streuintensität pro aufgelöstem Raumwinkel. Erst durch eine korrekte Kalibration dieser beiden Größen lässt sich aus dem Kamerabild eine quantitative winkelaufgelöste Streulichtverteilung ermitteln.

Die Kalibration folgt folgender Prozedur: Dort, wo während der Messung der Laser auf die Probe trifft, wird ein drehbarer Spiegel platziert, der den Strahl eines Kalibrierlasers unter definiertem Winkel auf die Streuscheibe lenkt (siehe Abbildung 11). Als Kalibrierlaser kann der im Messkopf verbaute Laser eingesetzt werden. Wichtig ist, dass der Kalibrierlaser die gleiche Wellenlänge hat wie der im Messkopf eingesetzte Laser. Außerdem muss sein Strahl einen möglichst kleinen Durchmesser haben. Darüber hinaus muss sich seine Intensität regeln lassen, was zu Kalibrierzwecken auch mit Hilfe von Graufiltern realisiert werden kann. Auf diese Art und Weise lässt sich das Streulicht kontrolliert simulieren.



**Abbildung 11:** Skizze der Winkel- und Intensitätskalibration.

### 2.1.7.1 Winkelkalibration

Licht, das von der Probe in ein bestimmtes Raumwinkelement gestreut wird, trifft nach Durchlaufen des Messkopfes schließlich auf einen Pixel des in der Kamera befindlichen Bildsensors. Bei der Winkelkalibration geht es darum, den Zusammenhang zwischen einem angesprochenem Pixel und dem Streuwinkel zu finden. Dieser ist zum Beispiel abhängig von:

- Projektion des Raumwinkels auf die ebene Streuscheibe
- Abstand zwischen Probe und Streuscheibe
- Der Position der Kamera relativ zur optischen Achse und relativ zur Streuscheibe
- Der Verzeichnung des Objektivs
- Der Lichtbrechung in der Streuscheibe

Die gesuchte „ $\Omega \leftrightarrow$  Pixel“ Zuordnung lässt sich durch den in Abbildung 11 skizzierten Aufbau bestimmen. Dazu wird der Winkel  $\phi$  variiert und jeweils festgestellt, welcher bzw. welche Pixel unter welchem Streuwinkel angesprochen werden.

### 2.1.7.2 Intensitätskalibration

Wie bei jeder optischen Detektionseinheit nimmt auch das hier entwickelte Messgerät ein Signal  $S(\Omega, \Theta)$  auf, welches abhängt vom zu messenden Streulichtfluss  $\Theta$ , der in den Raumwinkel  $\Omega$  gestreut wird (siehe Abbildung 12). Um auf den Streulichtfluss  $\Theta$  rückschließen zu können, muss diese Abhängigkeit, auch genannt Transferfunktion  $T$ , quantitativ bekannt sein. Sie lässt sich leicht unterteilen in einen intensitätsabhängigen Teil  $T_1(x)$  und einen winkelabhängigen Teil  $T_2(\Omega)$ :

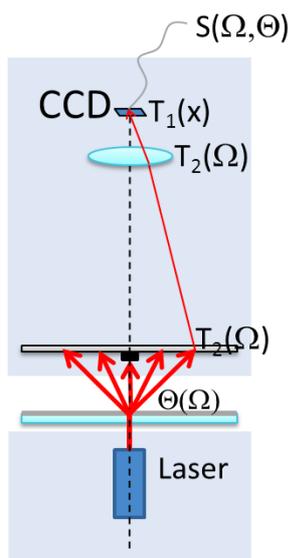
$$S(\Omega, \Theta) = T(\Omega, \Theta) = T_1(\Theta) T_2(\Omega)$$

$T_2(\Omega)$  ist vergleichbar mit einem Transmissionsgrad, der die Lichtintensität auf dem Weg vom Streuort zum Bildsensor winkelabhängig um einen Faktor zwischen 0 und 1 verringert. Folgende teils winkelabhängige Faktoren gehen in  $T_2(\Omega)$  ein:

- Streucharakteristik der Streuscheibe
- Transmissionsgrad der Luft/Streuscheibe-Grenzfläche
- Transmissionsgrad des Objektivs
- Vignettierung des Kameraobjektivs

All diese Einflüsse weisen eine Rotationssymmetrie bezüglich der optischen Achse auf. D.h. die Winkelabhängigkeit dieser Faktoren beschränkt sich auf den polaren Anteil  $\phi$  des Streuwinkels. Von daher kann  $T_2(\Omega)$  vereinfacht werden zu  $T_2(\phi)$ .

$T_1(x)$  repräsentiert die nichtlineare Response (Kennlinie) der Kamera. Sie bildet die auf den Bildsensor treffende Lichtintensität ab auf ein digitales Signal. Vernachlässigt wird hier, dass sich die Response von Pixel zu Pixel leicht unterscheiden kann.



**Abbildung 12:** Skizze der zur Bedeutung des Streulichtfluss  $\Theta$ , des Raumwinkels  $\Omega$  und der Transferfunktionsterme  $T_1(x)$  und  $T_2(\Omega)$ . Für Details siehe Text.

Weil wir den Einfluss aller oben genannten Faktoren nicht theoretisch berechnen können und es darüber hinaus noch weitere bisher unbenannte Einflussgrößen geben könnte, ist es sinnvoll die Funktionen  $T_1(x)$  und  $T_2(\Omega)$  auf empirischem Wege auszumessen. Dies geschieht mithilfe des in Abbildung 11 skizzierten Aufbaus.

Für die Bestimmung von  $T_1(x)$  wird zunächst bei festem Winkel die Laserintensität  $\Theta$  durchgestimmt. Aus den eingestellten Intensitäten  $\Theta$  und den gemessenen Signalen  $S(\Theta)$  ergibt sich die Funktion  $T_1(x)$ .

Im nächsten Schritt wird die Intensität  $\Theta$  konstant gehalten und der Winkel  $\phi$  variiert. Aus dieser Messreihe ergibt sich  $T_2(\phi) = T_1^{-1}(S(\phi)) / \Theta$ , wobei  $T_1^{-1}(x)$  die inverse Funktion von  $T_1(x)$  darstellt.

### 2.1.8 Nachführung des Arbeitsabstands

Mithilfe eines Linearmotors in Kombination mit einem optischen Abstandssensor wurde eine aktive Höhennachführung entwickelt (siehe Abbildung 13), die es erlaubt, während des in-line Einsatzes auch bei variierender Probenhöhe einen konstanten Abstand zwischen streuender Oberfläche und dem Messkopf zu gewährleisten. Trotz intensiver Bemühungen gelang es nicht, den relativ schweren Messkopf mit befriedigender Dynamik zu bewegen.



**Abbildung 13:** Aufbau einer aktiven Höhennachführung bestehend aus Linearmotor, Führung, Abstandssensor (blau), Flansch für Befestigung des Messkopfes und magnetische Feder, die im Falle eines Stromausfalls das Ganze an den oberen Anschlag drückt.

### 2.1.9 Änderung der wirtschaftlichen Situation

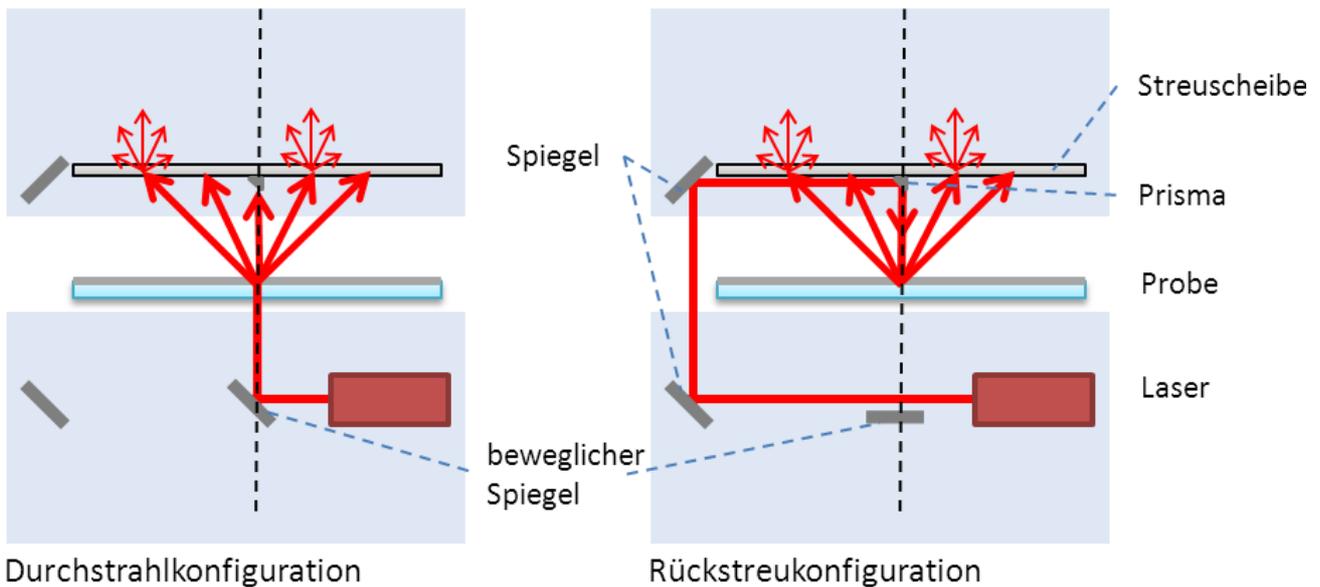
Während der Projektlaufzeit geriet die Solarindustrie wirtschaftlich in eine äußerst angespannte Lage. Dies betraf insbesondere Firmen der Siliziumdünnschichttechnologie. Infolge dieser Situation sind so gut wie alle Firmen aus der Herstellung von TCO-Frontkontakten für Siliziumdünnschichtsolarzellen ausgestiegen. Dies erschwerte es uns, eine industrielle Produktionslinie zu finden, in der das Messgerät getestet werden

konnte. Daher wurde das System beim FZJ installiert. Dies ermöglichte dem Projektpartner eine beschleunigte Prozessregelung, welche aber noch manuell durchgeführt wird. Außerdem konnten so die Ergebnisse des Erprobungsaufbaus direkt mit Messungen eines am FZJ befindlichen Goniometer basierten Messplatzes verglichen werden.

Nichtsdestotrotz war aufgrund der oben dargestellten Situation der Siliziumdünnschichtindustrie in der folgenden Zeit nicht mit großem Absatz des entwickelten Messsystems auf den ursprünglich anvisierten Märkten zu rechnen. Aus diesem Grund wurden seitens LayTec verwandte alternative Anwendungsgebiete evaluiert. Folgende Märkte wurden für den potentiellen Einsatz winkelaufgelöster Streulichtmessung identifiziert: TCO-Frontkontakte für CIGS und CdTe Dünnschichtsolarzellen, Vorderseitentexturierung von Wafer-basierten Silizium Solarzellen und periodische Mikrostrukturen, die sich anhand von Beugungsmustern charakterisieren lassen.

### 2.1.10 Messsystem der zweiten Generation

Nach dem Vorbild des ersten Funktionsmusters wurde bei LayTec ein zweiter wesentlich fortgeschrittener Messaufbau realisiert. Vor allem im Hinblick auf die Erschließung alternativer Anwendungsbereiche musste dieser Aufbau möglichst flexibel einsetzbar sein. Für die winkelaufgelöste Analyse des Lichtstreuerverhaltens transparenter, leitfähiger Oxide eignet sich die im Rahmen des Projektes verfolgte Durchstrahlgeometrie. Das heißt, der Laser und die Detektionseinheit befinden sich auf gegenüberliegenden Seiten der Probe (siehe hellblau schattierte Bereiche in Abbildung 8). Um die Flexibilität dieses Ansatzes auch auf intransparente Oberflächen sowie auf Messumgebungen, die nur Zugang von einer Seite der Probe her erlauben, auszuweiten, wurde ein Mechanismus geschaffen, der es erlaubt, auch in rückstreuender Anordnung die Messung durchzuführen (siehe **Abbildung 14**). Hierbei wird das Licht des Lasers über einen prismenförmigen Umlenkspiegel unterhalb der Streuscheibe auf die zu untersuchende Oberfläche gelenkt. Die Drehung eines Spiegels erlaubt das schnelle Umschalten zwischen Durchstrahl- und Rückstreugeometrie. In beiden Geometrien dient das Prisma als Primärstahlfänger.



**Abbildung 14:** Skizze des Testaufbaus für die winkelaufgelöste Streulichtmessung. Das Messprinzip entspricht dem in Abbildung 8 skizzierten. Ein beweglicher Spiegel erlaubt es, zwischen Durchstrahl- (links) und Rückstreukonfiguration (rechts) umzuschalten. Letztere ermöglicht die Anwendung der Messung auf intransparenten Oberflächen. Die Kamera ist weiterhin Teil der Messung, der Übersicht halber hier aber nicht dargestellt.

Weitere Flexibilität wurde erreicht, indem der Arbeitsabstand zwischen Probe und Streuscheibe variabel einstellbar ist. Hierdurch lässt sich der maximal beobachtbare Streuwinkel zwischen  $30^\circ$  und  $87^\circ$  einstellen. Für einige Anwendungen reicht die Auswertung kleiner Streuwinkelbereiche völlig aus. In diesen Fällen den messbaren Streuwinkelbereich zu begrenzen birgt zweierlei Vorteile: Erstens wird dadurch der Arbeitsabstand maximiert, was in der Regel die Integration in Produktionslinien vereinfacht und die Messung unempfindlicher gegen vertikale Probenbewegung macht. Zweitens wird die maximale Winkelauflösung des Messgerätes für den zu messenden Streuwinkelbereich eingesetzt.

Im Hinblick auf die Linienintegration und den potentiellen Einsatz mehrerer Messköpfe wird eine Kamera mit GigE Schnittstelle eingesetzt.

Der neue Aufbau ist mit zwei Diodenlasern ausgestattet:

1. Wellenlänge = 405 nm, Ausgangsleistung = 100 mW
2. Wellenlänge = 632nm, Ausgangsleistung = 1 mW

Laser Nr. 2 genügt der Lasersicherheitsklasse II und eignet sich somit für den Einsatz des Messgerätes ohne besondere Einhausung. Für den Einsatz von Laser Nr. 1 hingegen müssen entsprechende Sicherheitsvorkehrungen getroffen werden. Der Vorteil von Laser Nr. 1 ist seine relativ kleine Wellenlänge, welche die Größe minimal detektierbarer Strukturen begrenzt. Die hohe Ausgangsleistung ermöglicht das Vermessen schwach streuender Oberflächen auch bei kurzer Belichtungsdauer. Aus diesen Gründen streben wir für eine festinstallierte Linienintegration mit passender Sicherheitseinhausung den Einsatz von Laser Nr. 1 an. Deshalb haben wir einen Laser mit adressierbarer Ansteuerung gewählt, so dass auch hier

dem Einsatz mehrerer parallel laufender Messköpfe für Messungen auf großflächigen Substraten nichts im Wege steht. In diesem Zusammenhang beantragten wir, statt eines 405 nm Lasers von FolieCon (8.450 €) zwei Laser der Firma Askion mit angepasster Firmware anzuschaffen. Die Gesamtkosten hierfür lagen deutlich unterhalb der beantragten Mittel. Die einmalige Firmwareanpassung erlaubt den oben genannten Betrieb in einem Bussystem.

## 2.2 Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Im Folgenden werden die Positionen des Materialkostennachweises mit Kosten über 1000 € erläutert.

Ein modularer Hutschienen PC von Beckhoff stellt die notwendige Hardware für den in-line Einsatz dar, auf der die Kontroll-, Mess- und Bediensoftware des Messkopfes läuft.

Im Zuge der Messkonzeptentwicklung und des Messkopfdesigns wurden Laser der Firma FolieCon mit den Wellenlängen 532 nm und 808 nm eingesetzt.

Im linientauglichen Funktionsmuster kommen Laser der Firma Askion zum Einsatz mit einer Wellenlänge von 405 nm. Für den Betrieb mehrerer Messköpfe innerhalb eines Messsystems wurde in Zusammenarbeit mit der Firma Askion die Laserfirmware entsprechend angepasst.

Ein Linearmotor von LinMot wurde für die Entwicklung einer aktiven Höhennachführung des Messkopfes eingesetzt.

Ein Kontrollrechner von Dell stellt die notwendige Hardware für den Laboreinsatz sowie zur Messdemonstration dar.

## 2.3 Nutzen und weitere Ergebnisverwertung

Das im Rahmen des Projekts entwickelte Funktionsmuster eines in-line Messkopfes für winkelaufgelöste Streulichtmessung stellt die Basis für ein in-line Monitoring-System dar. Insbesondere wurden Konzepte erarbeitet, und erfolgreich getestet, die es erlauben, die Prozessparameter für die Herstellung von TCO auf Glassubstraten zu regeln. Außerdem wurde eine Prozedur für die Kalibration der Messköpfe bezüglich Winkel und Streuintensität entwickelt.

Auf der Basis der im Projekt erarbeiteten Technologie entwickelt LayTec zur Zeit ein entsprechendes Messsystem, das nicht nur die Vermessung von TCO/Glas für Siliziumdünnschichtsolarzellen ermöglicht, sondern sich allgemein für die Charakterisierung lichtstreuender Oberflächen eignet.

## 2.4 Bekanntgewordene Fortschritte anderer Stellen

Im Allgemeinen lassen sich 2D winkelaufgelöste Streulichtmessungen mithilfe eines Konoskops [10] oder einer kürzlich veröffentlichten Entwicklung der Universität Stuttgart [11] durchführen. Beide Methoden genügen jedoch nicht dem in diesem Projekt formulierten Lastenheft und eignen sich somit nicht für den in-line Einsatz bzw. für die großen Winkelbereiche, die für die Charakterisierung von TCO/Glas für

Siliziumdünnschichtsolarzellen benötigt werden. Abgesehen von diesen beiden Ansätzen sind uns keine Fortschritte anderer Stellen bekannt geworden.

## 2.5 Veröffentlichungen

LayTec hat während der Projektlaufzeit keine Ergebnisse veröffentlicht.

# 3 Quellenverzeichnis

- [1] „Lichtmanagement in industriell gefertigten Silizium-Dünnschichtmodulen“ (Förderkennzeichen 0327693A-J)
- [2] Lechner, P.; Geyer, R.; Schade, H.; Rech, B.; Kluth, O.; Stiebig, H., „Optical TCO Properties and Quantum Efficiencies in Thin-Film Silicon Solar Cells“, Proceedings of the 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Paris, 2004. - S. 1591 – 1594
- [3] Dewald, W.; Sittinger, V.; Szyszka, B.; Gordijn, A.; Hüpkes, J.; Hamelmann, F.; Stiebig, H.; Säuberlich, F., „Angular resolved light scattering of structured TCOs for the application in a-Si:H/ $\mu$ c-Si:H solar cells“, Proceedings of the 8th Int. Conf. on Coatings on Glass and plastics 2010, Braunschweig, Germany, ISBN: 987-3-00-031387-5, S. 415-416
- [4] G. Jost, E. Bunte, J. Worbs, H. Siekmann, J. Hüpkes, „Surface Characterization of Sputtered ZnO:Al for Silicon Thin-Film Solar Cells“, EUPVSEC
- [5] Takeda, S et al. „Development of double-sided silicon strip detectors (DSSD) for a Compton telescope“, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Volume 579, Issue 2, 2007, S. 859–865
- [6] Cole, H. B., „Tapered fiber optic array“, Patent, Veröffentlichungsnummer US4076378 A, Veröffentlichungsdatum 28. Febr. 1978
- [7] [http://www.openoptogenetics.org/images/8/89/Fiber\\_Optics\\_Theory\\_and\\_Applications.pdf](http://www.openoptogenetics.org/images/8/89/Fiber_Optics_Theory_and_Applications.pdf), Zugriff 20.01.2014
- [8] <http://www.edmundoptics.com/optics/windows-diffusers/optical-diffusers/opal-diffusing-glass/1671>, Zugriff 20.01.2014
- [9] <http://de.wikipedia.org/wiki/Tetrakisheptaeder>, Zugriff 20.01.2014
- [10] [http://de.wikipedia.org/wiki/Konoskopische\\_Holografie](http://de.wikipedia.org/wiki/Konoskopische_Holografie), Zugriff 20.01.2014
- [11] Berner, M.; Sämman, M.; Garamoun, A.; Schubert, M. B., „Quantification of Optical Deflection by Laser-structured ZnO:Al“, IEEE Journal of Photovoltaics, vol. 3, Nr. 1, 2013, S.590