

# 1. Einleitung

*Die vorliegende Arbeit wurde am Institut für Solarenergieforschung (ISFH) in Hannover im Rahmen des BMBF-Projektes: „Herstellung der CuInSe<sub>2</sub>-Dünnschichtsolarzelle unter weitgehender Anwendung galvanischer Prozesse“ (kurz: CIS-Projekt) angefertigt. Das Projekt, die darin verfolgten Strategien und der eigene Anteil an den geleisteten Arbeiten werden im zweiten Abschnitt der Einleitung beschrieben, damit der Leser die Arbeit in ihren Kontext einordnen kann.*

*Im ersten Abschnitt der Einleitung wird die wissenschaftliche Bedeutung dieser Arbeit zusammenfassend erläutert. Dabei wird beim Leser etwas Spezialwissen vorausgesetzt, das umfassend erst in späteren Kapiteln erläutert wird.*

*Die Arbeit ist in sechs Kapitel unterteilt. Im zweiten Kapitel steht das präparative Vorgehen im Mittelpunkt. Die empirischen Ergebnisse werden im Wesentlichen heuristisch motiviert. Dieses Kapitel ist ein in sich geschlossener Teil der Arbeit.*

*Die drei darauf folgenden Kapitel bilden gemeinsam den Hauptteil der Arbeit. Dort werden theoretische Konzepte abgeleitet, die dazu dienen, Messdaten zu interpretieren, die mittels ELECTRON BEAM INDUCED CURRENT (EBIC) ermittelt werden, und quantitative Aussagen daraus zu folgern. Dabei leitet das dritte Kapitel den Themenkomplex durch Vermittlung von Grundlagen ein.*

*Im vierten und fünften Kapitel werden bestimmte Messanordnungen detaillierter untersucht, Messergebnisse präsentiert, interpretiert und diskutiert.*

*Abschließend folgt im sechsten Kapitel eine Zusammenfassung aller Ergebnisse.*

## 1.1. Wissenschaftliche Bedeutung

Im Rahmen dieser Arbeit ist es gelungen, das EBIC-Signal eines Vielschicht-Systems mit dem der Messmethode innewohnendem lateralen Auflösungsprofil zu entfalten. Dadurch wird die Ortsauflösung einer Messung um ein bis zwei Größenordnungen verbessert. Selbst wenn Strukturen untersucht werden, deren Ausdehnung genauso groß ist wie die Anregungsregion des Elektronenstrahls, können noch quantitative Aussagen aus den Messdaten gewonnen werden.

Dank der gesteigerten Ortsauflösung ist zum ersten Mal der empirische Nachweis dafür gelungen, dass das EBIC-Signal nicht allein durch die Trennung der primären Elektron-Loch-Paare zustande kommt, sondern auch durch die Absorption von Lumineszenz-Strahlung in der Raumladungszone (RLZ).

Außerdem zeigt sich für große Anregungsenergien ein bisher nicht veröffentlichter negativer Beitrag zum EBIC-Signal aus der ITO-Schicht. Die Ursache für diesen Effekt bleibt ungeklärt.

Mit einem umfangreichen Modell werden aus den „geschärften“ EBIC-Daten die Breite der RLZ und die Diffusionslänge im CIS bestimmt. Ist letztere für eine Reihe von Anregungsenergien bekannt, so kann eine Abschätzung für die Oberflächen-Rekombinations-Geschwindigkeit gewonnen werden.

Eine weitere bisher nicht veröffentlichte Beobachtung ist die Feststellung sehr großer charakteristischer Längen in planaren EBIC-Messungen. Obwohl die CIS-Schicht nur 1  $\mu\text{m}$  dick ist, wird aus einer Entfernung von mehreren 100 bis 1000  $\mu\text{m}$  vom Rückkontakt der Diode noch ein EBIC-Strom registriert. Dieser unerwartete Effekt wird umfassend erklärt. Das hierfür eingesetzte Modell erlaubt die Bestimmung des Schichtwiderstandes der CIS-Schicht und eine Abschätzung der Strahlungsresistenz der untersuchten Probe.

## 1.2. Das CIS-Projekt

Kupfer-Indium-Diselenid (CIS) ist eines von wenigen Materialien, die das Potential haben, die hohen Investitionskosten für Solarmodule zu reduzieren, welche heutzutage üblicherweise aus Silizium hergestellt werden. Aus diesem Grund steht CIS schon seit Jahren im Mittelpunkt intensiver Forschung. CIS zeichnet sich trotz des sehr komplexen ternären Systems dadurch aus, dass es in guter Qualität mit einer großen Methodenvielfalt hergestellt werden kann. Höchste Wirkungsgrade wurden bisher am *Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung* in Stuttgart in Zusammenarbeit mit dem *IPE* (Universität Stuttgart) mit der KOVERDAMPFUNG VON Cu, In und Se und von der Firma *Siemens* in München mit „schnellem Aufheizen“ (RAPID THERMAL PROCESSING) VON Cu-In-Se-Schichtpaketen erzielt. Für beide Verfahren sind teure Vakuum-Apparaturen notwendig. Der Grundgedanke des CIS-Projektes am ISFH ist, die Kostenbilanz durch den weitgehenden Verzicht auf Vakuumverfahren zu verbessern. So wird auch die Energiebilanz der Solarzelle verbessert. Wenn eine Solarzelle mit einem Wirkungsgrad von beispielsweise 12 % galvanisch hergestellt würde, so könnte die Gesamtenergie, die für die Herstellung der Solarzelle erforderlich war, binnen 4 Monaten erwirtschaftet werden. Das ist eine mit Vakuummethoden und anderen Materialien nicht erreichbar kurze Zeit [Reineke-Koch 94].

Folgende Eckpunkte sind im CIS-Projekt des ISFH festgeschrieben: Alle benötigten Schichten werden entweder durch SPRAYPYROLYSE oder durch galvanische Abscheidung erzeugt. Lediglich der Selenisierungsschritt findet in einer Vakuum-Apparatur unter Selen-Atmosphäre statt. Außerdem wird versucht, einen Teil des Indiums in CIS durch Gallium zu ersetzen.

Üblicherweise werden CIS-Solarzellen in der Substrat-Konfiguration hergestellt. Hier werden auf einem Molybdän-beschichteten Glas sequenziell die CIS-Schicht, eine *Bufferschicht* und das Fenstermaterial aufgebracht. Diese Konfiguration kommt für das CIS-Projekt nicht in Frage, da für die Galvanik ein leitendes Substrat benötigt wird, Mo aber nur durch ein Vakuumverfahren (SPUTTERN) auf Glas aufgebracht werden kann. Deshalb wird die Superstrat-Konfiguration verwendet. Hier wird auf das Glas zunächst ITO (*Indium Tin Oxid*) als Fenstermaterial mittels SPRAYPYROLYSE aufgebracht. Dieses dient mit oder ohne zusätzliche *Bufferschicht* als Substrat für die Galvanik. Die *Bufferschicht* (CdS oder  $\text{In}_2\text{Se}_3$ ) wird entweder durch CHEMICAL BATH DEPOSITION oder ebenfalls mittels Galvanik hergestellt. Für die Galvanik der CIS-Schichten sind mehrere unterschiedliche Prozesslinien möglich: Einerseits können die einzelnen Elemente nacheinander und andererseits je zwei oder gar drei Elemente gleichzeitig abgeschieden werden. Das CIS-Projekt sieht vor, alle Linien solange zu verfolgen, bis eine zum Erfolg führt, um diese dann ausschließlich weiterzuentwickeln.

Meine Aufgabe im Rahmen des Projekts bestand in der Abscheidung der einzelnen Elemente. Die meiste Zeit wurde in die Entwicklung der Cu-Galvanik investiert. Bei der In- und Ga-Galvanik konnte das erworbene Wissen bereits gewinnbringend eingesetzt werden. Die ersten funktionierenden Solarzellen wurden vom Kollegen *Dr. Kampmann* durch die ternäre CIS-Abscheidung auf binär abgeschiedenes  $\text{In}_2\text{Se}_3$  realisiert. Daraufhin stellte ich meine Arbeiten in der Galvanik ein und konzentrierte mich fortan auf die Charakterisierung der neuen Zellen. Bei allen erprobten Prozesslinien folgt nach der Galvanik die Selenisierung im Selenisierungssofen. Selbst die ternär abgeschiedenen CIS-Schichten werden nachträglich selenisiert, da sonst keine funktionierenden Solarzellen realisiert werden können.

Als letzter Schritt bei der Zellprozessierung ist im CIS-Projekt die galvanische Abscheidung des Rückkontaktes geplant. Dieser Plan wurde nicht umgesetzt. Stattdessen sind eine ganze Reihe von Metallen aufgedampft bzw. gesputtert worden.