
**Bildgebende elektrochemische Untersuchungen
an Grenzflächen mit metallzentrierten
Elektronenübertragungen**



Dissertation

eingereicht am Fachbereich Biologie, Chemie und Pharmazie
der Freien Universität Berlin

von

Dipl.-Chem.

Axel Barkschat

Berlin 2003

-
1. Gutachter: Prof. Dr. H. Tributsch
 2. Gutachter: Prof. Dr. J. K. Dohrmann

Abgabe der Dissertation: 23.12.2003
Tag der Disputation: 28.4.2004

*Für meine Mutter
und meinen Vater*

Inhaltsverzeichnis

abstract	ix
Kurzzusammenfassung	xi
Einleitung	xiii
Theoretischer Teil	
1 Halbleiter	3
1.1 Grundbegriffe	3
1.2 Direkte und indirekte Übergänge	8
1.3 Rekombinationsmechanismen	11
1.4 Der belichtete Halbleiter	13
1.5 pn-Kontakte	14
1.6 Metall-Halbleiterkontakte	17
1.7 Halbleiter-Elektrolytkontakte	20
1.8 Photoelektrochemische Zellen	21
1.9 Die Quantenausbeute	22
2 Charakterisierung von Solarzellen	25
3 Elektrische Charakterisierung von Halbleitern	29
3.1 Grundlagen	29
3.2 Leitfähigkeitsmessung mit kollinearer Kontaktanordnung	30
3.3 Leitfähigkeitsmessung nach van der Pauw	32
3.4 Hallmessungen	33
3.5 Seebeck-Messungen	35
4 Airy-Muster und Durchmesser des Laserspots	37
Experimentelle Methoden	
5 Das SMSC-Gerät	45
5.1 Aufbau	45

5.2	Steuer- und Auswertprogramme	49
5.3	Bestimmung der Laserspot-Lichtintensität	50
5.4	Bestimmung des Laserspotdurchmessers	51
5.5	Filtereinstellungen des LIA (EG&G 5210)	57
5.6	Weitere wichtige Meßparameter	58
5.7	Ortsaufgelöste Photostromaufnahmen	59
5.8	Photostrom/Spannungskennlinien	61
5.9	Messung von Dunkelstromkennlinien	61
5.10	Messung von Photostromspektren	62
6	Hall- und Leitfähigkeitsmessungen	63
6.1	Probenkopf und neues Substrat	63
6.2	Probenpräparation	64
6.3	Durchführung der Messung	64
7	Texturmessungen	67
8	HPLC-Chromatographie	73
 Ergebnisse und Diskussion		
9	Schichtgitterhalbleiterproben (WS_2, WSe_2, MoS_2, $MoSe_2$)	79
9.1	Einleitung	79
9.2	Struktur und Eigenschaften	79
9.3	Literaturüberblick: Herstellung von Schichtgitterhalbleitern	85
9.3.1	Einkristalle	85
9.3.2	Polykristalline Schichten	87
9.3.3	Dünnschichten	87
9.3.4	Gepreßte Proben	90
9.4	Literaturüberblick: Elektrochemische Messungen an Schichtgitterhalbleitern	90
9.4.1	Chemische Passivierung durch Adsorption	93
9.4.2	Chemische Passivierung durch Ätzung	94
9.5	Herstellung und Charakterisierung der Probenmaterialien	96
9.5.1	Herstellung	96
9.5.2	Charakterisierung	99
9.6	Der Iod/Iodid-Elektrolyt	102
9.6.1	Bestimmung der Diffusionskonstante von Triiodid	102
9.6.2	Bestimmung der Diffusionsgrenzströme bei SMSC-Messungen	104
9.7	Probenpräparation	105
9.8	SMSC-Messungen an Kristallproben	109
9.8.1	Stabilität einer p- WSe_2 -Probe im Iod/Iodid-Elektrolyten	113
9.8.2	Messungen nach lokaler Druckbelastung	115

9.8.3	Messungen an einer natürlichen n-MoS ₂ -Kristallprobe	116
9.9	Hohe Photostromdichten analog zu Ultramikroelektroden	118
9.10	Chemische Oberflächenbehandlungen von WSe ₂	124
9.10.1	Chemische Behandlung von WSe ₂ mit Tween80	125
9.10.2	Chemische Behandlung von WSe ₂ mit EDTA	129
9.11	Messungen mit μm -Auflösung an p-WSe ₂ -Kristallstufen	130
9.11.1	Messungen vor der EDTA-Behandlung	132
9.11.2	Messungen nach der EDTA-Behandlung	135
9.11.3	Der Kontrast hochauflösender Photostromabbildungen	141
9.12	SMSC-Messungen an neuen Schichtgitterproben	143
9.12.1	Schichten aus geklebten Kristalliten	144
9.12.2	Kristallfilme von der Ampullenwand	150
9.13	MoS ₂ - und WS ₂ -Dünnschichten durch Sulfurieren	156
9.13.1	WS ₂ -Dünnschichten auf Saphir-Substrat	156
9.13.2	WS ₂ -Dünnschichten auf Glimmer-Substrat (Muskovit)	158
9.13.3	Sulfurierte Mo- und W-Bleche	160
9.14	Texturmessungen an MoS ₂ - und WS ₂ -Schichten	168
9.14.1	Textur von WS ₂ aus sulfuriertem Wolframblech	168
9.14.2	Textur von MoS ₂ aus sulfuriertem Molybdänblech	170
9.14.3	Textur von Molybdän- und Wolframblechen	173
9.15	Zusammenfassung	174
10	Injektionssolarzellen	177
10.1	Einleitung	177
10.2	Aufbau und Funktionsweise	179
10.3	Durchführung der orts aufgelösten Messungen	182
10.4	Einfluß der Titandioxid-Schichtdicke	184
10.5	Degradationsuntersuchungen	187
10.5.1	Auflösung des Platinrückkontaktes bei Eindringen von Luft	189
10.5.2	Photodegradation in maskenbelichteten Bereichen	192
10.5.3	Photodegradation proportional zur Lichtintensität	201
10.6	Zusammenfassung	203
11	HPLC-Messungen zur Degradation von Injektionssolarzellen	205
11.1	Einleitung und Literaturüberblick	205
11.2	Aufbau und Funktion des HPLC-Gerätes	206
11.3	Proben und Probenvorbereitung	207
11.4	Durchführung der HPLC-Messungen	208
11.5	Auswertung der Ergebnisse	209
11.5.1	Übersicht über die HPLC-Messungen	209
11.5.2	Untersuchung des Vorlaufs	214
11.5.3	Chromatogramme	216
11.5.4	Der Einfluß des Lösungsmittels auf die Spektren	220
11.5.5	Vergleich mit den Fraktionen	223

11.6	Untersuchungen zur Probenherstellung	225
11.6.1	Untersuchung des Niederschlages	227
11.6.2	Untersuchung der Photoreaktion	230
11.7	Diskussion	232
11.8	Zusammenfassung	235
12	CuInS₂-Dünnschichtsolarzellen	239
12.1	Aufbau und Herstellung	239
12.2	Benetzungswinkelmessungen an CIS-Schichten	240
12.2.1	Experimenteller Teil	240
12.2.2	Ergebnisse und Diskussion	243
12.2.3	Zusammenfassung	251
12.3	Untersuchungen neuer Pufferschichten	252
12.3.1	Experimenteller Teil	252
12.3.2	Ergebnisse und Diskussion	254
12.3.3	Zusammenfassung	259
13	Zusammenfassung und abschließende Diskussion	261
 Anhang		
A	Technischer Anhang	271
A.1	Das Mikrocontroller-Schaltgerät	271
A.2	Filtereinstellungen des LIA EG&G 5210	277
B	Meß- und Steuerprogramme	279
B.1	Das Auswerteprogramm i-Tiffer	279
B.2	Das Programm i-HPLC	287
B.3	Das Programm Polplot	291
	Symbolverzeichnis	293
	Abkürzungsverzeichnis	297
	Danksagung	299
	Veröffentlichungen	303
	Lebenslauf	305
	Abbildungsverzeichnis	307
	Literaturverzeichnis	311

abstract

In order to obtain a deeper insight into the mechanisms of operation, the degradation of materials and the possibilities of chemical modification of solar materials still under development, a microscopic photocurrent-mapping technique was used and further developed. For these measurements, samples were selected for their importance in progressing photovoltaic research, and a new improved microscopic set-up (SMSC: scanning microscope for semiconductor characterization) for measurements under local illumination by a tiny laser spot was build up. The maximum resolution for measurements in electrolytes was $1\ \mu\text{m}$.

Surfaces of semiconducting, layer-type sulfides and selenides of tungsten and molybdenum, WS_2 , WSe_2 , MoS_2 and MoSe_2 , usually exhibit an anisotropic distribution of photoactivity. By comparison with optical micrographs it was seen that this is due to charge carrier recombination at surface states in the vicinity of cracks or broken edges. At these locations, crystal faces perpendicular to the van der Waals plane with dangling bonds exist. Locally resolved images of the quantum efficiency on as-grown crystallite surfaces of the above materials demonstrate the recombination of photogenerated charge carriers at steps. By chemical surface treatment with Tween80, a polyethoxysorbitaneoleate, and ethylenediaminetetraacetic acid, the photoactivity could be enhanced. An up to eightfold increase of the locally measured photocurrent was observed, especially in surface areas of previously low photoactivity. In search for samples with isotropic photoactivity stretched out over wider surface areas, a large number of differently prepared samples of the above layer-type semiconductors were examined by the use of the SMSC. Under this point of view, the most promising materials appeared to be polycrystalline films and layers of MoS_2 and WS_2 obtained from sulphurized molybdenum and tungsten sheets. The latter layers displayed a well expressed texture, as was found out by x-ray diffractometry.

In experiments with dye-sensitized solar cells based on TiO_2 and sensitized with Ru535-dye, mechanisms of degradation were in the focus of interest. In some cases the complete dissolution of the platinization of the back-contact was observed, which occurred only under illumination and only in the presence of air (possibly oxygen). Under longterm-illumination through round masks, the photodegradation in the illuminated areas and the degradation of the electrolyte could be examined separately. For these cells effects of dissolving platinization could be excluded. If a neutral filter with linearly decreasing optical density was used in the longterm-illumination experiment, a decrease of the photocurrent proportional to the intensity of the incoming light was observed. The photodegradation is assumed to result from instability of the semiconductor-sensitizer-system. In HPLC-analytical investigations a large number of different fractions of possible products were found. This result indicates a reaction of the Ru535-dye, but the experimental basis is so far not sufficient to draw a final conclusion.

It was shown for copper indium disulphide (CIS) solar cells, that simple contact angle measurements at CIS-layers prior to further processing can be used to evaluate their suitability for the production of efficient solar cells. Here, SMSC-measurements

led to a better understanding and a different interpretation of the results compared to integral measurements of the solar cell performance. In CIS-cells a cadmium sulphide buffer layer is used to prevent shunts between the CIS-layer and the ITO-window material. For environmental aspects CdS is unfavourable and should be replaced. New buffer layers from chemical treatment with solutions containing different metals, especially indium and manganese, were formed and cells with high local photocurrents under short circuit conditions could be obtained.

Kurzzusammenfassung

An ausgewählten, in der Entwicklung befindlichen Solarmaterialien wurden bildgebende Messungen der lokalen Photoaktivität durchgeführt, um Einblicke in die Funktionsweise, Degradation und Möglichkeiten der gezielten Modifizierung zu erhalten. Zu diesem Zweck wurde ein optisches Raster-Laser-Mikroskop (SMSC: scanning microscope for semiconductor characterization) aufgebaut. Durch die Abbildung des lokalen Photostroms mit Auflösungen bis zu $1\ \mu\text{m}$ konnte in vielen Fällen ein anderes und besseres Verständnis der relevanten Prozesse gewonnen werden, wie es aus integralen Messungen nicht zugänglich gewesen wäre.

Bei den halbleitenden Sulfiden und Seleniden des Molybdäns und Wolframs vom Schichtgittertyp, WS_2 , WSe_2 , MoS_2 und MoSe_2 , zeigte sich in den bildgebenden Messungen meist eine sehr anisotrope Photoaktivität. Im Vergleich mit optischen mikroskopischen Aufnahmen wurden senkrecht zu den van der Waalschen Ebenen liegende Flächen, etwa an Bruchkanten und Stufen, als Rekombinationszonen identifiziert. In Messungen mit einer Auflösung von $1\ \mu\text{m}$ wurde erstmals die Rekombination photogenerierter Ladungsträger an gewachsenen Kristallstufen in Photostromabbildungen gezeigt. Durch chemische Oberflächenbehandlung mit Tween80, einem Polyethoxysorbitanoleat, und Ethylendiamintetraessigsäure konnte die Photoaktivität an den Kristalloberflächen modifiziert werden. Besonders in zuvor wenig photoaktiven Zonen wurden bis zu achtfache Steigerungen beobachtet. Auf der Suche nach ausgedehnten und isotrop photoaktiven Schichten wurde eine Vielzahl verschiedener Schichtgitterhalbleiterproben mit dem SMSC-Gerät untersucht. Am vielversprechendsten erscheinen polykristalline Filme und auf Molybdän- und Wolframblechen durch Sulfurieren erhaltene Sulfidschichten. Diese Schichten zeigten in röntgendiffraktometrischen Messungen eine deutliche Textur.

An Injektionsolarzellen auf der Basis von TiO_2 und dem Sensibilisator Ru535 wurde das SMSC überwiegend für Degradationsuntersuchungen eingesetzt. So wurde die nur unter Belichtung und Lufteinwirkung ablaufende, vollständige Auflösung der Platinierung des Rückkontaktes beobachtet. Bei intakter Platinierung wurde in Langzeituntersuchungen mit Maskenbelichtung getrennt die Photodegradation im belichteten Bereich und eine Degradation des Elektrolyten untersucht. Die Belichtung durch einen Graukeilfilter unter linearer Abnahme der Lichtintensität führte zu einer proportionalen Abnahme der Photoaktivität. Diese Photodegradation wird als eine Folge der Instabilität des Halbleiter-Sensibilisator-Systems angesehen. In HPLC-Analysen von Farbstoffextrakten an Injektionszellen, die über einen Monat belichtet wurden, wurde eine Vielzahl von Substanzfraktionen gefunden, die auf eine Reaktion des Farbstoffs hindeuten, aber noch nicht abschließend bewertet wurden.

Bei Kupferindiumdisulfidzellen (CIS) wurde gezeigt, daß sich Benetzungswinkelmessungen als Voruntersuchung der CIS-Schichten vor der Weiterprozessierung zu CIS-Solarzellen eignen. Die bildgebenden Photostrommessungen führten zu einem anderen Verständnis und einer besseren Bewertung der Benetzungswinkelmessungen. In Versuchen zur Herstellung neuer cadmiumfreier Pufferschichten wurden vielversprechende, hohe lokale Kurzschlußphotoströme gemessen.

Einleitung

In der Photovoltaik wurde bisher der Schwerpunkt von kristallinen Siliziumsolarzellen gebildet, die bei gutem Wirkungsgrad gegenüber Degradation stabil sind. Wegen der relativ großen Menge nötigen Halbleitermaterials und des hohen Energiebedarfes bei ihrer Herstellung amortisieren sie sich aber erst nach Jahren finanziell und im Hinblick auf die Energiebilanz.

Andere Zelltypen aus den Bereichen der Dünnschichtsolarzellen und der elektrochemischen Photovoltaik haben daher in den vergangenen Jahren einen zunehmenden Stellenwert erreicht. Bei diesen Zelltypen gibt es aber noch Schwachpunkte und Möglichkeiten der Verbesserung durch weitere Forschung.

In dieser Arbeit wurden unter Einsatz eines neu aufgebauten optischen Raster-Lasermikroskops (SMSC: scanning microscope for semiconductor characterization) durch die orts aufgelöst abgebildete Photoaktivität neue Einsichten in die Mechanismen der Funktion und Degradation verschiedener Zellsysteme gewonnen. Für die Untersuchungen wurden die zur Zeit wichtigsten in der Entwicklung befindlichen Solarmaterialien ausgewählt.

Ein wichtiges Kriterium bei photoelektrochemischen Zellen ist vor allem ihre chemische Stabilität, die eng mit der Widerstandsfähigkeit der Solarzelle gegenüber Degradation verbunden ist. Bei Materialien, bei denen ein schneller, metallzentrierter Elektronenübergang, möglichst unter Beteiligung nichtbindender d-Elektronen gegeben ist, wird die höchste Stabilität beobachtet.

Die Schichtgitterhalbleiterverbindungen WS_2 , WSe_2 , MoS_2 und $MoSe_2$ besitzen eine für einen hohen Solarzellwirkungsgrad fast optimale Bandlücke im sichtbaren Bereich des Lichtes. Wegen des direkten Elektronenüberganges, der mit hohen Absorptionkoeffizienten verbunden ist, eignen sich diese Materialien auch zum Einsatz in Dünnschichtsolarzellen. Insgesamt und wegen ihrer Umweltverträglichkeit und der guten Verfügbarkeit sind sie sehr vielversprechende Materialien zum Einsatz in konventionellen und elektrochemischen Solarzellen. Dabei ist ihre hohe chemische Stabilität wegen der metallzentrierten Elektronenübertragung in nichtbindenden d-Leitungsbändern ein wesentlicher Vorteil.

Ihrem praktischen Einsatz standen bisher Probleme mit hoher Ladungsträgerrekombination an den zu den van der Waalsschen Ebenen senkrechten Flächen entgegen, die an den Oberflächen von Kristallstufen und Bruchstellen gebildet werden. In der Vergangenheit wurde mit mäßigem Erfolg versucht, die Ladungsträgerrekombination durch chemische Oberflächenbehandlung zu minimieren. Dazu wurden meist Substanzen eingesetzt, die Chelatkomplexe bilden können, und die an den Rekombinationsflächen an freiliegenden Metallatomen adsorbieren sollen.

Unter den elektrochemischen Solarzellen haben die mit einem Rutheniumkomplex sensibilisierten Farbstoff- oder Injektionszellen auf der Basis von TiO_2 die größte Bekanntheit erlangt. Hier sind es Schwierigkeiten, einen schnellen und verlustarmen Ladungstransfer zwischen Halbleiter und Elektrolyt aufrecht zu erhalten und eine

schnelle Regenerierung des nach der Elektroneninjektion positiv geladen zurückbleibenden Farbstoffmoleküls zu ermöglichen.

Damit verbunden ist die nach wie vor zweifelhafte Langzeitstabilität des Farbstoff-Halbleitersystems, obwohl dieses System aufgrund der schnellen metallzentrierten Elektronenübertragungen unter Beteiligung nichtbindender d-Elektronen eine vergleichsweise hohe Stabilität besitzt. Werden dagegen Farbstoffe eingesetzt, die keinen derartigen schnellen Elektronentransfer ermöglichen, wird eine Degradation schon nach Stunden oder wenigen Tagen beobachtet.

Für die Ru535-sensibilisierten Zellen wurde von Grätzel aufgrund von Stabilitätsuntersuchungen an Zellen mit geringem oder nicht spezifiziertem Wirkungsgrad, zum Teil unter Belichtung mit niedrigen Lichtintensitäten, eine Nutzbarkeit der Zellen über 20 Jahre postuliert. Diese Aussagen wurden aber aufgrund anderer Arbeiten in Zweifel gezogen [1, 2].

Ein wichtiges, seit kurzem auch kommerziell eingesetztes Schichtmaterial für Dünnschichtsolarzellen ist Kupferindiumdisulfid. Ein verbesserungsbedürftiger Schwachpunkt ist die wenig umweltverträgliche Verwendung einer Cadmiumsulfid-Pufferschicht in diesem Zelltyp. Ohne Pufferschicht würde wegen Strombrücken zwischen Schicht- und Fenstermaterial nur ein sehr geringer Wirkungsgrad erreicht. Daher gibt es auch seit einiger Zeit Versuche, die Cadmiumsulfidschichten durch andere sulfidische oder oxydische Pufferschichten zu ersetzen. Bislang wurde dabei aber die Wirksamkeit der Cadmiumsulfidpufferschichten nicht erreicht. Wegen der relativ aufwendigen Herstellung der CIS-Solarzellen ist es für die kommerzielle Produktion wünschenswert, schon an den CIS-Schichten Voruntersuchungen durchführen zu können, um die Qualität der Schichten für die Herstellung effizienter CIS-Solarzellen abzuschätzen zu können.

In den vergangenen zwanzig Jahren gab es viele Versuche, chemische Vorgänge an Elektrodenoberflächen abzubilden. Sie gingen mit der in dieser Zeit schnell voranschreitenden Entwicklung der elektronischen Datenverarbeitung einher, die erst die erforderlichen Steuermechanismen und die Verarbeitung der Bilddaten ermöglichte. Dabei wurden unterschiedliche Ansätze verfolgt, die zur parallelen Entwicklung einer Reihe verschiedener Verfahren führten.

Durch das zeilenweise Entlangführen einer Ultramikroelektrode ($\varnothing \leq 25 \mu\text{m}$) in unmittelbarer Nähe der Elektrodenoberfläche in einer Elektrolytlösung kann der lokale elektrochemische Ladungstransfer abgebildet werden (SECM: scanning electrochemical microscopy) [3, 4].

Lokale Photostromabbildungen werden durch Abscannen [5] der zu vermessenden Elektrode mit einem Laserstrahl (LBIC: laser (light) beam induced current) erhalten. Dazu werden Ablenkspiegel (SPEM: scanning photoelectrochemical microscopy) [6], Scantische zur Bewegung der Proben (photoelectrochemical imaging) [7, 8] oder mit besserer Auflösung Kombinationen von optischen Mikroskopen und Scantischen eingesetzt (SMSC: scanning microscope for semiconductor characterization) [9].

Bei EBIC-Techniken (EBIC: electron beam induced current) wird der Photostrom durch einen Elektronenstrahl induziert [10]. Dazu kann auch ein Raster-Elektronen-

mikroskop eingesetzt werden (CCSEM: charge collection scanning electron microscopy) [11, 12].

Durch die Beleuchtung der Umgebung der Elektroden spitze eines Raster-Tunnel-Elektronenmikroskops (RTM) wird ein lokaler lichtinduzierter Tunnelstrom abbildbar (Photo-STM; CITS: current image tunneling spectroscopy) [13–17].

Der RTM-Technik eng verwandt ist die relativ neue Nahfeldmikroskopie (SNOM: scanning near field optical microscopy) [18], bei der anstelle einer Elektroden spitze eine Glasfaser in unmittelbarer Nähe (ca. 100 nm) der Probe entlanggeführt wird. Durch eine sehr kleine Öffnung (\varnothing ca. 100 nm) in der metallbeschichteten Faserendfläche wird Licht in das Halbleitermaterial eingekoppelt, wodurch auch Photoströme gemessen werden können. Bei Messungen im Elektrolyten wurden Auflösungen von 0,3 μm bis 0,1 μm erreicht [19]. Allerdings wird das Photostrombild bei der Nahfeldmikroskopie auch stark von der Oberflächentopographie beeinflusst.

Ziel der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit war es, mit orts aufgelösten, bildgebenden Messungen der Photoaktivität schneller neue Einblicke in die Funktionsweise, die Degradation und die Möglichkeiten der chemischen Modifizierung verschiedener Halbleitermaterialien und Solarzellen zu erlangen. Die Materialien und Solarzellen wurden anhand ihrer Relevanz für die aktuelle Forschung in der Photovoltaik ausgewählt.

Um die Messungen durchführen zu können, war es vorgesehen, ein neues optisches Raster-Laser-Mikroskop (SMSC: scanning microscope for semiconductor characterization) aufzubauen und entsprechend den Erfordernissen weiterzuentwickeln.

Es war geplant, an den Schichtgitterhalbleitern (WS_2 , WSe_2 , MoS_2 und MoSe_2) die Ladungsträgerrekombination lokal abzubilden und durch chemische Modifizierung der Halbleiteroberfläche die Photoaktivität zu steigern. Um dabei auch kombinatorische Methoden durch das lokale Aufbringen unterschiedlicher Substanzen anwenden zu können, sollten Proben mit einer weitgehend isotropen Photoaktivität und genügend großen Abmessungen präpariert und bildgebend mit dem SMSC vermessen werden.

Bei Injektionsolarzellen mit einem TiO_2 -Halbleitersubstrat und einem Ru535-Sensibilisator bildete die Abbildung der Photoaktivität bei unterschiedlich präparierten Zellen und vor allem die Untersuchung verschiedener Arten der Degradation das Zentrum des Interesses. Durch lokale Langzeitbelichtung der Zellen und anschließende SMSC-Untersuchung, sollte die Photodegradation und ihre Abhängigkeit von der Lichtintensität von anderen Degradationsarten getrennt untersucht werden.

Mit lokaler chemischer Behandlung von Dünnschichten aus Kupferindiumdisulfid (CIS) mit metallhaltigen Lösungen sollte versucht werden, wirksame Pufferschichten für die Herstellung von CIS-Solarzellen aufzufinden, die das gegenwärtig verwendete Cadmiumsulfid ersetzen könnten. Wegen des relativ aufwendigen Verfahrens der Herstellung von CIS-Solarzellen besteht ein Interesse an einer Voruntersuchung der qualitativen Eignung der dafür verwendeten CIS-Schichten. Daher sollte geprüft werden, ob Benetzungswinkelmessungen an den CIS-Schichten dafür eingesetzt werden können.

